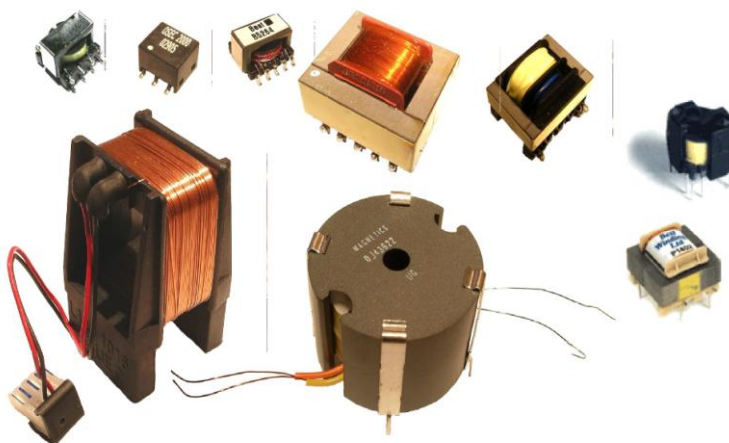


4700

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания
к лабораторной работе



Рязань 2013

УДК 621.39

Исследование свойств ферромагнитных материалов: методические указания к лабораторной работе /Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.:

С.И. Мальченко, В.Г. Мишустин, Т.А. Холомина. Рязань, 2013. 16 с.

Рассматривается лабораторная работа по курсу «Материалы и компоненты радиоэлектронных средств».

Предназначены студентам специальностей 140400, 200100, 201000, 210100 210400, 211000.

Табл. 1. Ил. 7. Библиогр.: 4 назв.

Магнитное поле, напряженность магнитного поля, индукция, магнитная проницаемость, магнитные потери, вихревые токи, ферромагнетики, ферриты

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра биомедицинской и полупроводниковой электроники Рязанского государственного радиотехнического университета (зав. кафедрой проф. С.П. Вихров)

Исследование свойств ферромагнитных материалов

Составители: М а л ь ч е н к о Сергей Иосифович
М и ш у с т и н Владислав Геннадьевич
Х о л о м и н а Татьяна Андреевна

Редактор Н.А. Орлова

Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 20.09.13. Формат бумаги 60х84.

Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 120 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: определение точек основной кривой магнитной индукции в переменном магнитном поле, изучение зависимости магнитной проницаемости от напряженности и частоты магнитного поля, температуры, а также определение мощности потерь в зависимости от частоты, затрачиваемых на формирование вихревых токов и гистерезис.

1. Основные теоретические сведения

1.1. Единицы магнитных величин и магнитных свойств веществ

В электромагнитных устройствах автоматики, вычислительной и измерительной техники воздействие на магнитный элемент производится либо магнитным полем тока, проходящего по проводнику или обмотке, либо непосредственно магнитным полем (например, в феррозондах) или магнитным полем, которое сконцентрировано металлическим сердечником. В большинстве случаев основой электромагнитных элементов служит магнитный сердечник. Формируемое током в проводнике магнитное поле является, обычно, внешним по отношению к этому сердечнику. Прежде чем перейти к природе магнитных свойств вещества, напомним единицы магнитных величин в Международной системе единиц (СИ).

Внешнее магнитное поле линейного проводника с током I характеризуется напряженностью H магнитного поля (А/м) и является силовой характеристикой магнитного поля.

Если проводник равномерно намотан с количеством витков w на ферромагнитный сердечник с одинаковым сечением S по всей его длине l (например, на кольцевой сердечник), то напряженность магнитного поля в сердечнике $H = Iw/l$.

Под действием протекающего через проводник тока в сердечниках магнитных элементов создается магнитный поток Φ .

Наряду с напряженностью магнитное поле характеризуется магнитной индукцией B (Тл), определяемой для равномерного поля выражением $B = \Phi/S$, где S – площадь, через которую проходит магнитный поток.

Магнитная постоянная μ_0 (магнитная проницаемость вакуума) представляет собой отношение магнитной индукции к напряженности магнитного поля в вакууме $\mu_0 = B/H$.

Напряженность внешнего магнитного поля не зависит от свойств среды (от свойств вещества), где создается магнитный поток. Магнитная же индукция определяется как напряженностью, так и свойствами среды (вещества), характеризующимися относительной магнитной проницаемостью μ (или просто магнитной проницаемостью), которая показывает, во сколько раз проницаемость вещества больше или меньше проницаемости вакуума.

Магнитная индукция в среде (упрощенно можно представить как магнитное поле внутри вещества)

$$B = \mu\mu_0 H, \quad (1)$$

где $\mu_0 = \mu_a$ – абсолютная магнитная проницаемость вещества.

1.2. Классификация веществ по магнитным свойствам

По реакции на внешнее магнитное поле и характеру внутреннего магнитного упорядочения все вещества в природе можно подразделить на пять групп: *диамагнетики*, *парамагнетики*, *ферромагнетики*, *антиферромагнетики* и *ферримагнетики*. Перечисленным видам магнетиков соответствуют пять различных видов магнитного состояния вещества: диамагнетизм, парамагнетизм, ферромагнетизм, антиферромагнетизм и ферримагнетизм.

К *диамагнетикам* относят вещества, у которых магнитная восприимчивость отрицательна и не зависит от напряженности внешнего магнитного поля. К диамагнетикам относятся инертные газы, водород, азот, многие жидкости (вода, нефть и ее производные), ряд металлов (медь, серебро, золото, цинк, ртуть, галлий и др.). Большинство полупроводников (кремний, германий, соединения A_3B_5 , A_2B_6) и органических соединений, щелочно-галогидные кристаллы, неорганические стекла и др. также относят к диамагнетикам. Диамагнетиками являются все вещества с ковалентной химической связью и вещества в сверхпроводящем состоянии.

К *парамагнетикам* относят вещества с положительной магнитной восприимчивостью, не зависящей в слабых магнитных полях и при высоких температурах от напряженности внешнего магнитного поля. К числу парамагнетиков относят кислород, окись азота, щелочные и щелочно-земельные металлы, некоторые переходные металлы, соли железа, кобальта, никеля и редкоземельных элементов.

К *ферромагнетикам* относят вещества с большой положительной магнитной восприимчивостью (до 10^6), которая сильно зависит от напряженности магнитного поля и температуры.

Антиферромагнетиками являются вещества, в которых ниже некоторой температуры спонтанно возникает антипараллельная ориен-

тация элементарных магнитных моментов одинаковых атомов или ионов кристаллической решетки. При нагревании антиферромагнетик испытывает фазовый переход в парамагнитное состояние. Антиферромагнетизм обнаружен у хрома, марганца и ряда редкоземельных элементов (Ce, Nd, Sm, Tm и др.). Типичными антиферромагнетиками являются простейшие химические соединения на основе металлов типа окислов, галогенидов, сульфидов, карбонатов и т.п.

К *ферримагнетикам* относят вещества, магнитные свойства которых обусловлены нескомпенсированным антиферромагнетизмом. Подобно ферромагнетикам они обладают высокой магнитной восприимчивостью, которая существенно зависит от напряженности магнитного поля и температуры. Наряду с этим ферримагнетики характеризуются и рядом существенных отличий от ферромагнитных материалов. Свойствами ферримагнетиков обладают некоторые упорядоченные металлические сплавы, но главным образом - различные оксидные соединения, среди которых наибольший практический интерес представляют ферриты.

1.3. Намагничивание ферромагнитного материала

Под действием внешнего магнитного поля, созданного током в катушке, наложенной на магнитопровод из ферромагнетика, происходит процесс ориентации доменов в магнитопроводе и смещение их границ. Это приводит к намагничиванию стального магнитопровода (т.е. к росту величины внутреннего магнитного поля), причем намагниченность увеличивается с увеличением внешнего магнитного поля.

Намагниченность M (она характеризует магнитное поле внутри вещества) ферромагнитного материала растет только до определенного предельного значения, называемого намагниченностью насыщения M_s . Зависимость $B(H)$ является нелинейной и кривую $B(H)$ можно разделить на четыре участка:

1) практически линейный участок, соответствующий малым напряженностям поля, показывает, что магнитная индукция увеличивается относительно медленно и практически пропорционально напряженности поля;

2) нелинейный участок, на котором магнитная индукция B растет также практически пропорционально напряженности поля, но значительно быстрее, чем на начальном участке;

3) участок, который характеризует замедление роста величины индукции B ;

4) участок магнитного насыщения, где зависимость $B(H)$ снова линейная, но рост индукции B очень сильно замедлен по сравнению со

вторым. Магнитная индукция, которая соответствует намагниченности насыщения, называется *индукцией насыщения* B_s . Такая сугубо нелинейная зависимость объясняется «поведением» доменов ферромагнитного материала, обладающих спонтанной (самопроизвольной) намагниченностью.

При внесении ферромагнитного материала в магнитное поле одновременно наблюдаются процессы ориентации магнитных моментов доменов и смещение их границ (изменение объема). В слабом поле происходит увеличение объема доменов, у которых магнитный мо-

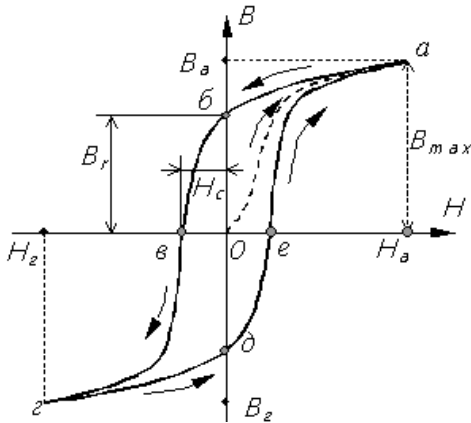


Рис. 1. График перемагничивания ферромагнетиков (петля гистерезиса)

мент, направленный вдоль оси легкого намагничивания, составляет наименьший угол с направлением внешнего поля. При снятии магнитного поля положение границ доменов восстанавливается, т.е. процесс носит обратимый характер. При усилении поля изменения структуры доменов более значительны и при снятии внешнего поля положение границ доменов не восстанавливается. Образуется остаточная индукция. При дальнейшем увеличении

напряженности поля происходит изменение угла вектора намагниченности доменов из направления вдоль оси легкого намагничивания в направление, совпадающее с направлением внешнего поля. При этом магнитное состояние материала достигает технического насыщения. Поведение кривой $B(H)$ при циклическом изменении внешнего магнитного поля имеет характерный вид, называемый петлей гистерезиса, как показано на рис. 1

В переменных магнитных полях магнитное состояние образца периодически повторяется, его магнитная индукция зависит от величины намагничивающего поля, направления и частоты его изменения. Форма петли гистерезиса при неизменной частоте зависит от предельных значений напряженности поля. Семейство таких симметричных петель изображено на рис. 2. Сплошная кривая, проходящая по вершинам петель, называется нормальной или основной кривой индукции.

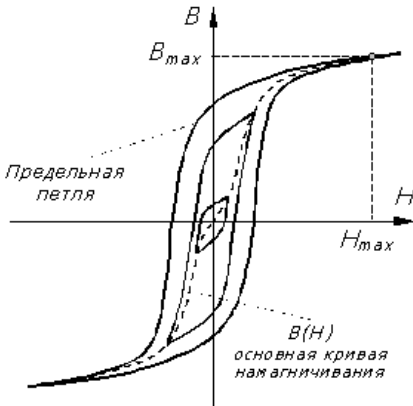


Рис. 2. Предельная петля гистерезиса

насыщения B_s ($B_{\max}$), остаточная индукция B_r , коэрцитивная сила H_c и площадь петли, характеризующая удельные потери на гистерезис за один цикл перемагничивания. Остаточной индукцией называют индукцию, которая остается в предварительно намагниченном образце после снятия внешнего поля. Коэрцитивная сила – напряженность размагничивающего поля, которое должно быть приложено к предварительно намагниченному образцу для уменьшения его магнитной индукции до нуля. Форма петли гистерезиса характеризует процессы, происходящие в ферромагнетике. При относительно небольших затра-

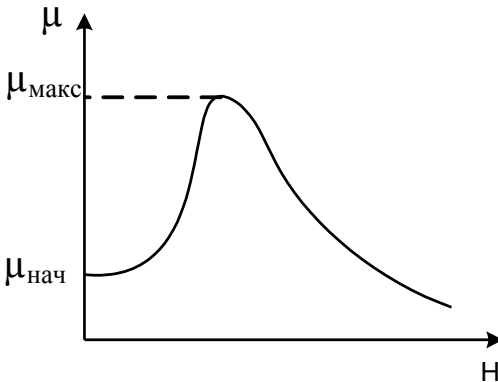


Рис. 3. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля

Причинами гистерезиса являются необратимые смещения границ доменов, необратимые процессы поворота магнитных моментов некоторых доменов и задержка роста зародышей перемагничивания. Под ними понимают небольшие объемы вещества с самопроизвольной намагниченностью обратного направления по отношению к основной ориентации намагниченности образца. Основными параметрами петли гистерезиса являются индукция

насыщения B_s ($B_{\max}$), остаточная индукция B_r , коэрцитивная сила H_c и площадь петли, характеризующая удельные потери на гистерезис за один цикл перемагничивания. Остаточной индукцией называют индукцию, которая остается в предварительно намагниченном образце после снятия внешнего поля. Коэрцитивная сила – напряженность размагничивающего поля, которое должно быть приложено к предварительно намагниченному образцу для уменьшения его магнитной индукции до нуля. Форма петли гистерезиса характеризует процессы, происходящие в ферромагнетике. При относительно небольших затра-

Таким образом, зависимость магнитной индукции от напряженности поля у ферромагнитного материала достаточно сложная и не может быть выражена простой расчетной формулой. Поэтому при расчете магнитных цепей, содержащих ферромагнетики, применяют снятые экспериментально кривые намагничивания $B(H)$ магнитных материалов. Кривая намагничивания впервые была получена экспериментально в 1872 году профессором Московского университета А.Г.Столетовым. На рис. 3 показана зависимость магнитной проницаемости от величины напряженности внешнего магнитного поля

1.4. Процесс перемагничивания ферромагнетиков

Рассмотрим процесс перемагничивания ферромагнетиков. Допустим, что замкнутый магнитопровод из ферромагнитного материала не намагничен и тока в витках катушки нет, т.е. $B=0$ и $H=0$ (начало координат на рис. 1). При постепенном увеличении намагничивающего тока, а следовательно, и напряженности поля от нуля до некоторого наибольшего значения магнитная индукция увеличивается по кривой начального намагничивания (Oa) и достигает соответствующего максимального значения B_a (рис. 1). Если затем ток и напряженность магнитного поля уменьшаются, то и магнитная индукция уменьшается, при соответствующих значениях напряженности магнитная индукция несколько больше, чем при увеличении напряженности. Кривая изменения магнитной индукции (участок ab на рис. 1) располагается выше кривой начального намагничивания. При нулевых значениях тока и напряженности поля магнитная индукция имеет некоторое значение B_r , называемое **остаточной индукцией** (отрезок Ob на рис. 1).

Таким образом, магнитная индукция в ферромагнитном материале зависит не только от напряженности поля, но и от предшествующего состояния ферромагнетика. Это явление называется **гистерезисом**. Оно обусловлено как бы «внутренним трением», возникающим при изменении ориентации магнитных моментов доменов. При изменении направления намагничивающего тока, а следовательно, и направления напряженности магнитного поля и постепенном увеличении тока обратного направления напряженность поля достигает значения H_c , называемого **коэрцитивной силой** (отрезок Oe), при котором магнитная индукция $B=0$. При дальнейшем увеличении тока и напряженности поля магнитопровод намагничивается в противоположном направлении, и при напряженности поля $H_c = -H_a$ магнитная индукция достигнет значения $B_c = -B_a$. Затем при уменьшении тока и напряженности поля до нуля магнитная индукция B_0 становится равной $-B_0$. Наконец, при следующем изменении направления тока и напряженности

поля и увеличении ее до прежнего значения H_a магнитная индукция увеличится также до прежнего значения B_a .

Рассмотренный цикл перемагничивания ферромагнетика по кривой *абвгдеа* называется **гистерезисным циклом** (*петлей гистерезиса*). Такая симметричная замкнутая петля гистерезиса (рис. 2) получается в действительности только после нескольких перемагничиваний с увеличением напряженности магнитного поля до максимального значения. При первых циклах перемагничивания петля несимметричная и незамкнутая. Наибольшая замкнутая петля, которая может быть получена для данного ферромагнитного материала, называется *предельной* (рис. 2). При напряженности поля $H > H_{max}$ получается уже безгистерезисный участок кривой $B(H)$.

Если для данного ферромагнитного материала, выбирая различные наибольшие значения напряженности магнитного поля, получить несколько симметричных петель гистерезиса (рис. 2) и соединить вершины петель, то получим кривую, называемую **основной кривой намагничивания**, близкую к кривой начального намагничивания. Циклическое перемагничивание можно применить для размагничивания магнитопровода, т.е. для уменьшения остаточной индукции до нулевого значения. С этой целью магнитопровод подвергают воздействию изменяющегося по направлению и постепенно уменьшающегося магнитного поля.

1.5. Магнитная проницаемость

Магнитную проницаемость вещества разделяют на абсолютную

$$\mu_a = \frac{B}{H}$$

и относительную (в дальнейшем слово относительная будем опускать)

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}.$$

Подставляя в эти соотношения конкретные значения B и H , получают различные виды магнитной проницаемости, которые применяют в технике (свыше нескольких десятков).

Наиболее часто используют понятия магнитной проницаемости начальной $\mu_{нач}$, максимальной $\mu_{макс}$, эффективной $\mu_{эф}$ и дифференциальной $\mu_{диф}$. Для точки A рис. 4 магнитная проницаемость μ определяется как тангенс угла наклона секущей OA к оси абсцисс, т. е.

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha = \frac{B_A}{\mu_0 H_A}.$$

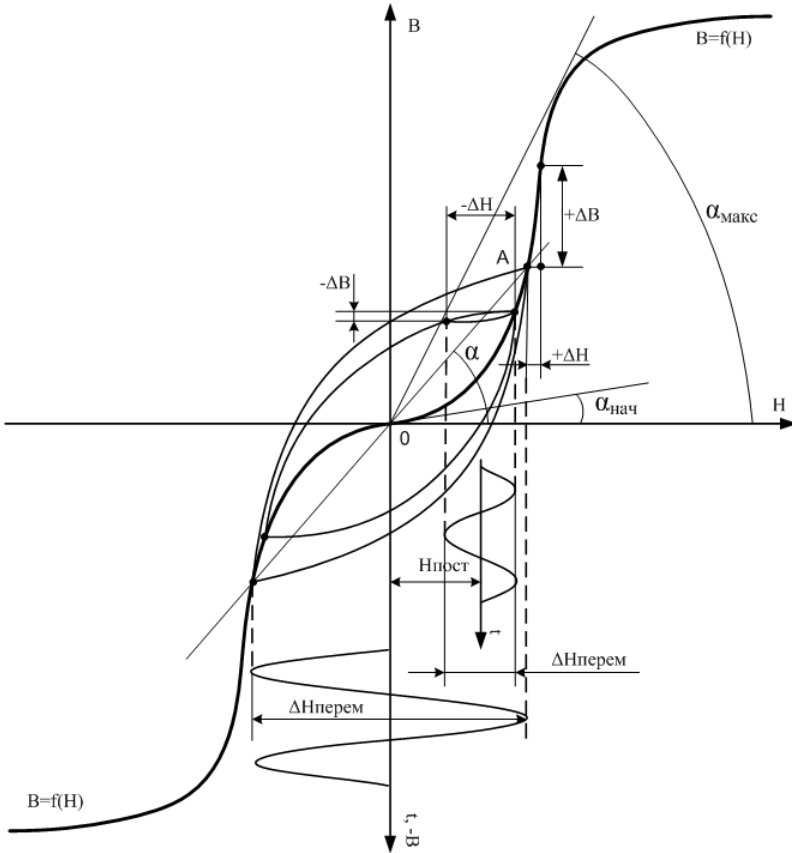


Рис. 4. Определение различных видов магнитной проницаемости

Это эквивалентно воздействию на магнитный материал синусоидального переменного магнитного поля величиной $\Delta H_{\text{перем}}$ без постоянной составляющей (рис. 4). В некоторых случаях такую проницаемость называют *эффективной*.

Начальная и максимальная проницаемости представляют собой частные случаи магнитной проницаемости вещества:

$$\mu_{\text{нач}} = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 H} = \text{tg} \alpha_{\text{нач}} ;$$

$$\mu_{\max} = \frac{B_{\mu_{\max}}}{\mu_0 H_{\mu_{\max}}} = \operatorname{tg} \alpha_{\max},$$

т. е. наклон касательной на начальном участке кривой $B = f(H)$ характеризует начальную проницаемость, а наклон прямой, проведенной из начала координат в точку верхнего перегиба кривой, соответствует максимальному значению магнитной проницаемости.

Дифференциальную проницаемость $\mu_{\text{диф}}$ определяют как производную от магнитной индукции по напряженности магнитного поля для любой точки кривой намагничивания, т.е. она представляет собой тангенс угла наклона между осью абсцисс и касательной к кривой намагничивания в этой точке. Этот угол примерно будет соответствовать углу прямой, проведенной через две точки малого гистерезисного цикла при одновременном воздействии на образец постоянного $H_{\text{пост}}$ и переменного $\Delta H_{\text{перем}}$ магнитного полей (рис. 4) при условии, что выполняется соотношение $\Delta H_{\text{перем}} \ll H_{\text{пост}}$.

Как видно из графиков, магнитная проницаемость с ростом напряженности поля изменяется в весьма широких границах, что затрудняет ее применение для расчетов. На кривой $\mu = f(H)$ (рис. 3) отмечают два характерных значения магнитной проницаемости: начальная – $\mu_{\text{нач}}$ и максимальная – $\mu_{\text{макс}}$.

Начальная магнитная проницаемость характеризует возможность использования ферромагнетика в слабых магнитных полях. Максимальная магнитная проницаемость определяет верхнюю границу использования материала. Так, например, типичные значения магнитной проницаемости для листовой электротехнической стали $\mu_{\text{нач}} = 250 - 1000$, а $\mu_{\text{макс}} = 500 - 30000$.

1.6. Потери в магнитных материалах

При намагничивании магнитного материала переменным полем в нем возникают потери энергии, приводящие к нагреву материала. Петля гистерезиса, характеризующая затраты энергии за один цикл перемagnetивания, расширяется (увеличивает свою площадь) за счет возникновения различного вида потерь.

Потери на гистерезис P_H , отнесенные к единице объема материала (удельные потери) определяют по формуле

$$P_H = f \oint \frac{HdB}{\gamma},$$

где γ – плотность материала в кг/м^3 , f – частота в Гц.

Наряду с потерями на гистерезис P_H возникают и другие потери в магнитных материалах: *потери на вихревые токи* P_B и *дополнитель-*

ные потери P_D . Петлю гистерезиса на переменном поле называют динамической, а сумму составляющих потерь — полными или суммарными потерями.

Потери на вихревые токи зависят не только от магнитных, но также и от электрических свойств материала (удельного электрического сопротивления) и формы сердечника. Для листового образца потери P_B можно найти из выражения

$$P_B = \frac{164 d^2 f^2 B_{\text{макс}}^2 \eta}{\gamma \rho},$$

где $B_{\text{макс}}$ — амплитуда магнитной индукции, Тл;

f — частота переменного тока, Гц;

d — толщина листа, м;

γ — плотность материала в кг/м³;

ρ — удельное электросопротивление, Ом·м,

η — коэффициент формы.

Дополнительные потери нельзя рассчитать аналитически, их определяют обычно как разность между полными потерями и суммой потерь на гистерезис и вихревые токи:

$$P_D = P - (P_H + P_B).$$

2. Выполнение лабораторной работы

Испытание ферромагнитных материалов производится на установке, обобщенная схема которой приведена на рис. 5. Здесь M — испытываемый образец из ферромагнитного материала; R_0 — образцовое сопротивление; r и C — сопротивление и конденсатор фазовращательной цепочки. Соответственно 2 и 3 — горизонтальный и 3 — 4 вертикальный входы осциллографа или графопостроителя, 4 — 1 — вход сигнала с генератора. Отклонение луча осциллографа по горизонтали пропорционально падению напряжения на R_0 , которое, в свою очередь, пропорционально величине намагничивающего тока и, следовательно,

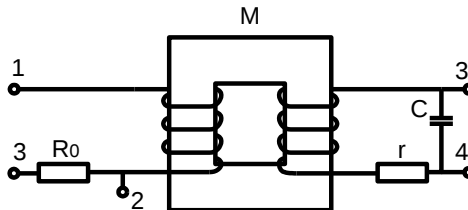


Рис. 5. Схема установки для испытания ферромагнитных материалов в переменных магнитных полях

работы и кнопок управления, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, применяемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора материалов, как показано на рис. 6, б.

Выбор материала осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием материала. На закладке представлено описание и некоторые характеристики выбранного магнитного материала. После щелчка по кнопке «К измерениям» программа переключается на режим измерения параметров магнитного материала по параметрам петли гистерезиса. На экране отображается окно специализированного измерительного стенда, как показано на рис. 7.

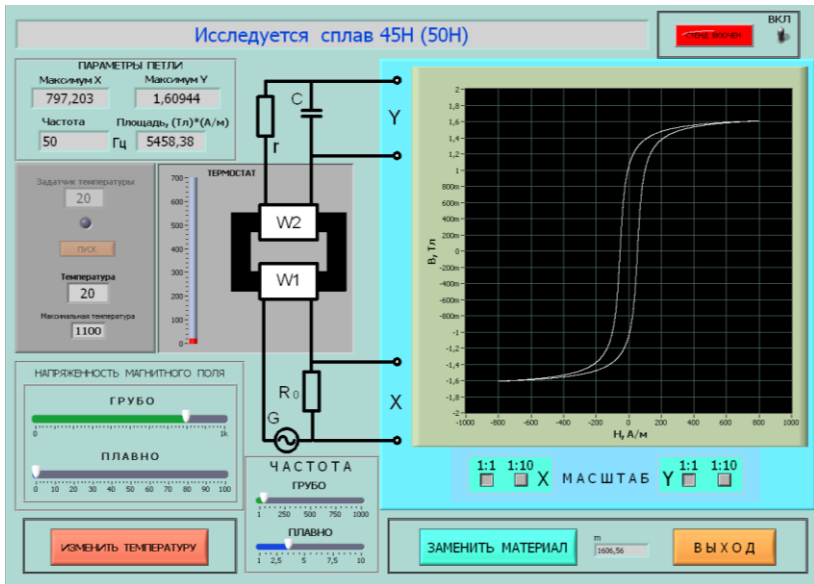


Рис. 7. Окно измерительного стенда

2.1. Проведение измерений

В окне измерительного стенда отображаются осциллограф, измерительная камера с образцом магнитного материала и элементы управления стендом. Здесь же отображается схема подключения исследуемого образца материала и основные параметры петли гистерезиса.

Необходимо включить стенд щелчком по тумблеру «Вкл». По умолчанию в измерительной камере установлена температура 20°C . Измерение параметров материала необходимо производить в следующей последовательности.

1. Установить необходимую частоту генератора, используя движок на шкале грубого и плавного изменения частоты (обычно 1 Гц).
2. Изменяя напряженность магнитного поля, движками «Грубо» и «Плавно», получить на графопостроителе нужный вид петли гистерезиса. В левом верхнем углу при этом отображаются координаты максимальных значений частной петли, ее площадь и частота изменения внешнего магнитного поля. Для изменения масштаба отображения петли гистерезиса можно использовать соответствующие кнопки на графопостроителе.
3. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру» и в окно «Задатчик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере и продолжить измерения.
4. Изменяя значение напряженности внешнего магнитного поля, вновь произвести соответствующие измерения параметров петли гистерезиса. При необходимости изменить частоту и температуру в соответствии с пунктами 1 и 3 данного раздела.
5. При необходимости выбрать другой магнитный материал, используя кнопку «Заменить материал».

3. Последовательность выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на исследование конкретного магнитного материала в указанном диапазоне температур и частот.
2. Построить начальную кривую намагниченности на частоте 1 Гц при температуре 20 °С. Для этого установить нужную частоту внешнего магнитного поля и, постепенно увеличивая его напряженность, занести значение координат В и Н в таблицу, пример которой показан ниже. По координатам конечных точек петли гистерезиса рассчитать относительную магнитную проницаемость μ .

Н, А/м				
В, Тл				
μ				

Построить график зависимости $B = f(H)$. Построить график зависимости относительной магнитной проницаемости от величины напряженности магнитного поля, используя соотношение $\mu = B/(\mu_0 H)$. Используя кнопки изменения масштаба на графопостроителе, определить значение коэрцитивной силы H_C для исследуемого материала при максимальном значении напряженности магнитного поля.

3. Исследовать зависимость относительной магнитной проницаемости материала от частоты внешнего магнитного поля. Для этого установить значение индукции по указанию преподавателя (не более 0,5 от индукции насыщения образца). Изменяя частоту и поддерживая постоянное значение B изменением H , занести данные в таблицу, пример которой показан ниже.

$F, \text{Гц}$				
$H, \text{А/м}$				
$B, \text{Тл}$				

Построить график изменения относительной магнитной проницаемости от частоты.

4. Исследовать потери в материале от частоты магнитного поля. Для этого устанавливать и поддерживать постоянным, при изменении частоты, значение индукции магнитного поля по указанию преподавателя (не более 0,5 от индукции насыщения образца). Изменять частоту и занести полученные значения площади гистерезисной кривой в таблицу, пример которой показан ниже.

$F, \text{Гц}$				
$S, (\text{Тл} \cdot \text{А/м})$				

Рассчитать удельные потери в образце и построить график удельных потерь в материале от частоты. Удельные потери (Вт/кг) определяют делением площади петли гистерезиса на плотность вещества с учетом частоты изменения магнитного поля (раздел 1.6.).

5. Исследовать зависимость относительной магнитной проницаемости материала от температуры на частоте 1 Гц. Для этого установить значение индукции по указанию преподавателя (не более 0,5 от индукции насыщения образца) и поддерживать ее неизменной. Изменять температуру в соответствии с пунктом 3 раздела 2.1 методического указания и занести полученные значения координат B и H в таблицу, пример которой показан ниже.

$T, ^\circ\text{C}$				
$H, \text{А/м}$				
$B, \text{Тл}$				
μ				

Построить график изменения относительной магнитной проницаемости μ от температуры.

4. Содержание отчета

1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.
2. Отчет должен содержать:
 - название работы;
 - цель работы;
 - основные теоретические сведения;
 - схемы измерения;
 - полученные расчетные данные;
 - необходимые графики, требуемые по заданию.

5. Контрольные вопросы

1. Назовите основные физические величины, характеризующие магнитные поля в вакууме и веществе.
2. Чем отличаются диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики?
3. Что такое «домен» ферромагнитного материала?
4. Объясните кривую намагничивания ферромагнетиков.
5. Чем объясняется техническое насыщение величины индукции в ферромагнитном материале?
6. Что такое «коэрцитивная» сила и «остаточная индукция»?
7. Как получается петля гистерезиса ферромагнитного материала?
8. Что такое частные гистерезисные циклы и как строится начальная кривая намагниченности?
9. Как относительная магнитная проницаемость зависит от величины напряженности магнитного поля?
10. Как относительная магнитная проницаемость зависит от частоты изменения напряженности магнитного поля?
11. Как относительная магнитная проницаемость зависит от температуры?
12. Что такое эффективная магнитная проницаемость и как она определяется?
13. Что такое реверсивная магнитная проницаемость и как она определяется?
14. Как определяется статическая и динамическая магнитные проницаемости?
15. Какие виды потерь различают в магнитных материалах и как они определяются?

Библиографический список

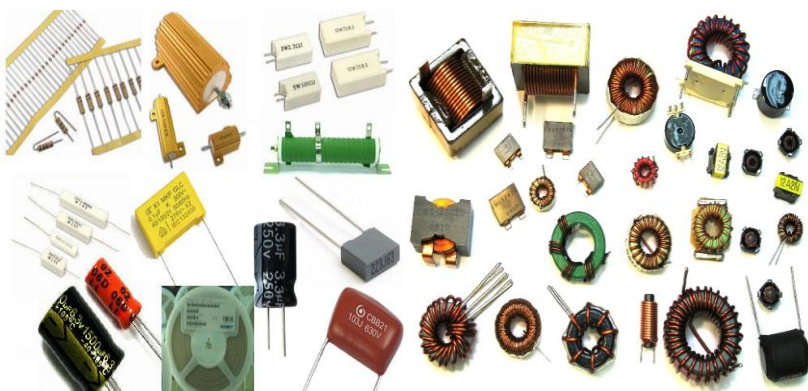
1. Покровский Ф.Н. Материалы и компоненты радиоэлектронных средств: учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 350 с.
2. Пасынков В.В. Материалы электронной техники: учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1980. – 406 с.
3. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы: учебник для вузов. 7-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 304 с.
4. Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы. Изд. 2-е, перераб. и доп. Учебник для специальности «Полупроводники и диэлектрики» вузов. М.: Высш. школа, 1976. – 336 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

В таблице представлены параметры удельных потерь различных марок стали при промышленной частоте 50 Гц и магнитной индукции стали в сильных полях

Марка	Толщина листа или ленты, мм	Удельные потери Вт/кг, не более, при индукции, Тл, равной	
		1,0	1,5
1211	1,0	5,8	13,4
	0,5	3,3	7,7
1213	1,0	4,7	10,7
	0,65	3,2	7,5
	0,5	2,8	6,5
1411	0,5	2,0	4,4
	0,35	1,6	3,6
1511	0,5	1,55	3,5
	0,35	1,35	3,0
2011	0,65	3,8	9,0
	0,5	3,5	8,0
2111	0,65	4,3	10,0
	0,5	3,5	8,5
2311	0,65	2,5	5,8
	0,5	1,9	4,4

Методические указания к лабораторным работам



УДК 621.39

Материалы и компоненты радиоэлектронных средств: методические указания к лабораторным работам /Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: С.И. Мальченко, В.Г. Мишустин, В.Н. Тимофеев. Рязань, 2012. 84 с.

Рассматриваются лабораторные работы по курсу «Материалы и компоненты радиоэлектронных средств».

Предназначены студентам специальностей 140400, 200100, 201000, 210100 210400, 211000.

Табл. 13. Ил. 39. Библиогр.: 6 назв.

Сопротивление диэлектриков, энергия активации, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла потерь, конденсатор, катушка индуктивности, электрическая прочность

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра биомедицинской и полупроводниковой электроники Рязанского государственного радиотехнического университета (зав. кафедрой проф. С.П. Вихров)

Материалы и компоненты радиоэлектронных средств

Составители: М а л ь ч е н к о Сергей Иосифович
М и ш у с т и н Владислав Геннадьевич
Т и м о ф е е в Владимир Николаевич

Редактор Р.К. Мангутова

Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 18.06.12. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 5,25.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: изучение методов измерения сопротивления твердых диэлектриков и исследование температурной зависимости их удельного сопротивления.

1. Основные теоретические сведения

1.1. Электропроводность диэлектриков

Необходимым условием наличия электропроводности у любого вещества является существование в нем свободных *заряженных материальных частиц* — носителей зарядов. При наличии электрического поля на каждый носитель тока действует электродвижущая сила E . При этом плотность тока J равна

$$J = n \cdot q \cdot v, \quad (1)$$

где n - концентрация зарядов в данном объеме;

q - величина заряда;

v - скорость движения заряда.

Окончательно электропроводность γ можно определить как

$$\gamma = n \cdot q \cdot \frac{v}{E}. \quad (2)$$

Отношение v/E , определяющее скорость при напряженности поля, равной единице, называют *подвижностью* носителей и обычно обозначают буквой μ .

В диэлектриках можно выделить следующие виды электропроводности.

1. **Электронная электропроводность** характеризуется перемещением электронов под действием поля. Помимо металлов, ее обнаруживают у углерода, некоторых соединений металлов с кислородом, серой и другими веществами и у многих полупроводников. При электронной электропроводности отсутствует видимый перенос вещества с током.

2. **Ионная электропроводность** обуславливается движением ионов. Ее наблюдают у электролитов - растворов и расплавов солей, кислот, щелочей и подобных соединений, а также у многих диэлектриков. Ионы создаются электролитической диссоциацией, т. е. расщеплением молекул веществ на две части: катионы (+) и анионы (-). При движении ионов в электрическом поле имеет место электролиз, т. е. видимый перенос вещества и образование вблизи электродов новых химических веществ. Количество перенесенного с током вещества про-

порционально количеству прошедшего через вещество электрического тока, в соответствии с известными законами Фарадея. Общая проводимость вещества равна сумме анионной и катионной электропроводности.

3. **Молионная электропроводность** обусловлена движением заряженных частиц – молионов (целых сгустков молекул). Наблюдают ее в коллоидных системах, в которых дисперсионная фаза взвешена в дисперсионной среде. Заряженные частицы дисперсионной фазы называют *молионами*. Движение молионов под действием электрического поля называют *электрофорезом*. Большое влияние на электропроводность жидких, а также аморфных вязких материалов (смолы, компаунды) оказывает вязкость вещества.

1.1.1. Электропроводность газов

Газы при небольших значениях напряженности электрического поля обладают исключительно малой проводимостью. Ток в газах может возникнуть только при наличии в них ионов или свободных электронов. Ионизация нейтральных молекул газа возникает либо под действием внешних факторов, либо вследствие соударений заряженных частиц с молекулами. Внешними факторами, вызывающими ионизацию газа, являются коротковолновые воздействия (космическое, рентгеновское, радиоактивное излучение), а также тепловое воздействие. Электропроводность газа, обусловленную действием внешних ионизаторов, называют *несамостоятельной*, а обусловленную ударной ионизацией – *самостоятельной* электропроводностью.

В слабых полях ударная ионизация отсутствует и самостоятельной проводимости не обнаруживается. При ионизации газа одновременно происходит соединение положительных ионов и отрицательных электронов в нейтральные молекулы. Этот процесс носит название *рекомбинация* и препятствует безграничному росту числа ионов. Это означает, что условие равновесия заключается в равенстве числа вновь образующихся ионов числу рекомбинирующих ионов.

Предположим, что ионизированный газ находится между двумя плоскими параллельными электродами, к которым приложено электрическое напряжение. Ионы и электроны под влиянием напряжения будут перемещаться, и в цепи возникнет ток. Часть ионов будет нейтрализоваться на электродах, часть исчезнет за счет рекомбинации. Увеличение напряжения между электродами приведет к тому, что большая часть не рекомбинированных носителей заряда будет достигать электродов и увеличивать ток в цепи за счет увеличения скорости их перемещения. Причем чем больше будет величина поля, тем больше носителей заряда будет достигать электродов и не успевать рекомбинировать. Плотность тока в этом случае (при относительно слабых напряженностях поля) будет про-

порциональна напряженности поля, т. е. выполняется закон Ома.

При больших напряженностях поля наступит момент, когда все свободные носители заряда из-за высокой скорости движения будут достигать электродов, так и не успевая рекомбинировать. Поскольку количество свободных носителей, возникающих в газе в единицу времени, неизменно, то ток в цепи, при изменении напряженности поля перестанет изменяться. Такой ток называют *током насыщения*.

На рис. 1 показан характер зависимости тока от напряжения в газах. Начальный участок кривой до напряжения U_H соответствует выполнению закона Ома. По мере возрастания величины приложенного напряжения ионы переносятся к электродам, не успевая рекомбинировать, и при некотором напряжении U_H все ионы, создаваемые в газовом промежутке, будут разряжаться на электродах. Дальнейшее увеличение напряжения уже не будет вызывать возрастания тока, что соответствует горизонтальному участку кривой рис. 1 (ток насыщения при напряжениях от U_H до $U_{кр}$). Ток насыщения для воздуха в нормальных условиях, влажности и расстояния между электродами 1 см наблюдается при напряженностях поля около 0,6 В/м.

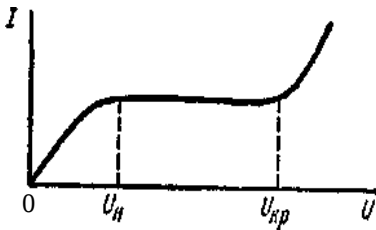


Рис. 1. Зависимость тока в воздушном зазоре от напряжения

Плотность тока насыщения в воздухе весьма мала и составляет величину порядка 10^{-15} А/м². Поэтому воздух можно рассматривать как совершенный диэлектрик до тех пор, пока не создадутся условия для появления ударной ионизации. Ток при увеличении напряжения остается постоянным, пока ионизация осуществляется под действием внешних факторов. При

возникновении ударной ионизации появляется самостоятельная электропроводность (выше $U_{кр}$ на рис. 1) и ток вновь начинает увеличиваться с возрастанием напряжения.

1.1.2. Электропроводность жидкостей

Электропроводность жидких диэлектриков тесно связана со строением молекул жидкости. В нейтральных жидкостях электропроводность определяется наличием диссоциированных примесей, в том числе влаги. В полярных жидкостях электропроводность зависит не только от примесей, иногда она вызывается диссоциацией молекул самой жидкости. Электропроводность жидкостей носит в основном ионный характер. Ионная электропроводность подразделяется на *собственную* и *примесную*.

Собственная электропроводность обусловлена движением ионов, получаемых от частичной диссоциации молекул жидкости. Полярные жидкости, как правило, сильнее диссоциированы и имеют большую электропроводность, чем неполярные. В неполярных и слабополярных жидких диэлектриках (минеральные масла, кремнийорганические, полиизобутиленовые и другие жидкости) электропроводность в основном определяется примесями и не является характерной для данного диэлектрика.

При тепловых колебаниях молекула в некоторых случаях получает достаточную кинетическую энергию для отрыва от соседней молекулы и приобретает поступательное движение. Направление этих перемещений беспорядочно. Однако если молекула имеет электрический заряд, то при приложении электрического поля к жидкости она начинает направленное движение и участвует в проводимости.

В нейтральных жидкостях их электропроводность зависит от наличия диссоциированных примесей (*примесная электропроводность*), в том числе от влаги; в полярных - еще и от диссоциации молекул самой жидкости. Ток в жидкости обуславливается перемещением ионов и молионов. Наблюдается зависимость роста удельной проводимости γ жидких диэлектриков от температуры. Это связано с ростом количества свободных носителей заряда в жидкости за счет увеличения энергии частиц жидкости. Уменьшение вязкости жидкости с увеличением температуры увеличивает подвижность ионов и других заряженных частиц и также способствует увеличению проводимости. Увеличение температуры также способствует активизации явления диссоциации молекул жидкости.

1.1.3. Объемная электропроводность твердых диэлектриков

Твердые диэлектрики предназначены в основном для электрической изоляции различных узлов РЭА. По самому своему назначению электроизоляционные материалы совершенно не должны пропускать электрический ток под действием приложенного электрического напряжения, т. е. они должны быть диэлектриками. Однако «идеальных» диэлектриков не существует и все практически применяемые электроизоляционные материалы при приложении напряжения все же пропускают некоторый, обычно весьма незначительный, ток.

Это обусловлено наличием в технических диэлектриках небольшого числа свободных носителей электрических зарядов, а также инжекцией зарядов из электродов. Такие токи принято называть токами сквозной электропроводности, или токами утечки.

Наряду с токами сквозной электропроводности в диэлектрике могут появляться и токи смещения. Упругое смещение (т.е. смещение на небольшое расстояние и возврат в исходное положение после снятия

электрического поля) любых связанных зарядов в веществе под действием электрического поля до момента установления и получения равновесного состояния обуславливает появление поляризационных токов, или токов смещения в диэлектриках. Токи смещения упруго связанных зарядов при электронной и ионной поляризациях настолько кратковременны, что их обычно не удается зафиксировать прибором. Токи же, вызванные замедленными видами поляризации, могут быть зафиксированы у многих технических диэлектриков и называются абсорбционными токами.

При постоянном напряжении абсорбционные токи, меняя свое направление, протекают только в моменты включения и выключения напряжения; при переменном напряжении они имеют место в течение всего времени нахождения материала в электрическом поле. Таким образом, полная плотность тока в диэлектрике представляет собой сумму плотностей токов утечки и смещения:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_{\text{УТ}} + \mathbf{J}_{\text{СМ}}. \quad (3)$$

Плотность тока смещения определяется скоростью изменения вектора электрического смещения (индукции) $\mathbf{D}$:

$$\mathbf{J}_{\text{СМ}} = d\mathbf{D}/dt = \mathbf{J}_{\text{АБ}}. \quad (4)$$

Поляризационные токи (токи смещения или абсорбционные токи) необходимо принимать во внимание при измерениях проводимости диэлектриков, потому что при небольшой выдержке образца диэлектрика под напряжением обычно регистрируется не только ток утечки, но и сопровождающий его обратимый ток, т.е. ток абсорбции. Вследствие этого может создаться неправильное представление о большой проводимости диэлектрика. Таким образом, проводимость диэлектрика при постоянном напряжении определяется по току утечки, который сопровождается выделением и нейтрализацией зарядов на электродах. При переменном напряжении активная проводимость определяется не только током утечки, но и активными составляющими поляризационных токов.

Поскольку измерение поляризационных токов даже при замедленных механизмах поляризации осуществить довольно трудно, сопротивление диэлектрика рассчитывают обычно как частное от деления напряжения на величину тока, измеренную через одну минуту после включения напряжения (т. е. учитывают только токи утечки в диэлектрике). Значение $R_{\text{УТ}}$ (или $R_{\text{ИЗ}}$) в некоторых случаях зависит не только от самого диэлектрика, но и от материала электродов. Особенностью электропроводности диэлектриков в большинстве случаев является ее неэлектронный (*ионный*) характер.

У твердых изоляционных материалов различают объемную и поверхностную электропроводности. Для сравнительной оценки объемной

и поверхностной электропроводности различных материалов используют понятие удельного объемного ρ_v и удельного поверхностного ρ_s сопротивлений.

Принимают, что ρ_v численно равно сопротивлению куба с ребром в 1 м, мысленно вырезанного из исследуемого материала, если ток проходит через две противоположные грани этого куба, при этом величина ρ_v выражается в Ом*м.

В случае плоского образца материала при однородном поле удельное объемное сопротивление рассчитывают по формуле

$$\rho_v = R_v \cdot \frac{S}{h}, \quad (5)$$

где R_v — объемное сопротивление, Ом;

S — площадь электрода, м²;

h — толщина образца, м.

Для того чтобы носитель заряда стал свободным, необходимо воздействовать на него некоторой энергией, которую обычно называют *энергией активации*. В процессе прохождения электрического тока через твердый диэлектрик содержащиеся в нем ионы примесей могут частично удаляться, выделяясь на электродах. Это с течением времени приводит к уменьшению проводимости и росту сопротивления диэлектрика.

В твердых диэлектриках ионного строения электропроводность обусловлена главным образом перемещением ионов, вырываемых из решетки под влиянием флуктуации теплового движения. При низких температурах передвигаются слабо закрепленные ионы, в частности ионы примесей. При высоких температурах движутся основные ионы кристаллической решетки. В диэлектриках с атомной или молекулярной решеткой электропроводность зависит от наличия примесей.

В каждом отдельном случае вопрос о механизме электропроводности решается на основании данных об энергии активации носителя заряда. Известно, например, что для каменной соли энергия активации ионов натрия при нормальной температуре составляет около 0,85 эВ. Энергия активации ионов хлора в три раза больше, а энергия активации электронов равна 6 эВ, тогда как средняя энергия теплового движения при комнатной температуре составляет всего лишь 0,025 эВ.

Подвижность электронов на много порядков больше, чем подвижность ионов; в двуокиси титана, например, подвижность электронов составляет около 10^{-4} м²/В*с, тогда как подвижность ионов в алюмосиликатной керамике всего лишь $10^{-13} - 10^{-16}$ м²/В*с. В связи с этим в диэлектрике с электронной электропроводностью концентрация электронов в $10^9 - 10^{12}$ раз меньше, чем концентрация носителей в диэлектрике с ионной электропроводностью при одинаковом заряде носителей и оди-

наковом значении удельной проводимости.

Известно, что при ионной электропроводности число диссоциированных ионов находится в экспоненциальной зависимости от температуры, и тогда проводимость может быть представлена следующей зависимостью:

$$\gamma = A \cdot e^{-\frac{b}{T}}, \quad (6)$$

где A и b – коэффициенты зависящие от параметров материала диэлектрика.

Если в диэлектрике электропроводность обусловлена носителями с различной энергией активации $\mathcal{E}_i$, то зависимость электропроводности от температуры может быть представлена в виде

$$\gamma = \sum A_i e^{-\frac{\mathcal{E}_i}{kT}}, \quad (7)$$

где k – постоянная Больцмана;

A_i – коэффициент, зависящий от параметров носителя заряда;

$\mathcal{E}_i$ – энергия активации носителя заряда.

В связи с этим кривые логарифмической зависимости удельной проводимости от температуры имеют изломы, как показано на рис. 2.

При низких температурах электропроводность обусловлена ионизированными примесями, при высоких температурах она становится собственной. В некоторых случаях излом кривой температурной зависимости логарифма удельной проводимости объясняется тем, что ионы основного вещества имеют различные энергии диссоциации.

Заменяя γ на $1/\rho$, получают выражение для зависимости удельного объемного сопротивления от температуры:

$$\rho = B \cdot e^{\frac{b}{T}}, \quad (8)$$

где B и b – постоянные, характеризующие данный материал.

Собственная электропроводность твердых тел и изменение ее от температуры определяются структурой вещества и его составом. В телах кристаллического строения с ионной решеткой электропроводность связана с валентностью ионов. Кристаллы с одновалентными ионами обладают большей удельной проводимостью, чем кристаллы с многовалентными ионами. Так, для кристалла NaCl удельная проводимость значительно больше, чем для кристаллов MgO или Al_2O_3 .

В большинстве кристаллов удельная проводимость неодинакова по разным осям. Например, в кварце удельная проводимость в направлении, параллельном главной оси, примерно в 1000 раз больше, чем в направлении, перпендикулярном к этой оси. Для многих ионных кристаллов и других диэлектриков коэффициент b в формулах (6) и (8) близок к величине 10^4 .

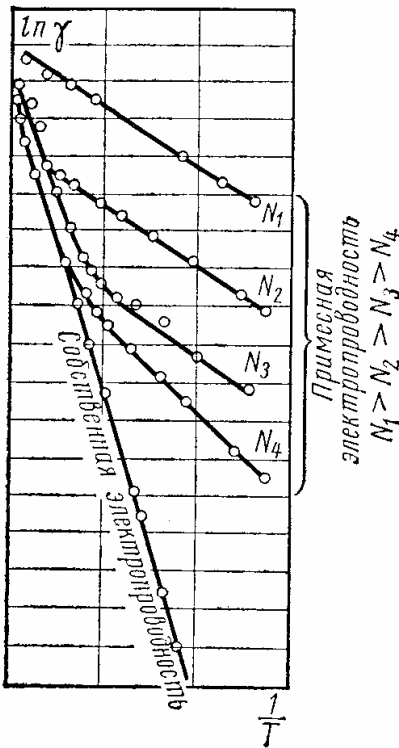


Рис. 2. Температурная зависимость удельной проводимости диэлектриков

В кристаллических телах с молекулярной решеткой (сера, полиэтилен, парафин) удельная проводимость мала и определяется в основном наличием примеси.

Величина удельной проводимости аморфных тел связана, прежде всего, с их составом. Высокомолекулярные органические полимеры обладают удельной проводимостью, зависящей в значительной степени от целого ряда факторов: от химического состава и наличия примесей, от степени полимеризации (например, для фенолформальдегидной смолы), от степени вулканизации (для эбонита). Органические нейтральные аморфные диэлектрики, как, например, полистирол, отличаются очень малой удельной проводимостью.

Большую группу аморфных тел составляют неорганические стекла. Удельная проводимость стекол зависит главным образом от химического состава; это дает возможность в ряде

случаев получать заранее заданную величину удельной проводимости.

Твердые пористые диэлектрики при наличии в них влаги, даже в ничтожных количествах, резко увеличивают свою удельную проводимость. Высушивание материалов повышает их электрическое сопротивление, но при нахождении высушенных материалов во влажной среде величина сопротивления вновь уменьшается.

Степень изменения электрических свойств материалов при увлажнении зависит не только от количества воды, проникшей в поры материала. В том случае, когда поглощенная влага способна образовывать нити или пленки по толщине изоляции, которые могут пронизывать весь промежуток между электродами (или значительную область этого промежутка), даже весьма малые количества поглощенной влаги приводят к

резкому ухудшению электрических свойств изоляции. Если же влага распределяется по объему материала в виде отдельных, не соединяющихся между собой малых включений, то влияние влаги на электрические свойства материала менее существенно.

Наиболее заметное снижение удельного объемного сопротивления под влиянием влажности наблюдается у пористых материалов, которые содержат растворимые в воде примеси, создающие электролиты с высокой проводимостью. В таких диэлектриках при нагревании влажного образца вначале величина ρ уменьшается за счет увеличения степени диссоциации примесей в водном растворе, затем идет удаление влаги - сушка и только при более высоких температурах наблюдается снижение ρ от температуры по законам, приведенным ранее.

Для уменьшения влагопоглощения и влагопроницаемости пористых изоляционных материалов широко применяется их *пропитка*. Необходимо иметь в виду, что пропитка целлюлозных волокнистых материалов и других пористых органических диэлектриков дает лишь замедление увлажнения материала, не влияя на величину ρ после длительного воздействия влажности. Это объясняется тем, что молекулы пропиточных материалов имеют весьма большие размеры по сравнению с размерами молекул воды и не в состоянии создать полную непроницаемость пор материала для влаги, а в наиболее мелкие поры они вообще не могут попасть.

При больших напряженностях электрического поля, близких к напряженностям электрического пробоя, необходимо учитывать возможность появления в твердых диэлектриках электронного тока, быстро возрастающего с увеличением напряженности поля, благодаря чему наблюдается отступление от закона Ома.

1.1.4. Поверхностная электропроводность твердых диэлектриков

Удельное поверхностное сопротивление ρ_s численно равно сопротивлению квадрата (любых размеров), мысленно выделенного на поверхности материала, если ток проходит через две противоположные стороны этого квадрата.

Полная проводимость твердого диэлектрика, соответствующая его сопротивлению $R_{из}$, складывается из объемной и поверхностной проводимостей (следовательно, учитываются объемное и поверхностное сопротивления). Удельное поверхностное сопротивление можно определить по формуле

$$\rho_s = R_s \cdot \frac{d}{h}, \quad (9)$$

где R_s - поверхностное сопротивление образца материала между парал-

тельно поставленными электродами шириной d , отстоящими друг от друга на расстоянии h .

Полное сопротивление изоляции $R_{из}$ твердого диэлектрика определяется как соединение параллельно включенных поверхностного R_s и объемного R_v сопротивлений. Поверхностная электропроводность чаще всего обусловлена присутствием влаги на поверхности диэлектрика. Вода, как известно, обладает значительной проводимостью. Достаточно наличия тончайшего слоя влаги на поверхности диэлектрика, чтобы обнаружить заметную проводимость, которая определяется в основном толщиной этого слоя.

Однако, поскольку сопротивление адсорбированной водяной пленки связано с природой материала, на поверхности которого она находится, удельную поверхностную проводимость обычно рассматривают как свойство самого диэлектрика. Адсорбция влаги на поверхности диэлектрика находится в тесной зависимости от относительной влажности окружающей среды. Поэтому величина относительной влажности является решающим фактором, определяющим значение удельной поверхностной проводимости диэлектрика. Особенно резкое увеличение поверхностной проводимости обычно наблюдается, когда величина относительной влажности превышает 50—60 %.

Удельная поверхностная проводимость тем ниже, чем меньше полярность вещества и чем чище поверхность диэлектрика. Причем присутствие загрязнений на поверхности относительно мало сказывается на удельной поверхностной проводимости гидрофобных диэлектриков и сильно влияет на проводимость гидрофильных диэлектриков.

В зависимости от пределов значений удельного поверхностного сопротивления, обусловленных взаимодействием с влагой, все материалы можно подразделить на несколько групп:

- 1) не растворимые в воде диэлектрики;
- 2) частично растворимые в воде диэлектрики;
- 3) диэлектрики, имеющие пористую структуру.

Не растворимые в воде диэлектрики делятся на две подгруппы:

- а) нейтральные и слабополярные - не смачиваемые водой (парафин, полистирол, янтарь, сера);
- б) дипольные и ионные - смачиваемые водой (канифоль, некоторые виды керамики и др.).

Все материалы подгруппы (а) характеризуются высоким удельным поверхностным сопротивлением, мало зависящим от влажности окружающей среды. Удельное поверхностное сопротивление у материалов подгруппы (б) во влажной среде ниже, чем у материалов подгруппы (а), но может быть и достаточно большим при полном отсутствии загрязнений на их поверхности.

Частично растворимые в воде диэлектрики. К этой группе относятся большинство технических стекол. Таким материалам свойственно более низкое удельное поверхностное сопротивление, в значительной мере зависящее от влажности.

Диэлектрики, имеющие пористую структуру. К этим диэлектрикам относятся волокнистые материалы (органические и неорганические), мрамор и большинство пластических масс. Благодаря пористой структуре во влажной среде эти материалы обнаруживают большую удельную поверхностную проводимость.

Для того чтобы повысить поверхностное сопротивление, применяют разнообразные приемы очистки поверхности - промывку водой, растворителями, прокаливание при температуре 600—700 °С.

Наиболее эффективной очисткой поверхности изделия, не впитывающего воду, является продолжительное кипячение в дистиллированной воде. Пропитка поверхностных слоев детали парафином или церезином не обеспечивает достаточной устойчивости значений ρ_s при высокой влажности. Это связано с возможностью проникновения влаги в микропоры, поверхности изделия из-за влагопроницаемости перечисленных защитных покрытий. Покрытие керамики и стекол кремнийорганическими лаками значительно повышает величину поверхностного сопротивления изделий во влажной среде.

Таким образом, зависимость удельного поверхностного сопротивления от влажности обусловлена наличием на поверхности диэлектрика гигроскопических и диссоциирующих на ионы веществ. Влага, адсорбируемая поверхностью, способствует появлению ионов из-за ее диссоциации. Если эти вещества случайно попали на поверхность диэлектрика, то после их удаления можно получить высокое удельное поверхностное сопротивление при любой влажности воздуха. Если эти вещества являются составной частью материала, то удельное поверхностное сопротивление будет сильно снижаться при увеличении влажности.

1.2. Измерение сопротивления диэлектриков

Для определения величины сопротивления диэлектрика обычно используют стандартный способ *амперметра-вольтметра*. Подавая на образец диэлектрика известное по величине напряжение, измеряют ток, протекающий в цепи диэлектрика, с помощью высокочувствительных измерителей тока. Типичные значения величин тока лежат в пределах $10^{-9} - 10^{-16}$ А. Приборы, измеряющие такие токи, обычно называют *пикоамперметрами* (*фемтоамперметрами*, *аттоамперметрами*). Сопротивление диэлектрика рассчитывается по закону Ома как

$$R = U/I. \quad (10)$$

Определение удельного объемного и удельного поверхностного

сопротивлений производится обычно на одном и том же образце, снабженном тремя электродами. Форма и расположение этих электродов для случая плоского образца диэлектрика показаны на рис. 3.

Верхний дисковый электрод А имеет диаметр d_1 , внутренний диаметр кольцевого электрода $d_2 = d_1 + 4$ мм. Таким образом, зазор между этими электродами составляет 4 мм. Нижний дисковый электрод С может иметь диаметр, примерно равный наружному диаметру кольцевого электрода или больше. При измерении объемного сопротивления образца следует пропускать ток сквозь толщу образца между верхним и нижним дисковыми электродами А и С, а при измерении поверхностного сопротивления - через поверхностный слой образца, расположенный в кольцевом зазоре между электродами А и В.

В принципе измерение этих сопротивлений образцов не представляет трудностей, однако на практике далеко не всегда является простым делом, так как вследствие большой величины удельных сопротивлений, особенно в случае высококачественных диэлектриков, в схеме протекают настолько слабые токи, что их измерение осуществляют особо точными приборами, как указано выше.

В настоящей работе измерение удельного сопротивления осуществляется с помощью цифрового аттоамперметра. Ток от источника напряжения пропускается сквозь толщу образца между нижним электродом и верхним дисковым электродом (так называемым измерительным электродом) и измеряется цифровым аттоамперметром.

Измеряемый ток является объемным током утечки, так как поверхностный ток утечки с электрода С не попадет на электрод А и “собирается” кольцевым электродом В, выполняющим роль охранного кольца, и далее отводится на землю, минуя измеритель тока (*пикоамперметр, фемтоамперметр, аттоамперметр*). Охранный электрод, имея практически тот же потенциал, что и измерительный электрод А, способствует устранению краевого эффекта у этого электрода и тем самым создает практически однородное электрическое поле в образце между электродами А и С. Зная величину приложенного к образцу на-

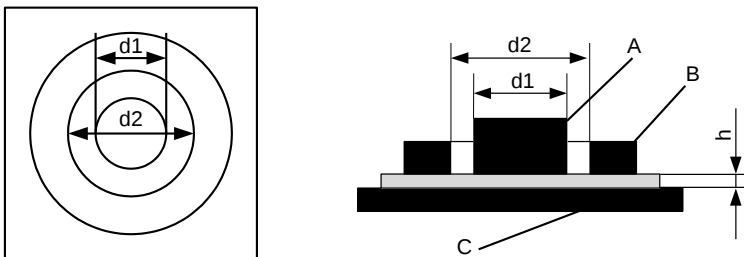


Рис. 3. Схема расположения электродов для измерения удельных сопротивлений плоского образца диэлектрика

пряжения U (в вольтах) и ток, протекающий через образец, можно определить объемное сопротивление образца R_v . Затем, используя формулу (5), можно рассчитать удельное объемное сопротивление диэлектрика.

При измерении поверхностного сопротивления электрод А опять является измерительным, т. е. остается соединенным с измерителем тока, в то время как другие электроды поменялись ролями. Кольцевой электрод В стал измерительным, а электрод С - охранным. При этом измеряется поверхностный ток в кольцевом зазоре между электродами А и В, а объемный ток утечки, который мог бы также проходить от электрода В к электроду А, отводится электродом С на землю и минует измеритель тока. Измерив напряжение U (в вольтах), приложенное к образцу, и поверхностный ток утечки, можно определить поверхностное сопротивление исследуемого диэлектрика.

Для круглых электродов связь между поверхностным сопротивлением образца R_s , удельным поверхностным сопротивлением диэлектрика ρ_s и размерами электродов d_1 и d_2 выражается следующим соотношением:

$$R_s = \rho_s \frac{d_2 - d_1}{\pi \cdot (d_2 - d_1)}, \quad (11)$$

где ρ_s измеряется в омах, а d_1 и d_2 - в любых одинаковых единицах длины.

Измеряя R_s и зная диаметры d_1 и d_2 , можно вычислить величину удельного поверхностного сопротивления испытуемого образца как

$$\rho_s = \frac{R_s \cdot \pi \cdot (d_2 + d_1)}{d_2 - d_1}. \quad (12)$$

2. Выполнение лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения удельного сопротивления диэлектрика специальной программой, выполняемой на персональном компьютере (ПК). В эту программу заложены модели изменения удельного сопротивления ряда диэлектриков в зависимости от изменения температуры окружающей среды и влажности воздуха. Измерение производится стандартным методом амперметра-вольтметра. При измерении сопротивления диэлектрика используется трехэлектродный метод, описанный ранее. Измеряются объемное сопротивление и поверхностное сопротивление, а затем по известным параметрам исследуемого материала и измерительных электродов рассчитываются удельное объемное и поверхностное сопротивления.

При подготовке к работе необходимо изучить методические ука-

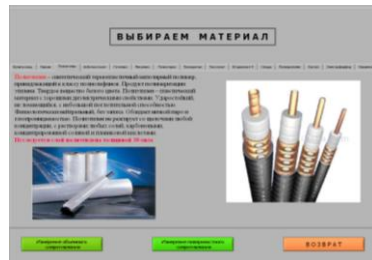
зания к лабораторной работе и затем получить у преподавателя задание. Для начала работы необходимо запустить файл «Сопротив_дизл» на Рабочем столе ПК, после чего появится окно, изображенное на рис.4,а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и некоторые интуитивно понятные элементы управления. Лабораторная работа состоит из двух частей. В **первой части** работы исследуются *удельное объемное сопротивление твердых диэлектриков* и его зависимость от температуры, а **во второй части** исследуется *удельное поверхностное сопротивление* в зависимости от температуры и влажности воздуха. Выбор конкретного вида измерения (объемное или поверхностное сопротивление) выбирается в окне выбора материала (рис.4,б) щелчком левой кнопки мыши по соответствующей кнопке.

2.1. Измерение объемного сопротивления диэлектрика

После щелчка по кнопке «Измерение объемного сопротивления» открывается окно измерения объемного сопротивления диэлектрика, показанное на рис. 5. В этом окне отображаются измерительные приборы и измерительная камера с образцом диэлектрика. Здесь же отображается схема подключения измерительных электродов.



а



б

Рис. 4. Внешний вид первого окна лабораторной работы (а) и окна выбора материала диэлектрика (б)

Необходимо включить приборы щелчком по тумблерам «Сеть». По умолчанию в виртуальной измерительной камере установлены температура 20°C и влажность 5 %. Если включены не все приборы и не установлено какое-либо напряжение, то отображается мигающая надпись «Включите приборы и установите напряжение».

Измерение сопротивления диэлектрика необходимо производить в следующей последовательности.

1. Установить необходимое напряжение источника питания, используя кнопки «Инкремент-декремент» рядом с цифровыми индикаторами на панели источника питания. Стрелочный прибор источника дублирует эти показания.

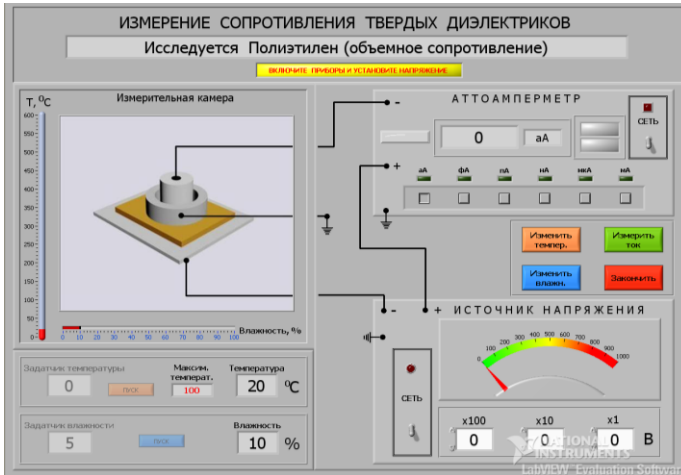


Рис. 5. Окно измерения объемного сопротивления диэлектрика

2. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру» и в окне «Задатчик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере. Считается, что объемное сопротивление диэлектрика от влажности воздуха не зависит.

3. Установить масштаб измерения тока прибором «Аттоамперметр», используя кнопки, расположенные под цифровым индикатором величины тока. Рекомендуется начинать с масштаба «нА» (10^{-9} А).

4. Щелкнуть по кнопке «Измерить ток». Через некоторое время на индикаторе отобразится величина тока через диэлектрик. Если моргает индикатор «Перегрузка», изменить масштаб аттоамперметра. Записать значение тока.

5. После проведения необходимого цикла измерений при данной температуре в измерительной камере изменить значение температуры в соответствии с п. 2 этого раздела.

6. Закончив полный цикл измерений объемного сопротивления диэлектрика, щелкнуть по кнопке «Закончить» и выбрать новый материал или режим измерения.

2.2. Измерение поверхностного сопротивления диэлектрика

После выбора режима измерения поверхностного сопротивления щелкнуть по кнопке «Изменить влажность», а в окно «Задатчик влаж-

ности» ввести с клавиатуры нужное значение влажности в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной влажности в измерительной камере и перейти к измерениям тока.

При необходимости изменять температуру в измерительной камере действовать, как указано в п. 2 раздела 2.1.

ВНИМАНИЕ! Процесс измерения поверхностного сопротивления диэлектрика ничем не отличается от измерения объемного сопротивления, но схема подключения измерительных электродов уже другая.

3. Последовательность выполнения работы

1. Исследовать зависимость объемного сопротивления диэлектрика от температуры в диапазоне температур, указанных преподавателем. Для каждого значения температуры в измерительной камере проводить не менее 5 – 7 измерений значений тока через диэлектрик и определять среднее значение. Процесс измерения тока занимает определенное время, т.к. при больших сопротивлениях диэлектрика необходимо несколько секунд для установления стационарного состояния при перезарядке паразитных емкостей измерительных электродов. Данные занести в таблицу по приведенному ниже примеру. При расчете объемного сопротивления R_V использовать формулу (10), а при расчете удельного объемного сопротивления использовать формулу (5). Диаметр верхнего электрода 5 см.

Диэлектрик – полипропилен							
Напряжение на диэлектрике 200 В							
$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$10^4/T$	$I_{\text{СРЕД}}$	Един. тока	$R_V, \text{Ом}$	$\rho_V, \text{Ом} \cdot \text{м}$	$\log(\rho_V)$

Построить зависимость $\log(\rho_V) = F(10^4/T)$. Аппроксимировать эту зависимость прямой и найти тангенс угла наклона как

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \log(\rho_V)}{\Delta \left(\frac{10^4}{T} \right)} \quad (13)$$

Рассчитать энергию активации примеси как

$$W = 8.625 \cdot 10^{-5} \cdot \operatorname{tg} \alpha, \text{ эВ}. \quad (14)$$

2. Исследовать зависимость поверхностного сопротивления диэлектрика от температуры в диапазоне температур и постоянной влажности, указанных преподавателем. Для каждого значения температуры в измерительной камере проводить не менее 5 – 7 измерений значений тока через диэлектрик и определять среднее значение. Данные занести

в таблицу по приведенному ниже примеру. При расчете поверхностного сопротивления R_s использовать формулу (10), а при расчете удельного поверхностного сопротивления использовать формулу (12). Диаметр верхнего электрода 5 см, а внутренний диаметр кольцевого электрода 5.4 см.

Диэлектрик - полипропилен							
Напряжение на диэлектрике 200 В							
t, °C	T, K	$10^4/T$	$I_{\text{СРЕД}}$	Един. тока	R_s , Ом	ρ_s , Ом	$\log(\rho_s)$

Построить зависимость $\log(\rho_s) = F(1/T)$. Аппроксимировать эту зависимость прямой и найти тангенс угла наклона как

$$tg \alpha = \frac{\Delta \log(\rho_s)}{\Delta \left(\frac{10^4}{T} \right)}$$

Рассчитать энергию активации примеси как

$$W = 8.625 \cdot 10^{-5} \cdot tg \alpha, \text{ эВ.}$$

3. Исследовать зависимость поверхностного сопротивления диэлектрика от влажности w при постоянной температуре, указанной преподавателем. Для каждого значения влажности в измерительной камере проводить не менее 5 – 7 измерений значений тока через диэлектрик и определять среднее значение. Данные занести в таблицу, по приведенному ниже примеру.

Диэлектрик - полипропилен				
Температура 20 °C				
Напряжение на диэлектрике 200 В				
w, %	$I_{\text{СРЕД}}$	Един. тока	R_s , Ом	ρ_s , Ом

Построить график $\rho_s = F(w)$.

4. Содержание отчета

4.1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.

4.2. Отчет должен содержать:

- название работы;
- цель работы;
- основные теоретические сведения;
- схемы измерения;
- полученные расчетные данные;

- необходимые графики, требуемые по заданию;
- сравнение полученных данных со справочными материалами;
- ссылку по ГОСТу на изученную справочную литературу.

5. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Что такое электропроводность вещества?
2. Назовите основные виды электропроводности диэлектриков.
3. Чем обусловлена электропроводность в газовых диэлектриках?
4. Нарисуйте и объясните график зависимости тока в газах от напряжения между электродами.
5. Что такое *ионизация* и *рекомбинация*?
6. Чем обусловлена электропроводность жидких диэлектриков?
7. Что такое объемное и поверхностное сопротивления твердых диэлектриков и в каких единицах они измеряются?
8. Что такое сопротивление изоляции твердых диэлектриков?
9. Что такое *энергия активации*?
10. Объясните характер температурной зависимости удельной проводимости диэлектриков.
11. Что такое *примесная* и *собственная* электропроводность твердых диэлектриков?
12. Чем обусловлено поверхностное сопротивление диэлектриков?
13. Как и почему влажность воздуха влияет на поверхностное сопротивление твердых диэлектриков?
14. Какие системы электродов и почему используют для измерения объемного и поверхностного сопротивления твердых диэлектриков?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: изучение методов измерения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь твердых диэлектриков резонансным методом, исследование температурной и частотной зависимости этих параметров.

1. Основные теоретические сведения

1.1. Поляризация диэлектриков

Одним из важных понятий при изучении поляризации диэлектриков является *электрический дипольный момент* (в дальнейшем просто

дипольный момент). Электрический дипольный момент определяется как совокупность двух равных по абсолютной величине разноимённых точечных электрических зарядов (это и есть диполь), находящихся на некотором расстоянии друг от друга. Основной характеристикой электрического диполя является его дипольный момент - вектор, направленный от отрицательного заряда к положительному (рис. 1) и численно равный произведению заряда q на расстояние l между зарядами: $p = ql$. Дипольный момент определяет электрическое поле диполя на большом расстоянии R от него ($R \gg l$), а также воздействие на диполь внешнего электрического поля.

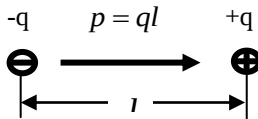


Рис. 1. Электрический диполь: заряды $-q$ и $+q$ на расстоянии l друг от друга. Дипольный момент $p = ql$ полностью определяет электрическое поле диполя на расстояниях $R \gg l$.

Действие внешнего электрического поля на диполь также пропорционально величине его дипольного момента. Однородное поле создаёт вращающий момент, стремящийся повернуть диполь так, чтобы его дипольный момент был направлен по полю. В неоднородном электрическом поле на диполь, кроме вращающего момента, действует также сила, стремящаяся втянуть его в область более сильного поля. Следует понимать, что если положительный и отрицательный заряды совпадают друг с другом (т.е. $l=0$), то электрическое поле будет отсутствовать.

Диэлектрики - это вещества, которые практически не проводят электрический ток. Поведение диэлектриков в электрическом поле определяется их внутренним строением. Как известно, мельчайшей частицей вещества, сохраняющей его химические свойства, является молекула. Молекулы состоят из атомов, в состав которых входят положительно заряженные ядра и отрицательно заряженные электроны. В целом молекулы электронейтральны. Согласно теории ковалентных связей устойчивость молекул достигается путем образования одной или нескольких пар электронов, которые становятся общими для соединяющихся атомов, т.е. одновременно входят в состав оболочек двух атомов.

Для каждого вида зарядов - положительных (ядер) и отрицательных (электронов) - можно найти такую точку, которая будет являться как бы их "электрическим центром тяжести". Эти точки называются *полюсами молекулы*. Если в молекуле электрические центры тяжести

положительных и отрицательных зарядов совпадут, то дипольный момент такой молекулы равен нулю, а следовательно, и электрическое поле, создаваемое этой молекулой, будет отсутствовать. Такую молекулу называют неполярной. Но если молекула построена несимметрично, например состоит из двух разнородных атомов, то общая пара электронов может быть в большей или меньшей степени смещена в сторону одного из атомов. Очевидно, что в этом случае, вследствие неравномерного распределения положительных и отрицательных зарядов внутри молекулы, их электрические центры тяжести не совпадут. Это приведет к возникновению дипольного момента молекулы и появлению электрического поля вокруг нее. Такие молекулы принято называть полярными.

Для описания макроскопических электрических свойств диэлектриков достаточно ограничиться представлением о том, что в них отсутствуют свободные носители заряда и при помещении диэлектрика в электрическое поле в материале возбуждается множество микроскопических диполей. В случае неполярных молекул это происходит путем смещения в пределах молекул их положительных зарядов в направле-

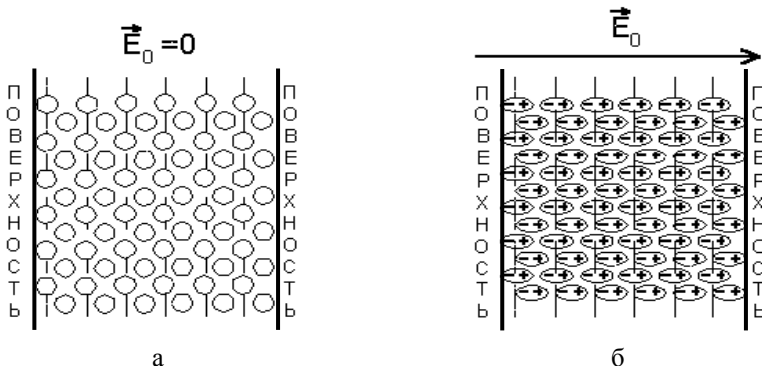


Рис. 2. Поляризация однородного диэлектрика с неполярными молекулами: (а – внешнее электрическое поле отсутствует; б – при воздействии внешнего электрического поля)

нии внешнего поля и отрицательных в противоположном направлении (рис. 2).

Приобретаемый молекулой дипольный момент пропорционален напряженности поля, в котором находится молекула. В системе СИ он записывается как:

$$p = \beta \epsilon_0 E, \quad (1)$$

где β – коэффициент пропорциональности, который называется *поляризуемостью молекулы*, а ϵ_0 – системная константа, называемая *абсо-*

лютой диэлектрической проницаемостью вакуума ($\epsilon_0 = 8,8510^{-12}$ Ф/м).

Для вещества, состоящего из полярных молекул, под действием момента сил происходит преимущественное выстраивание молекул в направлении внешнего поля (рис. 3).

В обоих случаях (неполярных и полярных молекул) в результате появляется дипольный момент и у всего объема диэлектрика. Средний дипольный момент, индуцированный полем в единице объема, называется поляризованностью диэлектрика:

$$P = \frac{1}{\Delta V} \cdot \sum_{\Delta V} p \quad , \quad (2)$$

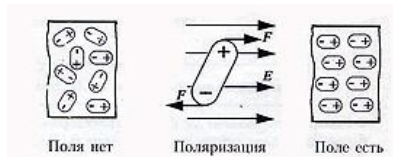


Рис. 3. Ориентация полярной молекулы в электрическом поле

где суммирование производится по всем молекулам, находящимся в объеме ΔV , а дипольный момент p каждой молекулы определяется суммированием по всем заряженным частицам, входящим в молекулу:

$$p = \sum_i e_i l_i \quad , \quad (3)$$

где e_i - заряд каждой частицы, а l_i - ее смещение под действием электрического поля.

Домножив и разделив правую часть выражения (3) на число молекул ΔN , находящихся в объеме ΔV , получим еще одно выражение для поляризованности:

$$p = n \langle p \rangle \quad , \quad (4)$$

где $n = \Delta N / \Delta V$ – концентрация молекул, а $\langle p \rangle$ - средний дипольный момент молекулы.

Вообще говоря, P меняется в диэлектрике от точки к точке, но для широкого класса веществ в каждой точке $P \sim E$. Существуют вещества, обладающие поляризованностью и в отсутствие внешнего поля. Поскольку в целом молекулы нейтральны, то именно дипольный момент и определяет электрическое поле, создаваемое самим материалом, когда его помещают во внешнее поле. В соответствии с принципом суперпозиции поле внутри диэлектрика есть сумма внешнего поля и поля от всех диполей, индуцированных в диэлектрике:

$$E = E_0 + E' \quad , \quad (5)$$

где E_0 - напряженность внешнего электрического поля, а E' – напряженность внутреннего электрического поля, созданного связанными

зарядами вещества диэлектрика. Связанными зарядами называются нескомпенсированные заряды, появляющиеся в результате поляризации молекул диэлектрика, тогда как сторонними – свободные заряды, находящиеся в диэлектрике или вне его. E_0 и E' представляют собой макрополя, т.е. усредненные по некоторому малому объему микрополя, создаваемые сторонними и связанными зарядами соответственно.

Так как каждая молекула поляризуется под воздействием как поля сторонних зарядов, так и поля, создаваемого всеми другими поляризованными молекулами, то поляризованность диэлектрика пропорциональна напряженности именно суммарного поля:

$$P = \kappa \epsilon_0 E, \quad (6)$$

где κ – диэлектрическая восприимчивость вещества.

При поляризации неоднородного диэлектрика (см. рис. 3) смещения зарядов внутри любого выбранного слоя внутри диэлектрика происходят таким образом, что количество связанного заряда, покидающего слой, равно заряду, входящему в него. Таким образом, объемный заряд внутри диэлектрика не образуется. В поверхностных же слоях образуется связанный поверхностный заряд. В случае же неоднородного диэлектрика в каждый слой, мысленно выделенный внутри материала, с одной стороны входит больше заряда, чем выходит с другой, и связанный заряд образуется не только на поверхности, но и в объеме диэлектрика, как это показано на рис. 4.

С учетом вышеперечисленных явлений можно дать определение поляризации и поляризованности диэлектрика.

Поляризация диэлектриков — это явление, связанное со смещением связанных зарядов в диэлектрике или поворотом дипольных (полярных) молекул под воздействием внешнего электрического поля.

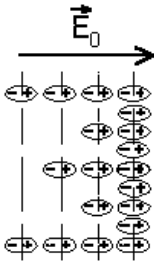


Рис. 4. Поляризация неоднородного диэлектрика

Поляризацию диэлектриков характеризует вектор электрической поляризации. Физический смысл *поляризованности* – это суммарный дипольный момент, который приобретают полярные молекулы, приходящийся на единицу объема диэлектрика. В этом случае в диэлектрике появляется дополнительный заряд Q_d , вызванный явлением *поляризации*, т.е. смещением связанных зарядов в диэлектрике.

Наиболее наглядно явление поляризации проявляется в электрическом конденсаторе. Если на поверхность листового диэлектрического материала с однородными (изотропными) свойствами нанести металлические электроды и подать на них постоянное напряжение, то образо-

вавшийся конденсатор будет накапливать электрический заряд величиной $Q = CU$, где C – емкость конденсатора, U – приложенное напряжение. В свою очередь заряд Q в диэлектрике может быть представлен как $Q = Q_0 + Q_d$, т.е. суммой заряда Q_0 , когда вместо диэлектрика в конденсаторе вакуум, и Q_d – заряда обусловленного поляризацией диэлектрика. Отношение зарядов Q и Q_0 называется относительной диэлектрической проницаемостью (в дальнейшем просто диэлектрической проницаемостью) материала, т.е.

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0}. \quad (7)$$

Таим образом, *диэлектрическая проницаемость* ε – это скалярная безразмерная величина (всегда больше единицы), которую можно представить как отношение емкости конденсатора с данным диэлектриком к емкости такого же конденсатора, между электродами которого вакуум.

1.2. Виды поляризации

В зависимости от механизма поляризации, поляризацию диэлектриков можно подразделить на следующие виды.

Электронная поляризация — упругое смещение электронных оболочек атомов под действием внешнего электрического поля. Это самая быстрая поляризация, время установления которой до 10^{-15} с. Не связана с потерями энергии.

Ионная поляризация — смещение узлов кристаллической структуры под действием внешнего электрического поля, причем смещение узлов решетки происходит на величину, меньшую, чем величина постоянной решетки. Время протекания 10^{-13} с и происходит без потерь энергии.

Дипольная (ориентационная) поляризация — протекает с потерями на преодоление сил связи и внутреннего трения. Связана с ориентацией диполей во внешнем электрическом поле.

Электронно-релаксационная поляризация — ориентация дефектных (слабо связанных) электронов во внешнем электрическом поле.

Ионно-релаксационная поляризация — смещение ионов слабо закрепленных в узлах кристаллической структуры, либо находящихся в междоузлиях.

Структурная поляризация — ориентация примесей и неоднородных макроскопических включений в диэлектрике. Самый медленный тип.

Самопроизвольная (спонтанная) поляризация — благодаря наличию этого типа поляризации в диэлектрике проявляется нелинейность свойств, то есть явление гистерезиса. Отличается очень высокими значениями диэлектрической проницаемости (от 900 до 7500 у некоторых

видов конденсаторной керамики).

Резонансная поляризация — ориентация частиц, собственные частоты которых совпадают с частотами внешнего электрического поля.

Миграционная поляризация - обусловлена наличием в материале слоев с различной проводимостью, образованием объемных зарядов, особенно при высоких градиентах напряжения, имеет большие потери и является поляризацией замедленного действия.

1.3. Частотная и температурная зависимость диэлектрической проницаемости

Поляризация диэлектриков имеет максимальное значение в статических электрических полях. В переменных полях, в связи с наличием инерции электронов, ионов и электрических диполей, вектор электрической поляризации зависит от частоты. В связи с этим вводится понятие дисперсии диэлектрической проницаемости. Так как время установления, например, электронной поляризации весьма мало - 10^{-15} с, то даже при наиболее высоких частотах, применяемых в современной электротехнике и радиоэлектронике, поляризация неполярных диэлектриков успевает полностью установиться за время, которое пренебрежимо мало по сравнению с полупериодом переменного напряжения. Поэтому у *неполярных диэлектриков ϵ от частоты не зависит* (рис. 5).

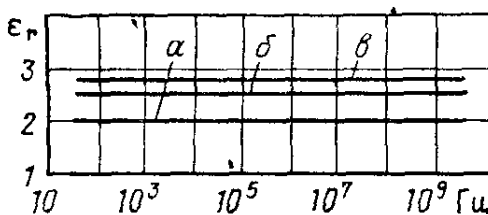


Рис. 5. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ от частоты для твердых неполярных диэлектриков: а — фторопласт-4; б — полистирол; в — полидихлорстирол

У полярных диэлектриков при повышении частоты диэлектрическая проницаемость сначала также остается неизменной, но начиная с некоторой критической частоты, когда поляризация уже не успевает полностью установиться за один полупериод, величина ϵ снижается (рис. 6).

У неполярных диэлектриков ϵ слабо зависит от температуры, уменьшаясь при повышении температуры вследствие теплового расширения вещества, т. е. уменьшения количества поляризующихся молекул в единице объема вещества. Пример — рис. 7 (резкое изменение

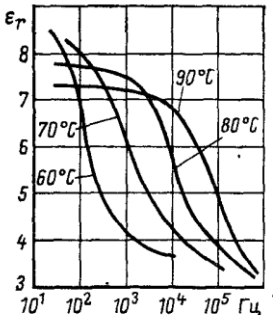


Рис. 6. Зависимость ϵ_r полярного диэлектрика (поливинилацетата) от частоты и температуры

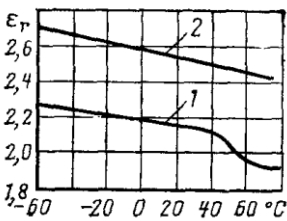


Рис. 7. Зависимость ϵ_r от температуры для непольярных диэлектриков; 1 – парафин; 2 – полистирол

ϵ на графике для парафина соответствует температуре плавления этого кристаллического материала, связанного со скачкообразным изменением плотности вещества).

У диэлектриков ионного строения ϵ при росте температуры обычно возрастает. Однако у некоторых ионных кристаллов ϵ при росте температуры уменьшается. У полярных диэлектриков в области низких температур, когда вещество обладает большой вязкостью или даже находится в кристаллическом состоянии, ориентация дипольных молекул невозможна или, во всяком случае, затруднена. При повышении температуры возможность ориентации диполей облегчается, вследствие чего ϵ существенно возрастает. Однако при еще более высоких температурах вследствие усиления хаотических тепловых колебаний молекул степень упорядоченности ориентации молекул снижается, поэтому ϵ , пройдя через максимум, уменьшается (рис. 8).

В полярных диэлектриках с различными видами поляризации при увеличении частоты происходит скачкообразное уменьшение величины диэлектрической проницаемости по мере того, как посте-

пенно «отключаются» медленные виды поляризации. На температурной зависимости относительной диэлектрической проницаемости таких диэлектриков могут появляться несколько максимумов.

1.4. Потери в диэлектриках

Диэлектрическими потерями называют энергию, вызывающую нагрев диэлектрика, которая рассеивается в единицу времени в диэлектрике при воздействии на него электрического поля.

Потери энергии в диэлектриках наблюдаются как при переменном напряжении, так и при постоянном, поскольку в любом материале протекает сквозной ток, обусловленный проводимостью. При постоянном напряжении, когда нет периодической поляризации, качество

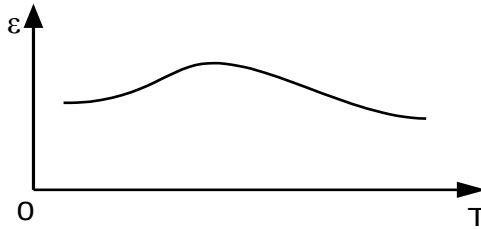


Рис. 8. Типовая зависимость ϵ от температуры для большинства полярных диэлектриков

материала характеризуется значениями удельных объемного и поверхностного сопротивлений. При переменном напряжении необходимо использовать какую-то другую характеристику качества материала, так как в этом случае, кроме сквозной электропроводности, возникает ряд добавочных причин, вызывающих потери энергии в диэлектрике. Для характеристики способности диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле пользуются понятием угла диэлектрических потерь, а также тангенсом этого угла.

Углом диэлектрических потерь называется угол δ , дополняющий до 90 градусов угол сдвига фаз φ между током I и напряжением U в емкостной цепи. В случае идеального диэлектрика I в такой цепи будет опережать вектор U на 90° , при этом угол δ будет равен нулю. Чем больше рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая в тепло, тем меньше угол сдвига фаз φ и тем больше угол диэлектрических потерь δ и соответственно $\tan \delta$ (рис. 9).

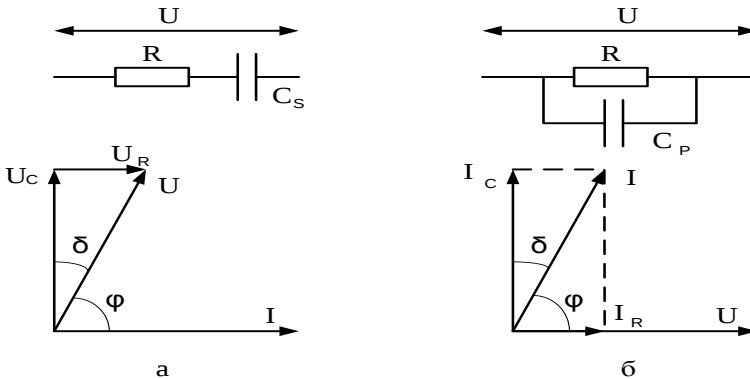


Рис. 9. Эквивалентные схемы и векторные диаграммы диэлектрика с потерями: а – последовательная схема, б – параллельная схема

Диэлектрические потери могут обуславливаться сквозным током

или активными составляющими поляризационных токов. При изучении диэлектрических потерь, непосредственно связанных с поляризацией диэлектрика, можно изобразить это явление в виде кривых, представляющих зависимость электрического заряда на обкладках конденсатора с данным диэлектриком от приложенного к конденсатору напряжения. При отсутствии потерь, вызываемых явлением поляризации, заряд линейно зависит от напряжения, и такой диэлектрик называется линейным.

Если в диэлектрике имеет место замедленная поляризация, связанная с потерями энергии, то кривая зависимости заряда от напряжения приобретает нелинейную зависимость. В технических электроизоляционных материалах, помимо потерь на сквозную электропроводность и потерь от замедленных видов поляризации, возникают электрические потери, которые сильно влияют на электрические свойства диэлектриков. Эти потери вызываются наличием изолированных друг от друга посторонних проводящих или полупроводящих включений углерода, окислов железа и т.д. и значительны даже при малом содержании таких примесей в электроизоляционном материале. В случае высоких напряжений потери в диэлектрике возникают вследствие ионизации газовых включений внутри диэлектриков, особенно интенсивно происходящей при высоких частотах. При изучении поведения диэлектрика с потерями при переменном напряжении часто оказывается целесообразным заменить рассматриваемый диэлектрик емкостью без потерь (учитывает явление поляризации) и активным сопротивлением (учитывает электропроводность), соединенными между собой параллельно или последовательно.

Рассмотрим схему, эквивалентную конденсатору с диэлектриком, обладающим потерями и находящимся в цепи переменного напряжения. Последовательная и параллельная схема представлены на рис. 8, там же даны соответствующие диаграммы токов и напряжений. Обе схемы эквивалентны друг другу, если при равенстве полных сопротивлений $z_1 = z_2 = z$ равны их активные и реактивные составляющие. Это условие будет соблюдено, если углы сдвига тока I относительно напряжения U равны и значения активной мощности одинаковы.

Из теории переменных токов известно, что:

$$P_a = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (8)$$

Выразим P для последовательной и параллельной схемы через C_s и C_p и угол δ , который является дополнением угла φ до 90 градусов. Для последовательной схемы (рис. 9, а), используя выражения для P_a и соответствующую диаграмму, имеем:

$$P_a = \frac{U}{z} \cdot \frac{U_r}{z} = \frac{U_r^2}{x^2 + r^2} = \frac{U_r^2}{x^2 \cdot (1 + \frac{r^2}{x^2})} = \frac{U^2 \cdot \omega C_s \cdot \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg} \delta} \quad (9)$$

и $\operatorname{tg} \delta = \omega C_s R_s$.

Для параллельной схемы (рис. 9,б):

$$P_a = U^2 \cdot \omega C_p \cdot \operatorname{tg} \delta \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_p R_s}. \quad (10)$$

Из формул (9) и (10) можно видеть, что диэлектрические потери приобретают серьезное значение для материалов, используемых в установках высокого напряжения, в высокочастотной аппаратуре и особенно в высоковольтных высокочастотных устройствах, поскольку величина диэлектрических потерь пропорциональна квадрату приложенного к диэлектрику напряжения и частоте поля. Материалы, предназначенные для применения в указанных условиях, должны отличаться малым значением угла потерь и диэлектрической проницаемостью, т.к. в противном случае мощность, рассеиваемая в диэлектрике, может стать недопустимо большой.

Диэлектрические потери по их особенностям и физической природе можно подразделить на четыре основных вида:

- 1) диэлектрические потери, обусловленные поляризацией;
- 2) диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью диэлектрика;
- 3) ионизационные диэлектрические потери;
- 4) диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры.

Рассмотрим каждый вид диэлектрических потерь.

Диэлектрические потери, обусловленные поляризацией, особенно отчетливо наблюдаются в веществах, обладающих релаксационными видами поляризации, в диэлектриках дипольной структуры и в диэлектриках ионной структуры с неплотной упаковкой ионов.

Релаксационные диэлектрические потери вызываются нарушением теплового движения частиц под влиянием сил электрического поля. Это нарушение приводит к рассеянию энергии и нагреву диэлектрика. В температурной зависимости $\operatorname{tg} \delta$ релаксационных диэлектрических потерь наблюдается максимум при некоторой температуре, характерной для данного вещества (рис. 10). При этой температуре время релаксации частиц диэлектрика примерно совпадает с периодом изменения приложенного переменного напряжения. Если температура такова, что время релаксации частиц значительно больше полупериода изменения приложенного переменного напряжения, то тепловое движение частиц будет менее интенсивным. Потери уменьшатся, если температура такова, что время релаксации частиц значительно меньше полу-

периода изменения напряжения, а интенсивность теплового движения будет больше, связь между частицами уменьшится, в результате чего потери также снизятся.

Классификация потерь в диэлектриках

Диэлектрические потери	Главные особенности	Виды диэлектриков
1. Обусловленные поляризацией		
релаксационные (дипольные и ионные)	Наличие максимума $\tan \delta$ угла потерь, зависящего от температуры и частоты	Дипольные жидкие и твердые диэлектрики, ионные с неплотной упаковкой
резонансные	Наличие резко выраженного максимума при некоторой частоте (выше 10^{15} Гц), положение которого не зависит от температуры	Все виды диэлектриков
2. Обусловленные электропроводностью	Независимость потерь от частоты ($\tan \delta$ угла потерь с частотой снижается по гиперболе) и заметное возрастание с ростом температуры	Жидкие и твердые диэлектрики. Жидкие и твердые диэлектрики с большой электропроводностью
3. Ионизационные	Наблюдаются при напряжениях выше напряжения ионизации газов и газовых включений внутри диэлектрика	Газообразные и твердые диэлектрики с газообразными включениями
4. Обусловленные неоднородностью структуры	Сложная зависимость потерь от компонентов, входящих в состав диэлектрика и случайных примесей	Неоднородные диэлектрики

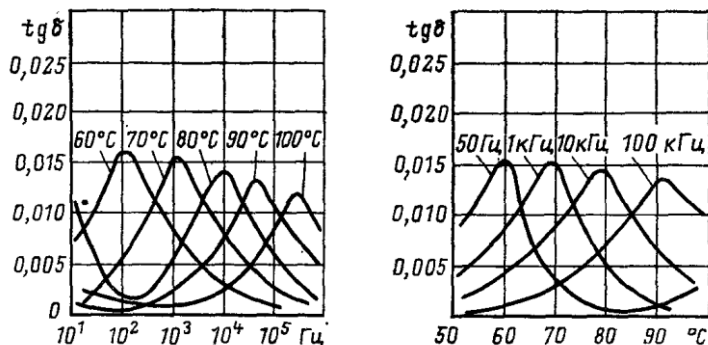


Рис. 10. Зависимость $\text{tg}\delta$ от частоты и температуры для полярного диэлектрика (поливинилацетат)

Резонансные потери, проявляющиеся в диэлектриках при световых частотах. Этот вид потерь с особой четкостью наблюдается в некоторых газах при строго определенной частоте и выражается в интенсивном поглощении энергии электрического поля. Также эти потери возможны и в твердых веществах, если частота вынужденных колебаний, вызываемых электрическим полем, совпадает с частотой собственных колебаний частиц твердого вещества. Наличие максимума в частотной зависимости $\text{tg}\delta$ характерно также и для резонансного механизма потерь, однако в данном случае температура на положение максимума потерь не влияет.

Диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью. Диэлектрические потери, обусловленные сквозной проводимостью, обнаруживаются в диэлектриках, имеющих заметную электропроводность, объемную или поверхностную. Диэлектрические потери этого вида не зависят от частоты электрического поля, а $\text{tg}\delta$ уменьшается с частотой по гиперболическому закону. Диэлектрические потери, обусловленные электропроводностью, возрастают с ростом температуры по экспоненциальному закону.

Ионизационные диэлектрические потери свойственны диэлектрикам в газообразном состоянии. Ионизационные потери проявляются в неоднородных электрических полях при напряженностях, превышающих значения, соответствующие началу ионизации данного газа.

Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры. Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры, наблюдаются в слоистых диэлектриках из пропитанной бумаги и ткани, в пластмассах с наполнителем, в пористой керамике, в производных слюды - миканитах, микалксе и т.д. В таблице приведена классификация потерь в диэлектриках.

1.5. Методика измерения

В лабораторной работе измерение ε и $\operatorname{tg} \delta$ твердых диэлектриков производится хорошо известным резонансным методом с применением прибора измерителя добротности или Q-метра. Как следует из его названия, он может применяться для измерения добротности Q и обычно применяется при измерении добротности катушек индуктивности. Упрощенная схема Q-метра показана на рис. 11.

В приборе используется явление резонанса в высокодобротном последовательном колебательном контуре. Этот контур сформирован образцовой высокодобротной катушкой индуктивности L и образцовым (обычно воздушным) переменным конденсатором $C1$. На контур подается напряжение с высокочастотного генератора G , частоту f которого можно изменять в широких пределах. На определенной частоте f_0 сигнала генератора G , изменяя емкость конденсатора $C1$, контур настраиваем в резонанс, который фиксируется по максимальному значению напряжения на вольтметре $V2$. Сопротивление R характеризует общие потери во всех элементах колебательного контура. В момент резонанса добротность контура Q определяется как отношение показаний вольтметров $V2$ и $V1$, т.е. $Q = V2/V1$. Если поддерживать напряжение генератора сигнала G на известном уровне (например, 0,1 В), то шкалу вольтметра $V2$ можно проградуировать прямо в значениях добротности Q .

Если в контур вносится дополнительная емкость C_x , например в виде емкости, полученной при подключении исследуемого твердого диэлектрика, то изменяются резонансная частота контура и его добротность. Резонансная частота изменяется за счет увеличения суммарной емкости контура $C = C1 + C_x$, а добротность контура снижается за

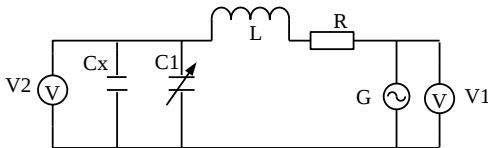


Рис. 11. Упрощенная схема измерителя добротности (Q-метра)

счет потерь различного типа, возникающих в диэлектрике. Настраивая контур вновь в резонанс на этой же частоте f_0 , по разности показаний конденсатора $C1$ можно определить величину емкости C_x , т.е. это и есть емкость исследуемого диэлектрика. Зная геометрические размеры подключенного диэлектрика можно определить величину ε диэлектрика, используя формулу емкости плоского конденсатора.

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 S}{d}, \quad (11)$$

где ε - относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика конденсатора, ε_0 - *абсолютная диэлектрическая проницаемость* вакуума ($\varepsilon_0=8,8510^{-12}$ Ф/м), S – площадь обкладок конденсатора, d – расстояние между обкладками конденсатора.

Определяя значение емкости C_x подключенного диэлектрика и учитывая размеры электродов (в работе используется круглый электрод диаметром 3 см), можно рассчитать ε диэлектрика как:

$$\varepsilon = \frac{C \cdot d}{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot S} \quad (12)$$

Уменьшение добротности контура позволит оценить величину потерь, вносимых диэлектриком в колебательный контур, а следовательно, и $\text{tg}\delta$. При этом $\text{tg}\delta$ можно рассчитать по формуле

$$\text{tg}\delta = \frac{(Q_1 - Q_2) \cdot C_1}{Q_1 \cdot Q_2 \cdot (C_1 - C_2)} \quad (13)$$

где Q_1 и C_1 – добротность контура и емкость переменного конденсатора при неподключенном диэлектрике, Q_2 и C_2 – добротность контура и емкость переменного конденсатора при подключенном диэлектрике.

2. Выполнение лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения резонансным методом относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков с использованием прибора – измерителя добротности (Q-метра). Для этого применяется специальная программа, выполняемая на персональном компьютере (ПК). В эту программу заложены модели изменения характеристик ряда диэлектриков в зависимости от изменения параметров окружающей среды и внешних воздействий, а также используется модель прибора Q-метр. Принцип измерения ε и $\text{tg}\delta$ описан выше. При подготовке к работе необходимо изучить методические указания к лабораторной работе.

Для начала работы необходимо запустить файл «Танг_диэл» на Рабочем столе ПК. после чего появится окно, изображенное на рис.12,а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и кнопки, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, применяемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора материалов, как показано на рис. 12,б.

Выбор материала осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием материала. На закладке представлены описание и некоторые характеристики выбранного материала диэлектрика.

2.1. Проведение измерений

После щелчка по кнопке «К измерениям» открывается окно измерения параметров выбранного диэлектрика, показанное на рис. 13. В этом окне отображаются прибор - измеритель добротности и измерительная камера с образцом диэлектрика. Здесь же отображаются схема подключения исследуемого образца диэлектрика и используемые при этом электроды.

Необходимо включить прибор щелчком по тумблеру «Сеть». По умолчанию в измерительной камере установлена температура 0°C .

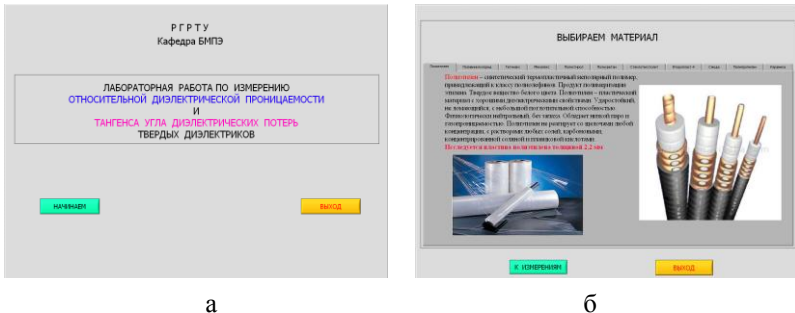


Рис. 12. Внешний вид окна начала работы (а) и выбора материала диэлектрика для исследования (б)

Измерение ϵ и $\text{tg}\delta$ диэлектрика необходимо производить в следующей последовательности.

Установить необходимую частоту генератора, используя кнопки выбора диапазона и движок на шкале плавного изменения частоты.

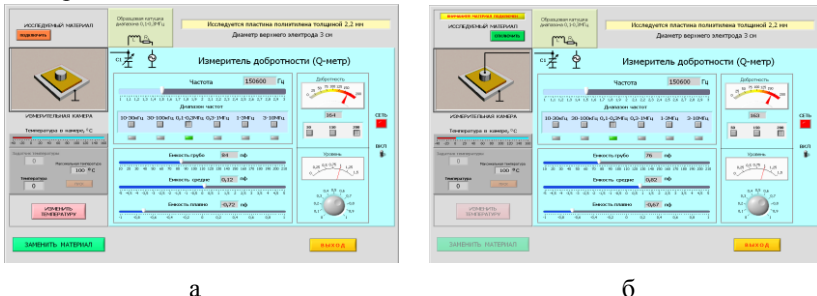


Рис. 13. Внешний вид окна для проведения измерений без подключенного к Q-метру исследуемого образца диэлектрика (а) и с подключенным образцом диэлектрика (б)

1. Ручкой под стрелочным индикатором «Уровень» установить стрелку на шкале прибора на 1.
2. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру» и в окно «Задатчик

температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере.

3. Изменяя значение емкости переменного конденсатора по шкалам «Емкость грубо», «Емкость средне» и «Емкость плавно», по стрелочному прибору «Добротность» добиться резонанса в колебательном контуре по максимальному отклонению стрелки прибора. Записать в черновике значение добротности Q_1 с цифрового индикатора внизу стрелочного прибора и значение емкости переменного конденсатора C_1 . Емкость конденсатора в пикофарадах определяется суммированием значений цифровых индикаторов под соответствующими шкалами изменения емкости переменного конденсатора.

4. Подключить образец диэлектрика щелчком по кнопке «Подключить образец» и повторить измерения в соответствии с п. 4. Новые величины добротности и емкости будут соответствовать значениям Q_2 и C_2 , измеренным при подключенном в контур диэлектрике.

5. Отключить образец кнопкой «Отключить образец», при необходимости изменить частоту или температуру в измерительной камере в соответствии с пп. 1-3 и продолжить в соответствии с пп. 4,5.

6. При необходимости выбрать другой диэлектрик, используя кнопку «Заменить материал».

3. Последовательность выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на исследование конкретного диэлектрика в указанном диапазоне температур и частот.

2. Для каждого значения температуры провести измерения Q_1 , C_1 и Q_2 , C_2 на фиксированной частоте и полученные значения занести в таблицу, пример которой показан ниже.

Диэлектрик 1								
Тем- пер.	Частота	Q_1	C_1	Q_2	C_2	C_x	ε	$\text{tg}\delta$

3. Рассчитать значения ε и $\text{tg}\delta$ для исследуемых диэлектриков по формулам (12) и (13) и построить графики зависимости этих параметров от частоты и температуры в соответствии с заданием.

4. Содержание отчета

4.1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.

4.2. Отчет должен содержать:

- название работы;
- цель работы;
- основные теоретические сведения;
- схемы измерения;
- полученные расчетные данные;
- необходимые графики, требуемые по заданию;
- сравнение полученных данных со справочными материалами.

5. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Что такое дипольный момент и на что он влияет в диэлектрике?
2. Чем отличается полярная молекула от неполярной?
3. Что такое поляризация диэлектрика и на что влияет это явление?
4. Дайте определение относительной диэлектрической проницаемости.
5. Перечислите основные виды поляризации.
6. Чем отличаются электронная поляризация от электронно-релаксационной, ионная от ионно-релаксационной?
7. Какие виды поляризации присущи полярным и неполярным диэлектрикам?
8. Нарисуйте график зависимости ϵ от частоты для полярных и неполярных диэлектриков.
9. Нарисуйте график зависимости ϵ от температуры для полярных и неполярных диэлектриков.
10. Что такое потери в диэлектриках?
11. Что такое $\operatorname{tg} \delta$ для последовательной схемы замещения диэлектрика?
12. Что такое $\operatorname{tg} \delta$ для параллельной схемы замещения диэлектрика?
13. Нарисуйте график зависимости $\operatorname{tg} \delta$ от частоты для полярных и неполярных диэлектриков.
14. Нарисуйте график зависимости $\operatorname{tg} \delta$ от температуры для полярных и неполярных диэлектриков.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНДЕНСАТОРОВ

Цель работы: измерение с помощью прибора Q-метра емкости и добротности конденсатора при различных частотах и температурах, расчет эквивалентной схемы конденсатора.

1. Теоретические сведения

1.1. Общие сведения о конденсаторах

Конденсаторы, как и резисторы, представляют широкий класс компонентов современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). В настоящее время имеется достаточно широкая номенклатура этих элементов, использующих последние достижения науки и техники. Продолжается разработка новых типов конденсаторов с более высокими электрическими, технологическими и эксплуатационными параметрами. Конденсатор – компонент РЭА, предназначенный для накопления электрической энергии и возвращения ее в электрическую цепь. Составляет из электродов (обкладок), разделенных диэлектриком.

Конденсатор характеризуется номинальной емкостью, допустимым отклонением емкости от номинального значения, номинальным рабочим напряжением, сопротивлением изоляции, добротностью и другими параметрами.

Номинальная емкость конденсатора – емкость, которую должен иметь конденсатор в соответствии с ГОСТом. Номинальное значение емкостей, в соответствии с рекомендациями МЭК (Международная электротехническая комиссия), стандартизовано и выбирается из определенных рядов чисел Е3; Е6; Е12; Е24; Е48; Е96; Е192 (цифра указывает количество номинальных значений в каждой декаде). Так, например, для ряда Е6 номинальные значения в пределах декады составляют величины 1.0; 1.5, 2.2; 3.3; 4.7; 6.8. Полное указание номинальной емкости состоит из цифры и обозначения единицы измерений: Ф – фарада; мкФ – микрофарада (10^{-6} Ф); нФ – нанофарада (10^{-9} Ф); пФ – пикофарада (10^{-12} Ф). Фактическое значение емкости может отличаться от номинального в пределах поля допуска, которое исчисляется в процентах от номинального значения и также подчиняется ряду. Имеются буквенная международная кодировка допусков и соответствующие отечественные обозначения. Стоит отметить, что большинство зарубежных компаний – производителей конденсаторов имеют свои условные обозначения типов и параметров конденсаторов. Таблица допусков и их условное обозначение представлены в приложении.

Емкость большинства конденсаторов зависит от температуры. Для ее учета вводят *температурный коэффициент емкости* (ТКЕ), показывающий относительное изменение емкости при изменении температуры на один градус. Для обозначения используется буквенно-цифровая или цветовая (в виде цветных полос или цвета корпуса конденсатора) кодировка. По разновидности ТКЕ конденсаторы разделяют на конденсаторы с ненормируемым ТКЕ, с линейной зависимостью ТКЕ и нелинейной зависимостью ТКЕ.

Для конденсаторов с ненормируемым ТКЕ и нелинейной зависи-

мостью ТКЕ указывается разброс номинальной емкости в диапазоне рабочих температур. Для конденсаторов с линейной зависимостью емкости от температуры указывается температурный коэффициент $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (ppm/ $^{\circ}\text{C}$) в рабочем диапазоне температур (обычно $-60 +85^{\circ}\text{C}$). Таблица условных обозначений ТКЕ представлена в приложении.

Номинальное рабочее напряжение – максимальное напряжение, при котором конденсатор может надежно работать в течение гарантированного срока с сохранением своих параметров. Номинальное напряжение меньше испытательного в 1,5...3 раза и значительно ниже пробивного. При испытательном напряжении конденсатор может работать лишь кратковременно. Номинальные напряжения также подчиняются стандартному ряду.

Сопротивление изоляции – сопротивление конденсатора постоянному току. $R_{\text{из}} = U/I_{\text{ут}}$, где U – напряжение; $I_{\text{ут}}$ – сквозной ток (ток утечки). Сквозной ток проводимости имеет электронную или ионную природу. Сопротивление изоляции конденсаторов всех видов, кроме электролитических, велико и выражается в мегаомах, гигаомах, тераомах (10^6 , 10^9 , 10^{12}).

Постоянная времени конденсатора $\tau = R_{\text{из}} \cdot C$ характеризует конденсатор при использовании его в цепи постоянного тока. Постоянная времени обычно используется для характеристики пленочных конденсаторов.

Потери энергии в конденсаторе на заданной частоте определяет *тангенс угла потерь* $\text{tg}\delta$. Потери определяются типом диэлектрика, его качеством, температурой окружающей среды, частотой переменного тока. Изменение $\text{tg}\delta$ происходит в широких пределах от $(10-15) \cdot 10^{-4}$ для фторопластовых, слюдяных, высокочастотных керамических, полистирольных конденсаторов и до $(500-3500) \cdot 10^{-4}$ для оксидных.

Добротность конденсатора $Q = \frac{1}{\text{tg}\delta}$, где $\text{tg}\delta = \text{tg}\delta_{\text{с}} + \text{tg}\delta_{\text{м}}$. Суммар-

ные потери определяются потерями в диэлектрике и металлических обкладках. На высоких частотах потери за счет поверхностного эффекта растут и добротность конденсатора снижается. Добротность меняется также из-за частотной и температурной зависимости потерь в диэлектрике.

Конденсатор, включенный в цепь переменного тока, обладает полным сопротивлением (импедансом), включающим кроме емкости омическое сопротивление и индуктивность. На высоких частотах они оказывают большое влияние на амплитуду и форму напряжений и токов цепи, в которую включен конденсатор. Упрощенная эквивалентная схема и амплитудно-частотная характеристика модуля полного сопротивления конденсатора представлены на рис. 1.

На частоте f конденсатор имеет сопротивление (импеданс)

$$Z = \sqrt{r^2 + \left[\frac{1}{2\pi f C} - 2\pi f L \right]^2}. \quad (1)$$

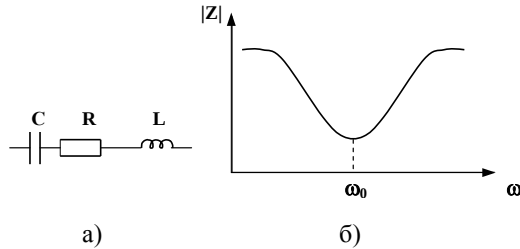


Рис. 1. Эквивалентная схема (а) и амплитудно-частотная характеристика модуля полного сопротивления конденсатора (б)

На высоких частотах конденсатор можно рассматривать как последовательный колебательный контур с резонансной частотой

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\Pi}C}}. \quad (2)$$

На резонансной частоте компенсируются емкостная и индуктивная составляющие импеданса, т. е. $\frac{1}{2\pi f C} = 2\pi f L$. Сопротивление резко

снижается, и конденсатор имеет чисто активное сопротивление. На частотах ниже резонансной реактивное сопротивление носит емкостный характер, на частоте выше резонансной – индуктивный (рис. 1, б). Резонансная частота должна быть в 2-3 раза выше рабочей.

Паразитная индуктивность обычно мала, составляет единицы нГн у керамических, слюдяных конденсаторов и сотни нГн у бумажных и пленочных конденсаторов большого номинала. В конденсаторах, изготовленных из диэлектрика с релаксационными видами поляризаций, снижение емкости на частотах $10^5 \dots 10^6$ Гц связано с уменьшением диэлектрической проницаемости. В электролитических конденсаторах емкость начинает уменьшаться уже на частотах $10^2 \dots 10^4$ Гц.

1.2. Конденсаторы для современной малогабаритной РЭА

Современная РЭА характеризуется повсеместной миниатюризацией и уменьшением ее массогабаритных характеристик. Широкое применение больших интегральных микросхем (БИС) позволило резко снизить размеры и массу большинства образцов РЭА. Применение поверхностного монтажа элементов и миниатюризация пассивных компонентов электронных устройств потребовали уменьшения размеров конденсаторов основных типов, соизмеримых по габаритным характе-

ристикам с размерами основных элементов для поверхностного монтажа. Такие конденсаторы выпускаются в специальных корпусах (SMD), и их называют ЧИП конденсаторы. Пример такого рода конденсаторов показан на рис. 2. Обычно ЧИП конденсаторы упаковываются в ленту, которая снабжена перфорацией и позволяет легко выбирать их различными автоматами при установки на печатную плату.

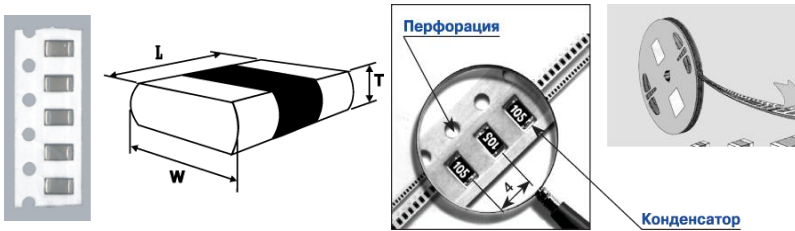


Рис. 2. ЧИП конденсаторы

ту.

Линейные размеры таких конденсаторов лежат в пределах от десятых долей до единиц миллиметров. ЧИП конденсаторы используются в малагабаритных, переносных и других типах РЭА. В настоящее время как у нас в стране, так и за рубежом большое количество компаний производит ЧИП конденсаторы от простых керамических до электролитических с величинами номиналов от единиц пикофарад до десятков микрофарад. Такие конденсаторы могут использоваться практически в любых диапазонах частот. В качестве примера ниже в табл. 1 и 2 приведены типовые размеры и некоторые параметры ЧИП конденсаторов компании производителя Vibrant Development.

Таблица 1

Типоразмеры ЧИП конденсаторов компаний Vibrant Development

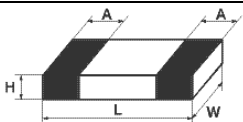
Типоразмер	L	W	H		A
			Min	Max	
1210 	3,2 мм	2,60 мм	1,0 мм	1,25 мм	0,75 мм

Таблица 2

Параметры ЧИП конденсаторов компаний Vibrant Development

Диэлектрик	NPO	X7R
Диапазон номинальных емкостей	1пФ - 3.3нФ	470 пФ-0.1мкФ
Диапазон рабочих температур	-55 + 125 °C	-55 + 125 °C

2. Методика проведения измерений

В данной работе определяются параметры конденсатора: номинальная емкость, $\text{tg}\delta$, активное сопротивление потерь и ТКЕ. В лабораторной работе измерение параметров конденсаторов производится хорошо известным резонансным методом с применением прибора - измерителя добротности, или Q-метра. Как следует из его названия, он может применяться для измерения добротности Q и обычно применяется при измерении добротности катушек индуктивности. Упрощенная

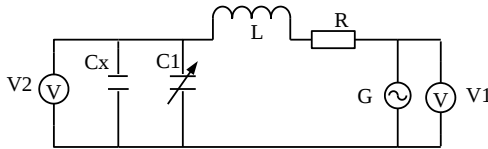


Рис. 3. Упрощенная схема измерителя добротности (Q-метра)

схема Q-метра показана на рис. 3.

В приборе используется явление резонанса в высокодобротном последовательном колебательном контуре. Этот контур сформирован образцовой высокодобротной катушкой индуктивности L и образцовым (обычно воздушным) переменным конденсатором $C1$. На контур подается напряжение с высокочастотного генератора G , частоту f которого можно изменять в широких пределах. На определенной частоте f_0 сигнала генератора G , изменяя емкость конденсатора $C1$, контур настраиваем в резонанс, который фиксируется по максимальному значению напряжения на вольтметре $V2$. Сопротивление R характеризует общие потери во всех элементах колебательного контура. В момент резонанса добротность контура Q определяется как отношение показаний вольтметров $V2$ и $V1$, т.е. $Q = V2/V1$. Если поддерживать напряжение генератора на известном уровне (например, 1 В), то шкалу вольтметра $V2$ можно проградуировать в значениях добротности.

Если в контур вносится дополнительная емкость Cx , например в виде емкости исследуемого конденсатора, то изменяются резонансная частота контура и его добротность. Резонансная частота изменяется за счет увеличения суммарной емкости контура $C = C1 + Cx$, а добротность контура снижается за счет потерь различного типа, возникающих в подключенном конденсаторе. Настраивая контур вновь в резонанс на этой же частоте f_0 , по разности показаний конденсатора $C1$ можно определить величину емкости Cx , т.е. это и есть емкость исследуемого конденсатора.

Уменьшение добротности контура позволит оценить величину потерь, вносимых конденсатором в колебательный контур, а следова-

тельно, и его $\operatorname{tg} \delta$. При этом $\operatorname{tg} \delta$ можно рассчитать по формуле

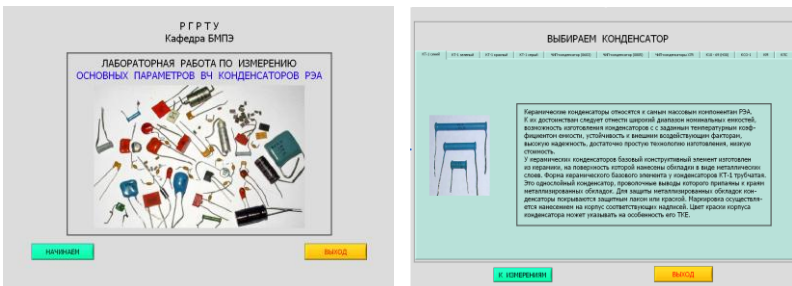
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{(Q_1 - Q_2) \cdot C_1}{Q_1 \cdot Q_2 \cdot (C_1 - C_2)}, \quad (3)$$

где Q_1 и C_1 – добротность контура и емкость переменного конденсатора при неподключенном исследуемом конденсаторе, Q_2 и C_2 – добротность контура и емкость переменного конденсатора при подключенном к Q-метру исследуемому конденсатору.

3. Выполнение лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения резонансным методом емкости исследуемого конденсатора и тангенса угла его диэлектрических потерь с применением прибора – измерителя добротности (Q-метра). Для этого используется специальная программа, выполняемая на персональном компьютере (ПК). В эту программу заложены модели изменения характеристик ряда конденсаторов от изменения параметров окружающей среды и внешних воздействий, а также используется модель прибора Q-метр. Принцип измерения C_X и $\operatorname{tg} \delta$ описан выше. При подготовке к работе необходимо изучить методические указания к лабораторной работе.

Для начала работы необходимо запустить файл «Лаб_конденсатор» на Рабочем столе ПК, после чего появится окно, изображенное на рис. 4,а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и кнопки управления, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, применяемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора



а

б

Рис. 4. Окна запуска лабораторной работы

конденсатора, как показано на рис. 4,б.

Выбор конденсатора осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием конденсатора. На закладке представлены описание и некоторые характеристики выбранного типа конденсаторов

для исследования в лабораторной работе.

3.1. Проведение измерений

После щелчка по кнопке «К измерениям» открывается окно проведения измерений прибором Q-метр, показанное на рис. 5. В этом окне отображаются прибор - измеритель добротности и измерительная камера с образцом конденсатора. На рис. 5,а исследуемый конденсатор не подключен к прибору Q-метр, а на рис. 5,б подключен. Здесь же отображается функциональная схема подключения исследуемого кон-

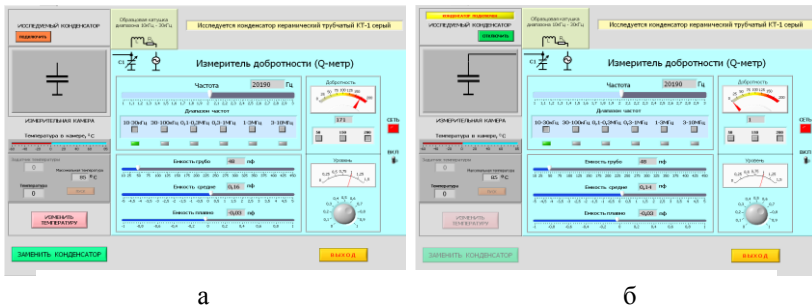


Рис. 5. Окно проведения измерений прибором Q-метр

денсатора.

Необходимо включить прибор щелчком по тумблеру «Сеть». По умолчанию в измерительной камере установлена температура 20 °С. Измерение параметров конденсатора необходимо производить в следующей последовательности.

1. Установить необходимую частоту генератора, используя кнопки выбора диапазона и движок на шкале плавного изменения частоты.
2. Ручкой под стрелочным индикатором «Уровень» установить стрелку на шкале прибора на отметку «1».
3. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру», в окно «Задатчик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере.
4. Изменяя значение емкости переменного конденсатора по шкалам «Емкость грубо», «Емкость средне» и «Емкость плавно», по стрелочному прибору «Добротность» добиться резонанса в колебательном контуре по максимальному отклонению стрелки прибора. Записать в черновике значение добротности Q_1 с цифрового индикатора внизу стрелочного прибора и значение емкости переменного конденсатора C_1 . В процессе проведения измерений на одной частоте значения Q_1 и емкость C_1 остаются постоянными. Емкость конденсатора в пикофарадах определяется суммированием значений цифровых индикаторов под соответствующими шкалами изменения емкости переменного

конденсатора.

5. Подключить исследуемый конденсатор щелчком по кнопке «Подключить образец» и повторить измерения в соответствии с п. 4. Новые величины добротности и емкости будут соответствовать значениям Q_2 и C_2 , измеренным при подключенном в контур конденсаторе.

6. Отключить образец кнопкой «Отключить образец», при необходимости изменить частоту или температуру в измерительной камере в соответствии с пп. 1-3 и продолжить измерения как в пп. 4,5.

7. При необходимости выбрать другой конденсатор, используя кнопку «Заменить конденсатор».

4. Последовательность выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на исследование конкретных конденсаторов в указанном диапазоне температур и частот.

2. Для каждого значения температуры провести измерения Q_1 , C_1 и Q_2 , C_2 на фиксированной частоте и полученные значения занести в таблицу, пример которой показан ниже.

3. Рассчитать значения C , X_C , Q , R_{Π} для исследуемых конденсаторов по формулам (4) – (8) и построить графики зависимости этих параметров от частоты и температуры в соответствии с заданием преподавателя:

$$\text{– емкость конденсатора } C = C_2 - C_1; \quad (4)$$

$$\text{– реактивное сопротивление } X_C = \frac{1}{2\pi f C}; \quad (5)$$

$$\text{– добротность конденсатора } Q = \frac{(C_2 - C_1)Q_1Q_2}{C_1(Q_1 - Q_2)}; \quad (6)$$

$$\text{– активное сопротивление } R_{\Pi} = \frac{C_1Q_1 / Q_2 - Q_1}{2\pi f C_1Q_1Q_2}; \quad (7)$$

$$\text{– тангенс угла потерь конденсатора } \operatorname{tg}\delta = 1/Q. \quad (8)$$

4. Определить ТКЕ конденсатора в указанном диапазоне температур и сопоставить его со значениями, указанными в приложении к лабораторной работе.

5. Содержание отчета

5.1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.

5.2. Отчет должен содержать:

- название работы;
- цель работы;

- основные теоретические сведения;
- схемы измерения;
- полученные расчетные данные;
- необходимые графики, требуемые по заданию;
- сравнение полученных данных со справочными материалами.

6. Классификация и маркировка конденсаторов

Классифицируют конденсаторы по типу диэлектрика. Сокращенные обозначения содержат три элемента. Первый элемент - буква или сочетание букв - определяет тип конденсатора (К - постоянной емкости; КП - переменной емкости; КТ - подстроечный; КС - конденсаторной сборки). Второй элемент – число, обозначающее используемый вид диэлектрика: 10 – керамические на номинальное напряжение до 1600 В; 15 – керамические на номинальное напряжение 1600 В и выше; 20 – кварцевые; 21 – стеклянные; 22 – стеклокерамические; 23 – стеклоэмалевые; 31 – слюдяные малой мощности; 32 – слюдяные большой мощности; 40 – бумажные на номинальное напряжение до 2 кВ с обкладками из фольги; 41 – бумажные на номинальное напряжение 2 кВ и выше с обкладками из фольги; 50 – электролитические фольговые алюминиевые; 51 – электролитические фольговые танталовые, ниобиевые и др.; 52 – электролитические объемно-пористые; 53 – полупроводниковые оксидные; 54 – металлические оксидные; 60 – воздушные; 61 – вакуумные; 71 – полистирольные; 72 – фторопластовые; 73 – полиэтилентерефталатные лавсановые; 72 – комбинированные; 76 – лакопленочные; 77 – поликарбонатные. Третий элемент – порядковый номер, присваиваемый при разработке. Дополнительно может содержать буквенное обозначение (П – для работы в цепях постоянного и переменного токов; Ч – для работы в цепях переменного тока; И – для работы в импульсных режимах; У – для работы в цепях постоянного тока и в импульсных режимах).

Обозначения и маркировка применяются двух типов в зависимости от размера конденсатора. На конденсаторах большого размера обозначаются тип, номинальная емкость, допустимое отклонение емкости в процентах, номинальное напряжение, марка завода-изготовителя, месяц и год выпуска.

При маркировке применяются обозначения полные или сокращенные (кодированные). Кодированные обозначения номинальной емкости состоят из трех или четырех знаков, включающих две или три цифры и букву. Буква обозначает множитель p , n , μ , m , F (соответственно 10^{-12} , 10^{-9} , 10^{-6} , 10^{-3} , 1) для значений емкости, выраженных в фарадах. Например, 5,6 пФ–5р6; 150 пФ–150р(п15); 2,2 мкФ–2 μ 2; 10

мФ-10т. Кодированные обозначения допустимых отклонений приводятся в справочной литературе (в таблицах).

Ниже представлена кодировка допускаемых отклонений емкости конденсаторов. Буквенное обозначение допуска указано для международного и российского стандартов.

Допуск, %	Буквенное обозначение	Цвет
$\pm 0,1$ пФ*	B (Ж)	Не указан
$\pm 0,25$ пФ*	C (У)	Оранжевый
$\pm 0,5$ пФ*	D (Д)	Желтый
± 1 пФ*	F (Р)	Коричневый
± 2	G (Л)	Красный
± 5	J (И)	Зеленый
± 10	K (С)	Белый
± 20	M (В)	Черный
± 30	N (Ф)	Не указан
-10...+30	Q (О)	Не указан
-10...+50	T (Э)	Не указан
-10...+100	Y (Ю)	Не указан
-20...+50	S (Б)	Фиолетовый
-20...+80	Z (А)	Серый
* Для конденсаторов емкостью меньше 10 пФ		

Кодировка ТКЕ конденсаторов.

Конденсаторы с ненормируемым ТКЕ			
Группа ТКЕ	Допуск при -60...+85 °С (%)	Буквенный код	Цвет*
H10	± 10	B	Оранжевый (+черный)
H20	± 20	Z	Оранжевый (+красный)
H30	± 30	D	Оранжевый (+зеленый)
H50	± 50	X	Оранжевый

			(+голубой)
H70	± 70	E	Оранжевый (+фиолетовый)
H90	± 90	F	Оранжевый (+белый)
* Современная цветовая кодировка. Цветные полосы или точки. Второй цвет может быть представлен цветом корпуса.			

Конденсаторы с линейной зависимостью емкости от температуры

Обозначение ГОСТ	Международное	ТКЕ (ppm/°C) *	Буквенный код	Цвет**
П100	P100	+100	A	Красный (+фиолетовый)
П33		+33	N	Серый
МП0	NP0	0(+30...-75)	C	Черный
M33	N030	-33 (+30...-80)	H	Коричневый
M47	N050	-47 (+30...-80)	M	Желтый
M75	N080	-75 (+30...-80)	L	Красный
M150	N150	-150 (+30...-105)	P	Оранжевый
M220	N220	-220 (+30...-120)	R	Желтый
M330	N330	-330 (+60...-180)	S	Зеленый

M470	N470	-470 (+60...-210)	T	Голубой
M750	N750	-750 (+120...-330)	U	Фиолетовый
M1500	N1500	-1500(-1300)	V	Оранжевый (+оранжевый)
M2200	N2200	-2200	K	Желтый (+оранжевый)

* В скобках приведен реальный разброс для импортных конденсаторов в диапазоне температур -55...+85°C.

** Современная цветовая кодировка. Цветные полосы или точки. Второй цвет может быть представлен цветом корпуса.

Конденсаторы с нелинейной зависимостью от температуры

Группа ТКЕ*	Допуск, %	Температура,** °C	Буквенный код***	Цвет***
Y5F	± 7,5	-30...+85		
Y5P	± 10	-30...+85		Серебряный
Y5R		-30...+85		Серый
Y5S	± 22	-30...+85	R	Коричневый
Y5U	+22...-56	-30...+85	S	
Y5V (2F)	+22...-82	-30...+85	A	
X5F	± 7,5	-55...+85		
X5P	± 10	-55...+85		
X5S	± 22	-55...+85		
X5U	+22...-56	-55...+85		Синий

X5V	+22...-82	-55...+85		
X7R (2R)	± 15	-55...+85		
Z5F	± 7,5	-10...+85	B	
Z5P	± 10	-10...+85	C	
Z5S	± 22	-10...+85		
Z5U (2E)	+22...-56	-10...+85	E	
Z5V	+22...-82	-10...+85	F	Зеленый
* Обозначение приведено в соответствии со стандартом EIA, в скобках - IEC. ** В зависимости от технологий, которыми обладает фирма, диапазон может быть другим. *** В соответствии с EIA. Некоторые фирмы пользуются другой кодировкой.				
		Отечественное обозначение ТКЕ	Замена на:	
		M1500, M750	X7R	
		H10, H20, H30, H50, H70, H90	Y5V	
		ПЗЗ, МП0, М47	NP0	

7. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. От чего зависит емкость конденсатора?
2. Для чего используют конденсаторы в РЭА?
3. Что такое тангенс дельта и добротность конденсатора?
4. От чего зависит добротность конденсатора?
5. Нарисуйте эквивалентную схему конденсатора и объясните назначение ее элементов.
6. Что такое номинальная емкость конденсатора и допускаемые отклонения?
7. Что такое ТКЕ и от чего он зависит?
8. Как классифицируются конденсаторы?
9. Как сокращенно обозначаются значения емкости конденсаторов?

10. Из каких диэлектрических материалов выполняются конденсаторы?
11. Объяснить зависимости, полученные в работе.
12. Объяснить график частотной зависимости полного сопротивления конденсатора.
13. На какие группы разделяют ТКЕ конденсаторов?
14. Как добротность конденсатора зависит от температуры?
15. Как добротность конденсатора зависит от частоты?
16. Каковы конструктивные особенности СВЧ конденсаторов?
17. Какие конструктивные особенности конденсаторов для малогабаритной аппаратуры?
18. Почему растет $\tan \delta$ конденсатора на высоких частотах?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: изучение методов измерения пробивного напряжения и определение электрической прочности диэлектрических материалов

1. Основные теоретические сведения

1.1. Электрический пробой твердых диэлектриков

Надежность и долговечность электрической изоляции проводов, диэлектрика конденсаторов и других деталей радиоэлектронной аппаратуры, особенно работающих при повышенных электрических напряжениях, зависят от электрической прочности диэлектрика. Электрическая прочность диэлектрика зависит от напряжения пробоя $U_{пр}$, т.е. напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика, а именно потеря диэлектриком изолирующих свойств.

Электрическую прочность диэлектрика в однородном электрическом поле определяют величиной пробивного напряжения $U_{пр}$, отнесенной к толщине диэлектрика d или расстоянию между электродами, – т.е. напряженностью электрического поля при пробое $E_{пр}$. Пробивное напряжение $U_{пр}$ в большинстве случаев прямо пропорционально величине d , зависит от параметров диэлектрика и окружающей среды и характеризует конкретную конструктивную особенность данного изделия. Напряженность электрического поля при пробое $E_{пр}$ не зависит от толщины и поэтому характеризует электрическую прочность материала диэлектрика:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{d}. \quad (1)$$

Электрическая прочность измеряется в В/м, однако допускаются

производные единицы измерения: МВ/м, кВ/мм, кВ/см. Величина $E_{пр}$ характеризует способность диэлектрика противостоять разрушающему действию электрического поля и зависит в первую очередь от агрегатного состояния изолятора и его свойств.

Различают четыре вида электрического пробоя твердых диэлектриков.

- 1) электрический пробой макроскопически однородных диэлектриков;
- 2) электрический пробой неоднородных диэлектриков;
- 3) тепловой (электротепловой) пробой;
- 4) электрохимический пробой.

Каждый из указанных видов пробоя может иметь место для одного и того же материала в зависимости от характера электрического поля (постоянного или переменного, импульсного, низкой или высокой частоты), наличия в диэлектрике дефектов, в частности закрытых пор, от условий охлаждения, времени воздействия напряжения.

Электрический пробой обычно происходит в диэлектриках с низкой электропроводностью, низким тангенсом угла диэлектрических потерь и хорошим отводом тепла.

1. Электрический пробой макроскопически однородных диэлектриков характеризуется весьма быстрым развитием. Он протекает за время, меньшее $10^{-7} - 10^{-8}$ с, и не обусловлен тепловой энергией, хотя электрическая прочность при электрическом пробое в некоторой степени все же зависит от температуры.

Электрический пробой по своей природе является чисто электронным процессом, когда из немногих изначально свободных электронов в твердом теле создается электронная лавина. Под действием электрического поля и имея некоторую длину свободного пробега λ , электроны разгоняются и получают дополнительную кинетическую энергию $W = qU_{\lambda}$, где q - заряд; U_{λ} - падение напряжения на длине свободного пробега λ . Электроны, достигшие определенной критической скорости при столкновении с нейтральной молекулой или атомом, могут производить отщепление одного или нескольких новых электронов. Каждый из отщепленных от атомов и молекул электронов может ускоряться электрическим полем и выбить при достаточно набранной энергии еще несколько других электронов. Таким образом, возникает лавинообразное увеличение количества свободных электронов и за счет лавинного умножения таких электронов возникает участок в диэлектрике с повышенной проводимостью.

Это приводит к резкому возрастанию проводимости твердого диэлектрика в месте формирования электронной лавины, и возникает явление электрического пробоя. Как правило, резкое возрастание тока

приводит к повышенному выделению тепла и в месте возникновения лавины происходит разрушение структуры диэлектрика.

Чисто электрический пробой имеет место, когда исключено влияние разогрева диэлектрика за счет высокой электропроводности и диэлектрических потерь, также обуславливающих нагрев материала, а также отсутствует ионизация газовых включений. Для однородного поля и полной структурной однородности материала напряженность поля при электрическом пробое может служить мерой электрической прочности вещества. Такие условия удается наблюдать для монокристаллов щелочно-галогенидных соединений и некоторых органических полимеров. В этом случае $E_{пр}$ достигает сотен мегавольт на метр и более. Для однородных материалов наблюдается существенная разница между значениями пробивного напряжения в однородном и неоднородном электрических полях.

2. *Электрический пробой неоднородных диэлектриков* характерен для технических диэлектриков, содержащих газовые включения. Так же, как и электрический пробой однородного диэлектрика, он весьма быстро развивается.

Наличие газовых включений и других неоднородностей с меньшей диэлектрической проницаемостью ϵ , меньшей чем в самом материале диэлектрика, приводит к неравномерному распределению напряженности электрического поля по объему материала. Это влечет увеличение напряженности электрического поля в веществе с меньшей величиной ϵ и первоначальное возникновение пробоя именно в этом месте. Возникновение пробоя, например в газовом промежутке, приводит к нарушению структуры вещества диэлектрика в месте его соприкосновения с неоднородностью и местному разогреву. Возникают локальные механические и тепловые напряжения, приводящие к растрескиванию вещества. Все это ведет к росту проводимости в локальном месте диэлектрика, увеличению плотности тока и дальнейшему разогреву. Электропроводность диэлектриков увеличивается с ростом температуры, и, следовательно, растет ток в локальном месте. Таким образом формируется лавинообразный процесс увеличения электропроводности в локальном месте диэлектрика и возникает пробой. Напоминаем, что причиной этого процесса являлась неоднородность в структуре диэлектрика.

Пробивные напряжения для неоднородных диэлектриков, находящихся во внешнем однородном или неоднородном поле, как правило, имеют невысокие значения и мало отличаются друг от друга.

Принято считать, что в однородном поле электрическая прочность стекол, фарфора и других твердых диэлектриков не зависит от толщины образца. Однако основные работы по изучению влияния сте-

пени однородности поля на электрическую прочность проводились лишь со стеклом при очень малых толщинах образцов - от 0,05 до 0,2 - 0,5 мм, когда число дефектов невелико. Понятно, что с увеличением толщины образца усиливается неоднородность структуры, возрастает число газовых включений и снижаются электрические прочности как в однородном, так и в неоднородном поле. Иногда на опыте можно видеть, что электрическая прочность керамики при электродах, создающих внешнее неоднородное поле, будет даже выше, чем при электродах, обеспечивающих однородное поле. Так, электрическая прочность образцов рутиловой керамики толщиной 1,6 - 1,7 мм при постоянном напряжении для электродов игла - плоскость составляет примерно 24 МВ/м, а для плоских электродов - всего 12,5 - 15 МВ/м.

Из этого следует, что чем меньше площадь электродов, тем выше может быть значение электрической прочности керамических материалов вследствие уменьшения числа инородных включений, попадающих в пределы поля, хотя поле в этом случае резко неоднородное. Снижение электрической прочности твердых диэлектриков при увеличении площади электродов наблюдается не только у керамики, но и у других материалов: бумаги, картона, лакотканей.

Электрическая прочность твердых диэлектриков практически не зависит от температуры до некоторого ее значения. Выше этого значения наблюдается заметное снижение электрической прочности, что говорит о появлении теплового механизма пробоя.

Низкой электрической прочностью отличаются диэлектрики с открытой пористостью (непропитанная бумага, дерево, пористая керамика). Электрическая прочность их сравнительно мало отличается от таковой для воздуха; исключение составляет бумага с повышенной плотностью. Твердые диэлектрики с закрытыми порами, например плотная керамика, характеризуются более высокой электрической прочностью. Наличие газовых включений в твердой изоляции особенно опасно при высоких частотах. На высоких частотах в газовых промежутках возникает сильная ионизация и возможно образование плазмы. Это приводит к появлению активных химических веществ по краям газового включения, которые могут иметь более высокую проводимость, инициировать локализацию тока и вызвать электрический пробой в локальном месте, как описано выше. Электрический пробой неоднородных диэлектриков при прочих равных условиях требует применять материалы с большей толщиной для улучшения изоляционных свойств электроустановок.

Высокой электрической прочностью характеризуются диэлектрики, имеющие плотную структуру и не содержащие газовых включений. К ним относятся: слюда, пропитанная жидким диэлектриком бу-

мага, стекла. Статистические исследования напряжения пробоя диэлектриков показали, что коэффициент вариации (Квар) напряжения пробоя для неоднородных диэлектриков превышает значение 0,15, а для однородных - менее 0,15. Чем однороднее диэлектрик, тем меньше для него значение Квар.

3. *Тепловой пробой.* Характерен для диэлектриков с высокой электропроводностью, большим значением тангенса угла диэлектрических потерь и плохим теплоотводом. Этот пробой сводится к разогреву материала в электрическом поле до температур, соответствующих потере им электроизоляционных свойств в локальном месте, связанной с чрезмерным возрастанием сквозной электропроводности или диэлектрических потерь. Пробивное напряжение при тепловом пробое зависит от целого ряда факторов: частоты электрического поля, условий охлаждения, температуры окружающей среды и др. При нахождении

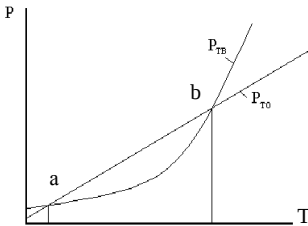


Рис. 1. Зависимости мощности выделения тепла ($P_{ТВ}$) и мощности отвода тепла ($P_{ТО}$) от температуры

диэлектрика в электрическом поле часть энергии электрического поля рассеивается в диэлектрике из-за диэлектрических потерь, сквозной проводимости, в результате чего диэлектрик нагревается. Повышение температуры диэлектрика по сравнению с окружающей средой ведет к увеличению теплоотвода. Дальнейшее развитие процессов зависит от соотношения скоростей отвода тепла и тепловыделения. На рис.1 показаны зависимости мощности тепловыделения ($P_{ТВ}$) и мощности отвода тепла ($P_{ТО}$) от температуры окружающей среды для неполярного диэлектрика.

Как видно из приведенного рисунка, в области температур от точки а до точки б мощность отвода тепла превышает мощность тепловыделения, поэтому повышения температуры не происходит, т.е. система находится в равновесии. Для перехода в область за точку б необходимо дополнительное выделение тепла. Это обусловлено тем, что при росте температуры увеличивается электропроводность диэлектрика, растут ток и выделяемое в диэлектрике тепло. Рост температуры увеличивает электропроводность и выделяемое тепло. Создается лавнообразный процесс увеличения тепловыделения, кривая тепловыделения $P_{ТВ}$ на рис. 1 поднимается выше кривой теплоотвода и начинается необратимый разогрев диэлектрика, приводящий к его пробое и разрушению. Этот процесс может происходить достаточно быстро, и

температура диэлектрика начинает быстро расти. Нагрев материала диэлектрика может привести к его растрескиванию, оплавлению, обугливанию, что снижает электрическую прочность диэлектрика и ведет к его разрушению.

Очевидно, что стойкость к электротепловому пробоя зависит как от свойств самого материала (у полярных диэлектриков диэлектрические потери выше и стойкость к электротепловому пробоя ниже), так и от конструкции изолятора. Чем больше поверхность изолятора, тем больше тепла рассеивается в окружающую среду и меньше вероятность электротеплового пробоя.

Следует также отметить, что в случае, когда рабочая температура изолятора приближается к точке b , любое повышение температуры приведет к выходу изоляции из строя. В то же время в случае, когда рабочая температура находится ниже точки b , колебания температуры не столь опасны. Нагрев диэлектрика (при нахождении его при температуре ниже точки b) приведет к увеличению мощности отвода тепла. Поэтому мощности выделения и отвода тепла сравниваются.

4. *Электрохимический пробой* имеет особенно существенное значение при нахождении диэлектрика в химически агрессивных средах, при повышенной температуре и высокой влажности воздуха. Этот вид пробоя наблюдается при постоянном и переменном напряжении низкой частоты, когда в материале развиваются электролитические процессы, обуславливающие необратимое уменьшение сопротивления изоляции. Уменьшение сопротивления диэлектрика стимулирует увеличение через него тока и дополнительное выделение тепла. Температура диэлектрика возрастает, и это активизирует электролитические и электрохимические процессы в веществе, что в свою очередь уменьшает сопротивление изоляции и приводит к росту тепловыделения. Таким образом, возникает лавинообразный процесс роста температуры изоляции и к ее разрушению.

Такое явление часто называют старением диэлектрика в электрическом поле, поскольку оно приводит к постепенному снижению электрической прочности, заканчивающемуся пробоем при напряженности поля, значительно меньшей пробивной напряженности, полученной при кратковременном испытании. Это явление имеет место в органических (пропитанная бумага, резина и т.д.) и некоторых неорганических диэлектриках (например, титановая керамика).

Электрохимический пробой требует для своего развития длительного времени. Это связано с явлением электропроводности, приводящим к медленному выделению в материале малых количеств химически активных веществ, или с образованием полупроводящих соединений. В керамике, содержащей окислы металлов переменной валентно-

сти (например, TiO_2), электрохимический пробой встречается значительно чаще, чем в керамике, состоящей из окислов алюминия, кремния, магния, бария.

Наличие щелочных окислов в алюмосиликатной керамике способствует возникновению электрохимического пробоя и ограничивает допустимую рабочую температуру. При электрохимическом пробое большое значение имеет материал электрода. Серебро, из которого могут быть выполнены электроды, способно диффундировать в керамику и облегчает электрохимический пробой в противоположность, например, золоту.

1.2. Физические явления электрического пробоя в газообразных диэлектриках

Внешней изоляцией во многих видах электротехнических конструкций, таких как трансформаторы, конденсаторы, линии электропередачи, служит воздух. Электрическая прочность воздуха в нормальных условиях невелика по сравнению с $E_{\text{пр}}$ большинства жидких и твердых диэлектриков.

Небольшое число содержащихся в газе положительных и отрицательных ионов и электронов вызвано в основном внешними воздействиями (радиационный фон, ультрафиолетовое излучение и др.). Эти носители зарядов, как и нейтральные молекулы газа, находятся в беспорядочном тепловом движении. При наложении электрического поля заряды получают некоторую добавочную скорость и начинают перемещаться вдоль вектора поля или в противоположном направлении, в зависимости от знака заряда. При этом заряженная частица в газе приобретает дополнительную энергию

$$W = qU_{\lambda}, \quad (2)$$

где q - заряд; U_{λ} - падение напряжения на длине свободного пробега λ носителя заряда

Если поле достаточно однородно, то можно принять $U_{\lambda} = E\lambda$, где E - напряженность поля. Отсюда

$$W = Eq\lambda. \quad (3)$$

Добавочная энергия заряженных частиц сообщается молекулам, с которыми они сталкиваются. Если эта энергия достаточно велика, происходит возбуждение атомов и молекул, связанное с переходом электрона на более удаленную от ядра орбиту, или даже ионизация молекул, т. е. их расщепление на электроны и положительные ионы. Условие, определяющее возможность ионизации:

$$W \geq W_{\text{и}}, \quad (4)$$

причем W включает в себя и энергию теплового движения, обычно

небольшую при нормальной температуре.

Из формул (2) и (3) получаем условие ионизации нейтральной молекулы вещества:

$$Eq\lambda \geq W_{\text{и}}. \quad (5)$$

Энергию ионизации $W_{\text{и}}$ обычно характеризуют ионизационным потенциалом

$$U_{\text{и}} = W_{\text{и}}/q. \quad (6)$$

Ионизационный потенциал большинства различных газов изменяется в пределах от 4 до 25 эВ, что соответствует энергии ионизации 4 - 25 эВ.

При заданных значениях давления газа и температуры ударная ионизация начинается при определенной напряженности поля, поскольку q и λ постоянны для каждого газа при данных конкретных условиях. Эта напряженность поля $E_{\text{пр}}$ называется начальной напряженностью.

В некоторых газах, например в кислороде, углекислом газе, парах воды, отделившийся электрон при одной из ближайших встреч с другой нейтральной молекулой соединяется с ней, превращая ее в электроотрицательный ион. Присоединение, «прилипание» электрона к нейтральной молекуле приводит в подобных случаях к такой перестройке ее электронной оболочки, что в итоге энергия молекулы, захватившей лишний электрон, оказывается меньше энергии нейтральной молекулы на некоторую величину, которую называют энергией сродства к электрону. Она колеблется у большинства различных газов в пределах 0,75 - 4,5 эВ. В инертных газах - в аргоне, неоне, гелии, криптоне, ксеноне, а также в азоте - отрицательные ионы не возникают. При разряде в воздухе образуются положительные ионы газов, содержащихся в атмосфере: O^+ , O_2^+ , N^+ , N_2^+ , NO^+ .

Скорость электрона (километр в секунду), прошедшего без столкновений разность потенциалов U (вольт), определяется выражением

$$v \approx 600\sqrt{U}. \quad (7)$$

Подставляя в эту формулу ионизационные потенциалы, получаем, что электрон способен ионизировать газовые молекулы, когда скорость его движения свыше 1000 км/с.

Казалось бы, подобно электронам, и положительные ионы, разогнанные полем, сталкиваясь с нейтральными частицами газа, должны вызывать ионизацию газа. В действительности при энергиях до сотен и тысяч электрон-вольт соударения положительных ионов с частицами газа непосредственно не приводят к ионизации газа. Такое различное действие электронов и положительных ионов на частицы газа объясня-

ется тем, что электроны имеют значительно большую подвижность, чем ионы. Кроме того, отщепляемый электрон отталкивается электроном, столкнувшимся с частицей газа, и, наоборот, притягивается положительным ионом. Сказывается также и то, что для электрона длина свободного пробега больше, чем для иона. Если положительный ион, разогнанный полем, испытывает соударение с периферическим электроном на внешней электронной оболочке нейтральной частицы, то условия для отщепления электрона оказываются неблагоприятными, так как при большом различии массы энергия, отдаваемая электрону при ударе, мала. Ионизация при соударении ионов с частицами газа зависит от химической природы столкнувшихся частиц, поскольку соударения являются элементарным актом химической реакции. При разряде в газе, находящемся между металлическими электродами, положительные ионы высвобождают электроны из металла, бомбардируя поверхность катода.

В некоторых случаях электрон, разогнанный полем, может не ионизировать молекулу, а привести ее, как указывалось выше, в возбужденное состояние. В следующий момент эта возбужденная молекула отдает свою избыточную энергию в форме электромагнитного излучения — испускает фотон. Фотон может поглощаться какой-либо другой молекулой, которая получает дополнительную энергию, и ее электро-

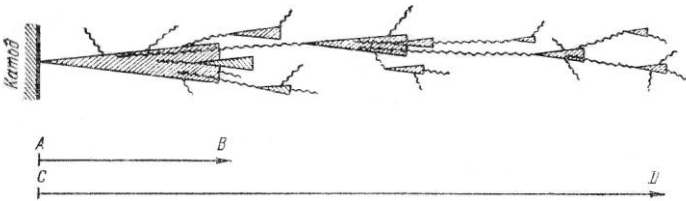


Рис. 2. Схематическое изображение распределения стримера при пробое газа

ны внешней оболочки уже имеют меньшую энергию ионизации. Эти молекулы гораздо легче ионизируются другими электронами. Такая внутренняя фотонная ионизация газа благодаря большой скорости распространения излучения приводит к особенно быстрому развитию в разрядном промежутке каналов с повышенной проводимостью газа.

На рис.2 представлена схема, поясняющая, почему рост электропроводящего канала — стримера — происходит быстрее, чем продвижение электронной лавины. На рис.2 лавины условно показаны в виде заштрихованных конусов, а волнистыми линиями изображены пути

фотонов. Внутри каждого конуса, представляющего собой развивающуюся лавину, газ ионизируется ударами электронов; вновь отщепленные электроны, разгоняемые полем, ионизируют встречаемые ими частицы газа, и таким образом лавинообразно нарастает число электронов, движущихся к аноду, и число положительных ионов, направляющихся к катоду.

Волнистые линии исходят из атомов, которые были возбуждены ударами электронов и вслед за тем испустили фотоны. Двигаясь со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/с, фотоны обгоняют лавину и в каком-то месте, соответствующем концу волнистой линии, увеличивают энергию электронов молекул газа. В таких молекулах ионизация происходит при меньших энергиях разогнанного полем электрона и освобожденные здесь электроны, устремляясь к аноду, порождают новую лавину далеко впереди первой лавины. Таким образом, пока первая лавина вырастает, скажем, на длину малой стрелки АВ (рис.2), намечающийся канал повышенной проводимости газа, т. е. стример, распространяется на длину большой стрелки CD.

В следующей стадии отдельные лавины в отрицательном стримере, нагоняя друг друга, сливаются, образуя сплошной канал ионизированного газа.

Одновременно с ростом стримера, направленного от катода к аноду, начинается образование встречного лавинного потока положительно заряженных частиц, направленного к катоду. Положительный стример представляет собой канал газоразрядной плазмы. Поясним это подробнее. Электронные лавины оставляют на своем пути большое число вновь образованных положительных ионов, концентрация которых особенно велика там, где лавины получили свое наибольшее развитие, т. е. около анода. Если концентрация положительных ионов здесь достигает определенного значения (близкого к 10^{12} ионов в 1 см^3), то, во-первых, обнаруживается интенсивная фотонная ионизация, во-вторых, электроны, освобождаемые частицами газа, поглотившими фотоны, притягиваются положительным пространственным зарядом в головную часть положительного стримера и, в-третьих, вследствие ионизации концентрация положительных ионов на пути стримера увеличивается. Насыщение электронами пространства, заполненного положительными зарядами, превращает эту область в проводящую газоразрядную плазму. Под влиянием ударов положительных ионов на катоде образуется катодное пятно, излучающее электроны. В результате указанных процессов и возникает пробой газа. Обычно пробой газа происходит практически мгновенно: длительность подготовки пробоя газа при длине промежутка 1 см составляет порядка $10^{-7} - 10^{-8}$ с. Чем больше напряжение, приложенное к газовому промежутку, тем быстрее

может развиваться пробой. Если длительность воздействия напряжения очень мала, то пробивное напряжение повышается. Это повышение обычно характеризуют коэффициентом импульса

$$\beta = U_{np} / U_{np50}, \quad (8)$$

где U_{np} - пробивное напряжение при данном импульсе; U_{np50} - пробивное напряжение при постоянном или переменном напряжении частотой 50 Гц. Коэффициент импульса в резко неоднородных электрических полях может достигать значения 1,5 и даже превышать его. Явление пробоя газа зависит от степени однородности электрического поля, в котором осуществляется пробой. Рассмотрим явление пробоя газа в однородном поле. Однородное поле можно получить между плоскими электродами с закругленными краями, а также между сферами при расстоянии между ними, соизмеримом с диаметром сферы. В таком поле пробой наступает практически мгновенно при достижении строго определенного напряжения, зависящего от температуры и давления газа. Между электродами возникает искра, которая затем переходит в дугу, если источник напряжения имеет достаточную мощность. Появление искры при заданном расстоянии между электродами используют для определения значения приложенного напряжения (измерение высоких напряжений с помощью шаровых разрядников).

При малых расстояниях между электродами наблюдается значительное увеличение электрической прочности воздуха. Это явление можно объяснить трудностью формирования разряда при малом расстоянии между электродами. При нормальных условиях, т. е. при давлении 0,1 МПа и температуре около 20 °С, электрическая прочность воздуха при расстоянии между электродами 1 см составляет примерно 3 МВ/м; а при $h = 5$ мкм она достигает 70 МВ/м.

Электрическая прочность газа в сильной степени зависит от его плотности (т. е. от давления, если температура постоянна). При малых изменениях температуры и давления газа пробивное напряжение пропорционально плотности газа. Поэтому для расчета пробивных напряжений воздуха применяется формула

$$U_{np} = U_{np0} \delta, \quad (9)$$

где U_{np} - пробивное напряжение при данных температуре и давлении; U_{np0} - пробивное напряжение при нормальных условиях ($t = 20$ °С и давлении $p = 0,1$ МПа). Относительная плотность воздуха δ рассчитывается по соотношению

$$\delta = 0,386 \frac{p}{t + 273}, \quad (10)$$

где t - температура, °С; p - давление, мм рт. ст. При нормальных ус-

ловиях окружающей среды $\delta = 1$.

При больших давлениях и соответственно повышенной плотности газа расстояние между отдельными молекулами становится меньше; тем самым уменьшается длина свободного пробега электронов и, как следует из формулы (4), для того чтобы пробой произошел, должна быть увеличена напряженность электрического поля.

При уменьшении давления вначале наблюдается падение электрической прочности, как это видно из рис.3; когда же давление доходит до некоторого предела (ниже атмосферного давления) и разрежение достигает высоких степеней, электрическая прочность начинает

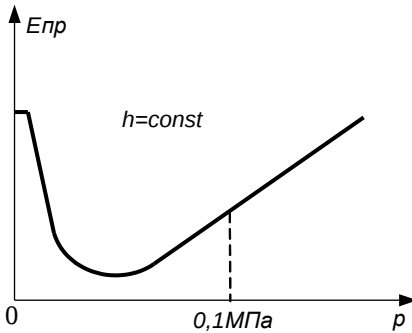


Рис. 3. Зависимость электрической прочности газа от давления

снова возрастать. Это возрастание объясняется уменьшением числа молекул газа в единице объема при сильном разрежении и снижением вероятности столкновений электронов с молекулами. При высоком вакууме пробой можно объяснить явлением вырывания электронов из поверхности электрода (холодная эмиссия). В этом случае электрическая прочность доходит до весьма высоких значений, зависит от материала и состояния поверхно-

сти электродов и больше не изменяется («полочка» на рис.3). Большую электрическую прочность вакуума используют в технике при конструировании вакуумных конденсаторов для больших напряжений высокой частоты.

Газы при больших давлениях применяются в качестве изоляции для высоковольтной аппаратуры, а также в производстве кабелей и конденсаторов высокого напряжения. Химический состав газа заметно влияет на электрическую прочность. Закономерности, которым подчиняется пробой газов в неоднородном поле, заметно отличаются от описанных выше закономерностей, наблюдаемых при пробое в однородном поле. Неоднородное поле возникает между двумя остриями, острием и плоскостью, между проводами линий электропередачи, между сферическими поверхностями при расстоянии между ними, превышающем диаметр сферы, и т. д.

Особенностью пробоя газа в неоднородном поле является возникновение частичного разряда в виде короны в местах, где напря-

женность поля достигает критических значений, с дальнейшим переходом короны в искровой разряд и дугу при возрастании напряжения между электродами.

Электрическая прочность воздушного зазора зависит от радиационного фона. Это связано с тем, что рост радиации приводит к увеличению количества свободных носителей заряда в газе и облегчает формирование электронной лавины. Радиоактивность измеряется в различных единицах. Мерой радиоактивности служит активность. Одной из единиц измерения служит Беккерель (Бк), что соответствует 1 распаду в секунду. Содержание активности в веществе часто оценивают на единицу веса вещества (Бк/кг) или объема (Бк/куб.м).

Также используется еще такая единица активности, как кюри (Ки). Это - огромная величина: 1 Ки = 37000000000 Бк. Активность радиоактивного источника характеризует его мощность. Так, в источнике активностью 1 кюри происходит 37000000000 распадов в секунду.

Как было сказано выше, при этих распадах источник испускает ионизирующее излучения. Мерой ионизационного воздействия этого излучения на вещество является экспозиционная доза. Часто измеряется в рентгенах (Р). Поскольку 1 рентген - довольно большая величина, на практике удобнее пользоваться миллионной (мкР) или тысячной (мР) долями рентгена.

1.3. Статистические методы исследования электрического пробоя диэлектриков

О величине электрической прочности материала нельзя судить по результатам одного опыта из-за большого разброса значений $U_{пр}$, полученных в одних и тех же условиях испытания (толщина диэлектрика, размер электродов, температура окружающей среды, скорость повышения напряжения и т.д.). Разброс значений $U_{пр}$ одинаковых образцов может достигать 50 %.

Чтобы судить о величине электрической прочности материала, необходимо произвести большое число испытаний на пробой (не менее 10), а экспериментальные результаты обработать статистическим методом. Наилучшим приближением к истинному значению пробивного напряжения является среднее арифметическое из n измерений:

$$U_{np} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{inp} \quad (11)$$

Мера отклонения отдельного измерения величины пробивного напряжения U_i от истинного значения $U_{пр}$ есть среднеквадратичное отклонение σ , которое не зависит от числа измерений, но зависит от свойств самого материала и от условий проведения эксперимента. Мера отклонения среднего значения пробивного напряжения от истинного значе-

ния U_{np} есть среднеквадратичная величина σ_m , которая зависит от числа измерений n . Величины σ и σ_m связаны между собой соотношением

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (12)$$

Для определения σ_m можно воспользоваться формулой Питерса. Если определим для i – го измерения остаток

$$|A_i| = U_{inp} - U_{np} \quad (13)$$

и найдем среднее значение n остатков, взятых без учета знака,

$$r = \frac{1}{n} \sum_i |A_i|, \quad (14)$$

то формула Питерса примет вид

$$\sigma_m \approx \frac{5}{4\sqrt{n-1}} r. \quad (15)$$

Это выражение связывает среднеквадратичное отклонение среднего значения пробивного напряжения от истинного. Пробивное напряжение в этом случае

$$U_{np} = U_{np} + \sigma_m. \quad (16)$$

Чем менее однородным является материал, тем больше σ_m и σ . Степень однородности определяется по коэффициенту вариации:

$$K_{var} = \frac{\sigma}{U_{np}}. \quad (17)$$

К однородным материалам относятся такие, для которых $K_{var} < 0,15$, к неоднородным – материалы с $K_{var} > 0,15$. Пробивную напряженность (электрическую прочность) определяют по формуле (1) при постоянном напряжении, переменном напряжении промышленной частоты, напряжениях высокой частоты и импульсных напряжениях. Чаще всего определение E_{np} производят при переменном напряжении промышленной частоты.

2. Методика измерений электрической прочности

Измерение пробивного напряжения диэлектрика производят обычно с помощью установок, обобщенная принципиальная схема которых приведена на рис.4. Схема содержит: Т – повышающий трансформатор, максимальное выходное напряжение которого может быть 10 кВ и более. Коэффициент трансформации определяет максимальное напряжение, которого можно достичь при заданном максимальном входном напряжении. АТ – автотрансформатор с плавной регулировкой напряжения; Р – реле максимального тока, отключающее высоковольтный трансформатор при пробое образца; МП1, МП2 – магнитные пускатели; которые подключают сеть к автотрансформатору. Л1 и Л2 – сигнальные лампы. V – вольтметр переменного тока. Резистор R ограничивает максимальную величину тока через образец при пробое.

При испытании образцы располагают на плоском нижнем электроде, выполненном из нержавеющей стали. В качестве верхнего электрода обычно применяют шары различных диаметров. Для определения пробивного напряжения испытуемый образец располагают между электродами, находящимися под защитным колпаком, имеющим блокировочный контакт. Магнитные пускатели подключают электрическую сеть к автотрансформатору, после чего можно подавать с него напряжение на первичную обмотку трансформатора Т. Путем ручного или автоматического увеличения автотрансформатором напряжения на первичной обмотке трансформатора Т напряжение на испытуемом образце плавно повышается до его пробоя. Напряжение, при котором произойдет пробой, фиксируют с помощью вольтметра V. В случае пробоя испытуемого образца магнитные пускатели МП1 и МП2 отключают автотрансформатор от электрической сети. После этого образец материала заменяют на другой и обеспечивают подготовку следующего цикла измерения.

3. Выполнение лабораторной работы

При подготовке к работе необходимо изучить методические ука-

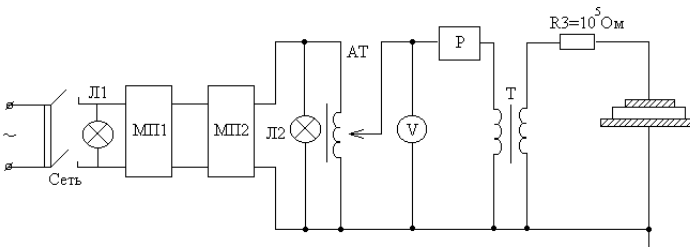
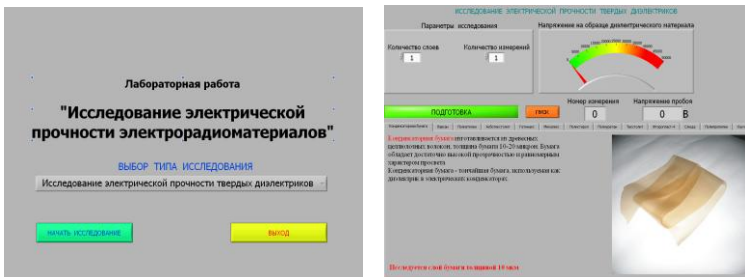


Рис. 4. Функциональная схема установки для измерения напряжения электрического пробоя твердых диэлектриков

зания к лабораторной работе и затем получить у преподавателя задание. Для начала работы необходимо запустить файл «Пробой_диэл» на Рабочем столе ПК. После чего появится окно, изображенное на рис.5,а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и некоторые интуитивно понятные элементы управления.

Лабораторная работа состоит из двух частей. В **первой части** исследуется *электрическая прочность твердых диэлектриков*, а **во второй части** исследуется *электрическая прочность воздушного зазора*. Начинать работу можно с любой из частей, выбрав в меню «Выбор типа исследования» щелчком левой кнопки мыши нужный тип исследования. Начинается исследование со щелчка левой кнопкой мыши по кнопке «Начать исследование».

3.1. Исследование электрической прочности твердых



а

б

Рис. 5. Внешний вид окна «Выбора типа исследования» (а) и окна исследования пробивного напряжения диэлектрика (б)

диэлектриков

Панель управления выполнением этой части лабораторной работы показана на рис.5,б. В нижней части панели происходит выбор материала для исследования щелчком по соответствующей вкладке. На каждой вкладке представлены конкретный материал диэлектрика и его краткое описание. Указывается толщина исследуемого образца материала. В верхней части панели задаются параметры исследования в виде количества слоев материала и количества необходимых измерений. Числовые значения в цифровые элементы управления задаются стандартным способом операционной системы Windows. (выделить и изменить).

боты (рис.5,а) выбрать из меню соответствующий пункт. Панель управления выполнением этой части лабораторной работы показана на рис.8. Она состоит из двух частей. Каждая их них активизируется только в своем режиме работы. После перехода к исследованию воздушного зазора появляется панель управления насосом (рис. 8,а), задающим давление в измерительной камере. После задания нужного давления, включения насоса и достижения заданного давления можно переходить к измерению напряжения пробоя. Для этого используются соответствующие кнопки панели управления.

Панель управления исследованием напряжения пробоя воздушного зазора показана на рис. 8,б. Элементы управления этой панели во многом соответствуют ранее описанной панели управления при исследовании напряжения пробоя твердых диэлектриков.



Рис. 8. Окна управления насосом (а) и измерения напряжения пробоя воздушного зазора (б)

4. Последовательность выполнения работы

4.1. Исследовать электрическую прочность твердых диэлектриков, указанных преподавателем. Для этого:

а) произвести указанное количество (N) измерений напряжения пробоя для каждого слоя. Количество слоев также указывает преподаватель;

б) определить среднюю величину пробивного напряжения U_m для каждого из слоев как
$$U_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i ;$$

в) построить график $U_m = F(N)$ и определить среднюю величину пробивной напряженности электрического поля (электрическую прочность) как $E = U_m/d$, где d – толщина исследуемого образца;

г) для максимального количества слоев исследуемого диэлектрика разделить диапазон напряжений пробоя между максимальным и минимальным значениями на несколько (5-7) зон и построить гистограмму распределения количества напряжений пробоя попавших в вы-

деленные зоны;

д) определить среднеквадратичное отклонение σ напряжений пробоя для максимального количества слоев диэлектрика как

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (U_i - U_m)^2}{N}};$$

е) определить коэффициент вариации напряжения пробоя для максимального количества слоев диэлектрика.

4.2. Исследовать электрическую прочность воздушного зазора. Для этого:

а) установить величину давления (Р) в измерительной камере по указанию преподавателя и для обычного радиационного фона 15 мкР/ч произвести указанное количество (N) измерений напряжения пробоя;

б) произвести измерения (по п. 2.2 а) для указанных преподавателем давлений в измерительной камере при неизменном радиационном фоне;

в) определить среднюю величину пробивного напряжения U_m воздушного зазора для каждого значения давления в измерительной камере;

г) построить график $U_m = F(P)$;

д) установить давление в измерительной камере 750 мм рт. ст. и, увеличивая указанное преподавателем значение радиационного фона (R), произвести по 5 измерений напряжения пробоя воздушного зазора для каждого значения радиационного фона;

е) определить пробивного напряжения U_m для каждого значения радиационного фона R и построить график $U_m = F(R)$.

5. Содержание отчета

5.1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.

5.2. Отчет должен содержать:

- название работы;
- цель работы;
- основные теоретические сведения;
- схемы измерения;
- полученные расчетные данные;
- необходимые графики, требуемые по заданию;
- сравнение полученных данных со справочными материалами.

6. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Что такое электрический пробой диэлектриков?
2. В каких единицах и почему именно в них измеряется электри-

ческая прочность диэлектриков?

3. В каких диэлектриках возможен электрический пробой, тепловой пробой, электрохимический пробой?

4. Что такое энергия ионизации?

5. Как возникает электрический пробой в газообразных диэлектриках?

6. Что такое стример и какова его роль в электрическом пробое газообразных диэлектриков?

7. Как развивается тепловой пробой?

8. Как и почему происходит электрический пробой твердых неоднородных диэлектриков?

9. Как происходит электрический пробой твердых однородных диэлектриков?

10. Как происходит электрохимический пробой твердых диэлектриков?

11. Как и почему электрическая прочность газообразных диэлектриков зависит от давления газа?

12. Что такое коэффициент вариации пробивного напряжения и что он определяет?

13. Как пробивное напряжение диэлектрика зависит от его толщины?

14. Почему для исследования пробивной прочности диэлектрика используют статистические методы?

15. Как и почему электрическая прочность газообразных диэлектриков зависит от уровня радиации?

16. Почему при одинаковой толщине газообразного и твердого диэлектрика пробивное напряжение твердого диэлектрика значительно выше, чем у газообразного?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ

Цель работы: ознакомление с основными электрическими параметрами высокочастотных катушек индуктивности и методами измерения этих параметров на переменном токе высокой частоты.

1. Краткие теоретические сведения

1.1. Общие сведения о катушках индуктивности

Катушки индуктивности, трансформаторы, дроссели относятся к моточным компонентам радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Основ-

ной рабочий элемент – обмотка, используемая для реализации магнитных свойств. Долямоточных компонентов в устройствах РЭА составляет от 3 до 8 %. В высокочастотных катушках индуктивности используется индуктивный характер сопротивления в диапазоне 100 кГц – 10 ГГц. Катушки индуктивности обладают свойством оказывать реактивное сопротивление переменному току при незначительном сопротивлении постоянному току. Совместно с конденсаторами они используются для создания фильтров, осуществляющих частотную селекцию электрических сигналов, а также для создания элементов задержки сигналов и запоминающих элементов, осуществления связи между цепями через магнитный поток и т.д. В отличие от резисторов и конденсаторов они не являются стандартизованными изделиями, а изготавливаются для конкретных целей и имеют такие параметры, которые необходимы для осуществления тех или иных преобразований электрических сигналов. Катушки индуктивности в основном применяются:

- для колебательных контуров (параллельных и последовательных);
- получения магнитной связи за счет магнитного поля между отдельными участками цепей РЭА (связанные контуры);
- создания в электрической цепи реактивного сопротивления индуктивного характера (дроссели).

Материал проводника обмотки катушки – металл с большой проводимостью. Форма катушек может быть любой, но большее применение получили катушки цилиндрические.

Виды намотки – однослойная, многослойная, однослойная с шагом, универсальная, внавал.

Катушки индуктивности по конструкции можно разделить на несколько групп: каркасные и бескаркасные, с сердечниками и без сердечников, экранированные и неэкранированные.

Свойства высокочастотных катушек индуктивности характеризуются следующими параметрами:

- номинальная величина индуктивности (от единиц нГн до сотен мГн);
- добротность катушки (порядка 10-200);
- собственная емкость катушки (в зависимости от конструкции от долей до десятков пФ);
- температурный коэффициент индуктивности (ТКИ).

Однослойная катушка образуется путем размещения провода по поверхности каркаса в один слой по винтовой линии. Витки обмотки располагаются плотно, виток к витку, или на некотором расстоянии друг от друга. В первом случае обмотка называется сплошной, во втором – с шагом. Фактически при сплошной обмотке не представляется

возможным уложить провод без зазора, и расстояние между осевыми линиями двух соседних витков (шаг намотки τ) оказывается несколько больше, чем диаметр провода в изоляции ($d_{из}$):

$$\tau = \alpha d_{из}, \quad (1)$$

где α – коэффициент неплотности обмотки.

Длиной обмотки однослойной катушки ℓ является расстояние между осевыми линиями двух крайних витков:

$$\ell = \tau(N-1), \quad (2)$$

где N – число витков катушки.

Наружный диаметр катушки:

$$D = D_0 + 2d_{из}, \quad (3)$$

где D_0 – диаметр каркаса. Для однослойных катушек с достаточной точностью можно считать $D \approx D_0$.

Величина индуктивности L_0 однослойной катушки без сердечника определяется по формуле:

$$L_0 = K_L N^2 D \cdot 10^{-8}, \text{ Гн}, \quad (4)$$

где K_L – поправочный коэффициент, значение которого приведено в табл. 1; значение D подставляется в мм.

Таблица 1

ℓ / D	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8
K_L	20	17	15,5	13	11,3	10	9,2	7,7
ℓ / D	1	1,5	2	3	4	5	6	10
K_L	6,8	5	4	2,7	2,2	1,8	1,5	1

При введении в катушку *магнитного сердечника* ее индуктивность возрастает в μ_c раз (μ_c – действующая магнитная проницаемость сердечника):

$$L_C = L\mu_c. \quad (5)$$

Величина μ_c зависит от начальной магнитной проницаемости материала, формы и размера сердечника, размеров катушки и от частоты. Сердечники различают по материалу и по форме. В качестве сердечников могут использоваться как магнитные, так и немагнитные материалы. Наиболее широкое применение находят сердечники круглого и прямоугольного сечения, броневые (с замкнутой или разомкну-

той магнитной цепью) и цилиндрические. Индуктивность катушек с кольцевыми сердечниками и равномерно распределенной однослойной обмоткой определяется по формуле:

$$L_c = \frac{LSN^2 \mu_a 10^{-7}}{D_{\text{ср}}}, \text{ Гн}, \quad (6)$$

где $D_{\text{ср}}$ - средний диаметр кольца, м; S - сечение кольца, м²; N - число витков; μ_a - начальная магнитная проницаемость кольца.

Цилиндрические сердечники применяются для увеличения индуктивности катушек и как элемент настройки. Индуктивность катушки с цилиндрическим сердечником и однослойной равномерной обмоткой рассчитывается по формуле:

$$L_c = \frac{\mu_c N^2 D^2 \cdot 100}{(\ell / D) + 0,44}, \text{ Гн}, \quad (7)$$

где ℓ - длина намотки; D - диаметр намотки. Формула (7) справедлива при соотношении $\ell / D \leq 5$.

Индуктивность катушки с многослойной намоткой и магнитным сердечником определяется по формуле:

$$L = \frac{\mu_c N^2 D_{\text{ср}} \cdot 8 \cdot 10^{-2}}{3D_{\text{ср}} + 9h + 10t} - \Delta L, \text{ Гн}, \quad (8)$$

где $D_{\text{ср}}$ - средний диаметр намотки; h - высота катушки; t - радиальная ширина намотки; ΔL - поправка на шаг намотки.

$$\Delta L = \mu_c [\ln(d_{\text{из}} / d_0) + 0,1]. \quad (9)$$

В катушках индуктивности помимо основного эффекта взаимодействия тока и магнитного поля наблюдаются паразитные эффекты, вследствие которых сопротивление катушки не является чисто реактивным и равным $X_L = \omega L$. Наличие паразитных эффектов ведет к появлению потерь в катушке, оцениваемых сопротивлением потерь r_n , которое определяет добротность катушки индуктивности.

Добротность катушек индуктивности в общем случае определяется формулой:

$$Q = \frac{\omega L}{r_n}, \quad (10)$$

где L - индуктивность катушки, Гн; ω - частота, рад/с; r_n - общее сопротивление потерь в катушке, Ом.

Потери в катушке создаются в обмотке, каркасе и экране. Рас-

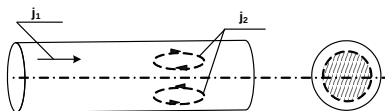


Рис. 1. Иллюстрация скин-эффекта

смотрим некоторые из них.

1. Скин - эффект

При прохождении высокочастотного тока магнитное поле тока J_1 наводит индуктивный ток J_2 , который на поверхности совпадает с током J_1 , а в объеме - противоположно направлен. Поэтому уменьшается действующее сечение проводника (см. рис.1, заштрихованная часть проводника).

2. Эффект близости

Если расстояние между витками большое, то поля соседних витков не влияют друг на друга. При сближении наблюдается процесс вытеснения тока к внутренним областям (рис. 2).

Увеличение диаметра d провода приводит к уменьшению омического (активного) сопротивления катушки, а также обусловленного действием магнитного поля внутри витка, но к росту сопротивления за счет эффекта «близости», обусловленного действием соседних витков. Поэтому существует оптимальное сечение провода при заданных габаритах катушки, значениях её индуктивности и рабочей частоты.

3. Сердечники.

Введение ферромагнитного сердечника позволяет увеличить индуктивность катушки:

$$L_c = L_{\mu c}. \quad (11)$$

При той же индуктивности можно уменьшить число витков. Сердечник вносит дополнительные потери, однако при определенных условиях добротность катушки возрастает, если индуктивное сопротивление растёт больше, чем потери, вносимые сердечником. В качестве

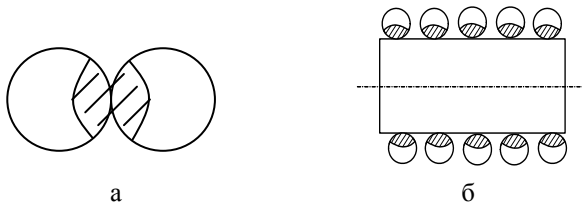


Рис. 2. Иллюстрация эффекта близости: а - в соседних витках;
б - в соседних слоях

сердечников используются ферромагнетики с высоким удельным сопротивлением (малы потери на вихревые токи). Это ферриты и магнитодиэлектрики.

Магнитодиэлектрики - композиционный материал, где наполнителем служит ферромагнитный порошок, а в качестве связующего звена - органический (фенолоформальдегидная смола, эпоксидная смола, полистирол) или неорганический (стёкла) изолятор. За счет высокого

сопротивления связующих веществ сопротивление сердечника очень высокое и потери на вихревые токи минимальны.

Добротность катушки с сердечником:

$$Q = \frac{\mu_c w L}{r_n + r_c}, \quad (12)$$

где r_c – сопротивление потерь, вносимых сердечником в катушку.

При $r_c \ll r_n$ добротность катушки при введении сердечника возрастает в μ_c раз. При увеличении частоты тока μ_c уменьшается, а потери растут. При некотором значении частоты

$$\frac{\mu_c}{1 + (r_c / r_n)} < 1 \quad (13)$$

добротность катушки уменьшается.

Собственная емкость катушек индуктивности (C_0) складывается из суммарных емкостей, существующих между отдельными витками, а также между витками и другими элементами конструкции катушки. Наименьшим значением C_0 обладают однослойные катушки.

Температурная стабильность параметров катушек индуктивности характеризуется температурным коэффициентом индуктивности (ТКИ). Значение ТКИ, как правило, положительное. ТКИ задается следующим соотношением:

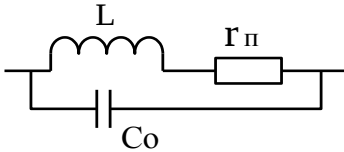
$$TKI = \frac{\Delta L}{L \cdot \Delta T}, \quad (14)$$

где ΔL – изменение значения индуктивности в диапазоне температур ΔT .

Увеличение индуктивности катушки при росте температуры определяется следующими явлениями:

- увеличиваются длина и диаметр каркаса, что приводит к изменению шага обмотки и диаметра витков;
- увеличиваются длина и диаметр провода обмотки, что приводит к тем же последствиям;
- увеличивается сопротивление провода обмотки, что может снижать добротность катушки;
- увеличиваются потери в материалах каркаса и изменяется его диэлектрическая проницаемость, что может изменять собственную емкость C_0 .

Все перечисленные явления приводят к изменениям индуктивности, добротности и собственной емкости катушек, что в большинстве случаев крайне нежелательно. Устранить или скомпенсировать действие этих дестабилизирующих факторов не представляется возможным, однако при рациональном выборе конструкции их действие можно свести к минимуму. Зависимость Q от температуры определяется температурным коэффициентом добротности $ТКД$.



(15)

$$ТКД = \frac{\Delta Q}{Q \cdot \Delta T}.$$

Рис. 3. Эквивалентная схема катушки

Практически величина добротности лежит в пределах от 10 до 200. Повышение добротности достигается оптимальным выбором диаметра провода, увеличе-

нием размеров катушки индуктивности и применением сердечников с высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями. С учетом потерь и собственной емкости катушку индуктивности можно представить в виде эквивалентной схемы, показанной на рис. 3. Сопротивление $г_p$ характеризует общие потери энергии в катушке индуктивности, вызванные различными факторами, а C_0 - собственную емкость катушки индуктивности.

1.2. Катушки индуктивности современной РЭА

Современная РЭА характеризуется повсеместной миниатюризацией и уменьшением массогабаритных характеристик. Широкое применение больших интегральных микросхем (БИС) позволило резко снизить размеры и массу большинства образцов РЭА. Применение поверхностного монтажа элементов и миниатюризация пассивных компонентов электронных устройств потребовали уменьшения размеров катушек индуктивности, соизмеримых по габаритным характеристикам с размерами основных элементов для поверхностного монтажа.

Обычно катушки индуктивности для поверхностного монтажа имеют три конструктивных разновидности: многослойные, толстопленочные и намотанные. На рис. 4 показан внешний вид малогабаритных ЧИП катушек.

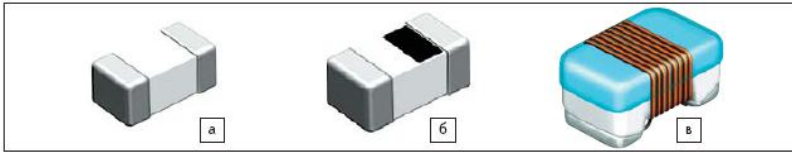


Рис. 4. Внешний вид ЧИП катушек индуктивности для поверхностного монтажа: а - многослойные индуктивности, б - толстопленочные индуктивности, в - намотанные индуктивности

Типичные варианты конструкций катушек индуктивности, например, компании MuRata показаны на рис. 5. Конструктивно катушки выполнены в четырех вариантах, схематично изображенных на рис. 5.

Катушки, представленные на рис. 5,а, содержат в конструкции сердечник из окиси алюминия с вертикальным расположением проводочной обмотки. Катушки такой конструкции являются высокочастотными и предназначены для работы на частотах до 6 ГГц. Эти конструкции отличаются высокой добротностью и большими токами.

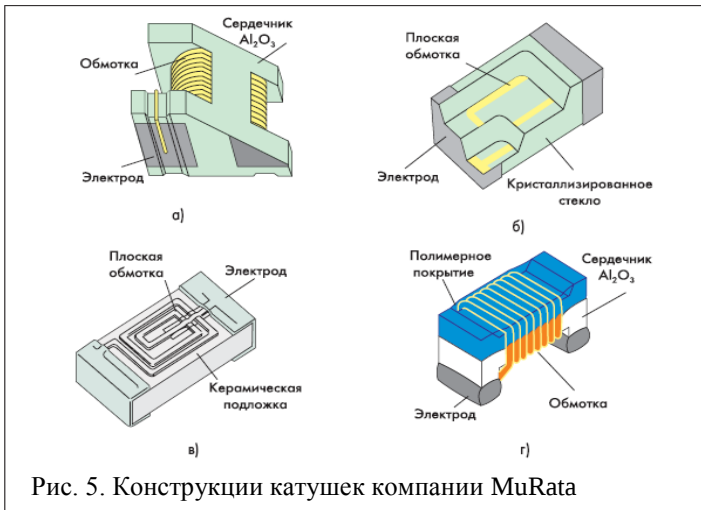


Рис. 5. Конструкции катушек компании MuRata

Катушки, приведенные на рис. 5,б, представляют собой многослойную конструкцию, где в качестве каркаса используют специальное стекло. Обмотка катушки в таком варианте выполнена пленочным проводником, нанесенным несколькими слоями внутри каркаса. Это позволяет получить катушку индуктивности для высокочастотного диапазона с малыми размерами корпуса и достаточно большими тока-

ми. Катушки, представленные на рис. 5,в, изготовлены на стеклянной основе однослойным пленочным проводником. Эти катушки обладают малыми отклонениями от номинала и имеют рекордно малые размеры (0,6х0,3х0,3 мм). Они предназначены для применения в сложной малогабаритной переносной РЭА, например такой, как мобильные телефоны.

Катушки, представленные на рис. 5,г, отличаются от других горизонтальной проволоочной обмоткой. При этом каркас катушки выполнен из окиси алюминия, а корпус сверху покрыт полимерным материалом, который защищает и фиксирует обмотку. Эти катушки допускают работу в диапазоне температур $-50...+120^{\circ}\text{C}$. Верхняя рабочая частота ограничена собственным резонансом катушки и для некоторых катушек составляет 11 – 18 ГГц.

Некоторые производители малогабаритных катушек используют в качестве каркаса высококачественную ферритовую керамику. В настоящее время различные производители выпускают широкую номенклатуру катушек индуктивности для поверхностного монтажа. Так, например, в табл. 2 представлены основные характеристики и внешний вид некоторых образцов катушек индуктивности компании SUMIDA

Таблица 2

Максимальные размеры, мм			Индуктивность, мкГн	Внешний вид
Высота	Длина	Ширина	Мин	
3,5	4,8	4,3	1	
4,8	6,1	5,5	10	
4,0	8,1	7,3	10	
5,5	10,4	9,6	10	
5,9	13,1	12,1	10	

В табл. 3 представлены основные параметры некоторых катушек индуктивности для поверхностного монтажа компании Yageo (ЧСР – частота собственного резонанса катушки).

Таблица 3

Се- рия	Индуктив- ность, L	Точ- ность, %	Доброт- ность, Q	ЧСР, мГц	Сопротивле- ние, Ом	Сила тока, мА
CL	0,047 – 18мкГн	10,20	25 –45	18 – 320	0,15 –0,75	5 –300
NL	0,1 – 1000мкГн	10,20	28 –50	2,5 – 700	0,44 –50	30 – 450
CLH	1,0 –470 нГ	5,10	8	1250 – 6000	0,1 –2,0	200,30 0
LCN	1,6 –270 нГ	5,10	16 –40	900 – 1250 0	0,03 –2,8	170 – 700

В табл. 4 представлены основные параметры некоторых СВЧ катушек индуктивности компании MuRata, выполненные по конструктивному варианту, показанному на рис. 5, а.

Таблица 4

Внешний вид	Индуктивность, нГн	Добротность	ЧСР, мГц	Сопротивление, Ом
	39 ± 5%	80	1700	0,09
	47 ± 5%	65	1600	0,23
	68 ± 5%	65	1200	0,23
	100 ± 5%	60	900	0,38
	150 ± 5%	35	350	0,26
	220 ± 5%	45	500	0,7

1.3. Метод измерения параметров катушек индуктивности

В лабораторной работе измерение основных параметров катушек индуктивности производится хорошо известным резонансным методом с применением прибора измерителя добротности, или Q-метра. Как следует из его названия, он может применяться для измерения добротности и обычно применяется при измерении добротности катушек индуктивности. Упрощенная схема Q-метра показана на рис. 6.

В приборе используется явление резонанса в последовательном

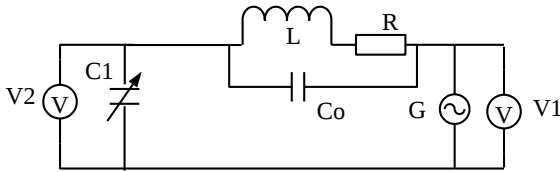


Рис. 6. Принципиальная схема измерителя добротности (Q-метра)

колебательном контуре. Этот контур сформирован исследуемой катушкой индуктивности L и образцовым (обычно воздушным) переменным конденсатором $C1$. На контур подается напряжение с высокочастотного генератора G , частоту f которого можно изменять в широких пределах. На определенной частоте f_0 сигнала генератора G , изменяя емкость конденсатора $C1$, контур настраивается в резонанс, который фиксируется по максимальному значению напряжения на вольтметре $V2$. Сопротивление R характеризует общие потери во всех элементах колебательного контура. В момент резонанса добротность контура Q определяется как отношение показаний вольтметров $V2$ и $V1$, т.е. $Q = V2/V1$. Если поддерживать напряжение генератора G на известном уровне (например, 1 В), то шкалу вольтметра $V2$ можно проградуировать прямо в значениях добротности Q . При предположении, что конденсатор $C1$ практически не имеет потерь, добротность в контуре при резонансе будет определять параметр Q катушки индуктивности.

Рассмотрим основные соотношения в системе катушка индуктивности со своей эквивалентной схемой (рис. 3) и последовательно включенным образцовым конденсатором $C1$. В этой системе возможны два вида резонанса - последовательный на частоте $F_{\text{пос}}$, определяемой соотношением

$$F_{\text{пос}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot (C_1 + C_0)}} , \quad (16)$$

и параллельный на частоте $F_{\text{пар}}$, определяемой соотношением

$$F_{\text{пар}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_0}} . \quad (17)$$

Параллельный резонанс – это собственный резонанс катушки индуктивности, обусловленный собственной емкостью C_0 . На частоте собственного резонанса добротность катушки индуктивности максимальна. После частоты собственного резонанса добротность катушки индуктивности резко падает из-за влияния собственной емкости катушки, поэтому катушки индуктивности практически не используют

на частотах выше частоты собственного резонанса.

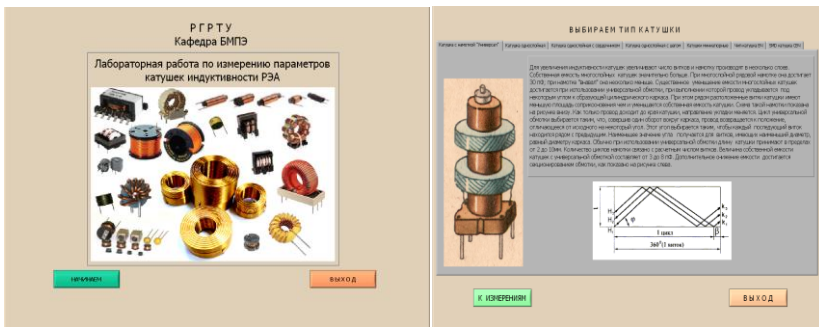
Последовательный резонанс в контуре Q-метра происходит на более низкой частоте, чем параллельный. Добротность всего контура при этом практически соответствует добротности исследуемой катушки, если не учитывать потери в конденсаторе C_1 . При $C_1 \gg C_0$, как обычно и бывает, можно по формуле (16) определить индуктивность исследуемой катушки.

Используя соотношение (17) можно определить собственную емкость катушки индуктивности, построив график зависимости добротности от частоты и определить частоту максимального значения добротности катушки.

2. Выполнение лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения резонансным методом параметров катушек индуктивности с использованием прибора – измерителя добротности (Q-метра). Для этого используется специальная программа, выполняемая на персональном компьютере (ПК). В эту программу заложены модели изменения характеристик ряда катушек индуктивности, в зависимости от изменения параметров окружающей среды и внешних воздействий, а также используется модель прибора Q-метр. При подготовке к работе необходимо изучить методические указания к лабораторной работе.

Для начала работы необходимо запустить файл «Лабор_индукт» на Рабочем столе ПК, после чего появится окно, изображенное на рис.7,а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и кнопки управления, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, приме-



а

б

Рис. 7. Вид рабочих окон программы: а - вид окна начала работы с программой; б - вид окна выбора катушки индуктивности для исследования

няемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора типа катушки индуктивности, как показано на рис. 7,б.

Выбор катушки индуктивности осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием. На закладке представлены описание и некоторые характеристики выбранной катушки индуктивности.

3. Проведение измерений

После щелчка по кнопке «К измерениям» открывается окно измерения добротности катушки индуктивности прибором Q-метр, показанное на рис. 8. В этом окне отображаются прибор - измеритель добротности и измерительная камера с образцом катушки. Здесь же отображается схема подключения исследуемой катушки индуктивности.

Необходимо включить прибор щелчком по тумблеру «Сеть». По



Рис. 8. Окно управления прибором Q-метр

умолчанию в измерительной камере установлена температура 20 °C. Измерение добротности катушки необходимо производить в следующей последовательности.

1. Установить необходимую частоту генератора, используя кнопки выбора диапазона и движок на шкале плавного изменения частоты.
2. Ручкой под стрелочным индикатором «Уровень» установить стрелку на шкале прибора на «1».
3. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру» и в окно «Задат-

чик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и щелкнуть по кнопке «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере и перейти к измерениям.

4. Изменяя значение емкости переменного конденсатора по шкалам «Емкость грубо», «Емкость средне» и «Емкость плавно», по стрелочному прибору «Добротность» добиться резонанса в колебательном контуре по максимальному отклонению стрелки прибора. Записать в черновике значение температуры, частоты измерительного сигнала, значения добротности Q_1 с цифрового индикатора внизу стрелочного прибора и значение емкости переменного конденсатора C_1 . Емкость конденсатора в пикофарадах определяется суммированием значений цифровых индикаторов под соответствующими шкалами изменения емкости переменного конденсатора.

5. Изменить частоту сигнала и произвести новые измерения как в п. 4.

6. При необходимости изменить температуру в камере как в п. 3.

7. При необходимости выбрать другую катушку, используя кнопку «Заменить катушку».

4. Последовательность выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на исследование конкретной катушки индуктивности в указанном диапазоне температур и частот.

2. Для каждого значения температуры провести измерения Q_1 , C_1 на фиксированной частоте и полученные значения занести в таблицу, пример которой показан ниже. Рекомендуется начать с температуры в измерительной камере 20 °С.

Темпер.	Частота	Q_1	C_1	L	r_{Π}	μ_c

3. Рассчитать значения L для исследуемых катушек, используя формулу (16), и построить графики зависимости добротности и индуктивности от частоты при температуре 20 °С.

4. Рассчитать значение сопротивления потерь r_{Π} катушки, используя формулу (10), и построить график зависимости r_{Π} от частоты.

5. На частоте, указанной преподавателем, определить среднее значение ТКИ и ТКД по формулам (14) и (15).

6. В случае исследования катушки с магнитным сердечником дополнительно рассчитать значение μ_c , используя формулу (5), и занести данные в дополнительный столбец таблицы. Построить зависимость μ_c от температуры при фиксированной частоте.

5. Содержание отчета

1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.
2. Отчет должен содержать:
 - название работы;
 - цель работы;
 - основные теоретические сведения;
 - конструктивные особенности исследуемых катушек;
 - схемы измерения;
 - полученные расчетные данные;
 - необходимые графики, требуемые по заданию.

6. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Назначение катушек индуктивности при использовании их в РЭА.
2. От чего зависит величина индуктивности катушки?
3. Назовите основные классические конструкции катушек индуктивности.
4. Перечислите основные параметры катушек индуктивности.
5. Что такое собственная емкость катушки индуктивности и от чего она появляется?
6. Какие способы уменьшения собственной емкости катушки вы знаете?
7. Нарисуйте эквивалентную схему катушки индуктивности и объясните назначение ее элементов.
8. Зачем в катушку индуктивности помещают магнитный сердечник и на какие параметры катушки индуктивности он влияет?
9. Что такое ТКИ и как он определяется?
10. Что такое ТКД и как он определяется?
11. Что такое собственный резонанс катушки индуктивности?
12. Что такое собственное сопротивление катушки и из чего оно состоит?
13. Как каркас катушки влияет на ее параметры?
14. Какие конструкции современных катушек индуктивности используют для поверхностного монтажа?
15. Что такое ЧИП катушки и как конструктивно они выполнены?

Библиографический список

1. Покровский Ф.Н. Материалы и компоненты радиоэлектронных средств: учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005.- 350 с.: ил.

2. Пасынков В. В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. - М.: Высшая школа, 1986. - С. 325-359.

3. Электрорадиоматериалы / под ред. Б. М. Тареева. - М.: Высшая школа, 1978. - С. 122 – 130.

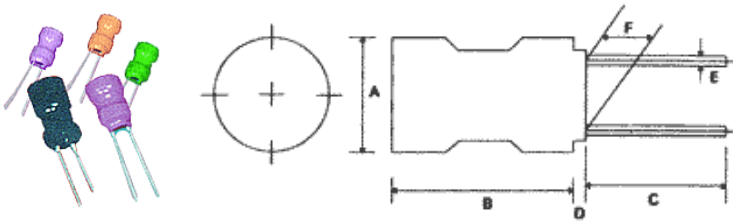
4. Справочник по схемотехнике для радиолюбителя /под ред. В.П.Боровского.- Киев: Техника, 1987.- 431 с.

5. Справочник по электротехническим материалам. В 3 т /под ред. Ю.В. Корицкого и др. Т. 1. изд. 2-е, перераб.- М.: Энергия, 1974. - 584 с., ил.

6. Справочник по электротехническим материалам. В 3 т под ред. Ю.В. Корицкого и др. Т. 3. изд. 2-е, перераб.- М.: Энергия, 1974. - 896 с., ил.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Параметры и характеристики некоторых малогабаритных катушек индуктивности отечественных производителей



Индуктивность РК0406

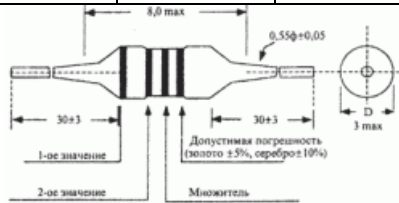
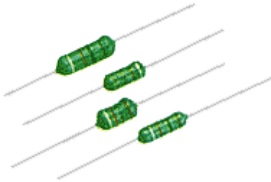
Ана-
КИГ

A (макс)	B (макс)	C (мин)	D (макс)	E (± 0.05)	F (макс)
5.0	8.0	15.0	3.0	0.55	2.0 ± 0.5

лог

Тип	Индуктивность, мкГн	Добротность, Q, мин	Резонансная частота, МГц, мин	Активное со- противление, Ом, макс
РК0406- 1R0M- S0	1.0	130	120	0.035
РК0406- 4R7M- S0	4,7	100	50	0,140
РК0406- 6R8M-	6,8	100	30	0,15

S0				
PK0406-100M-S0	10	80	20	0,23
PK0406-220K-S0	22	80	10	0,45



Индуктивность ЕС24

Аналоги ДПМ, ДМ

Система обозначений

ЕС	24-	330	K-	T5	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)

- (1) Тип**
(2) Форма
(3) Индуктивность
(4) Точность
(5) Вид формовки
(6) "А" -- упаковка в ленте

Цвет	Значение	Множитель	Точность, %
Черный	0	1	-
Коричневый	1	10	-
Красный	2	100	-
Оранжевый	3	1000	-
Желтый	4	-	-
Зеленый	5	-	-
Голубой	6	-	-
Фиолетовый	7	-	-
Серый	8	-	-
Белый	9	-	-
Черный	-	-	±20
Серебряный	-	0.01	±10
Золотой	-	0.1	±5

Тип	Индуктивность, мкГн	Точность, %	Добротность, Q, мин	Тестовая частота, МГц	Резонансная частота, МГц, мин	Активное сопротивление, макс, Ом
EC24-R027M-CC	0.027	M(±20%) [K(±10%)]	40	50.0	500	0.02
EC24-R033M-CC	0.033	M(±20%) [K(±10%)]	40	50.0	490	0.02
EC24-R039M-CC	0.039	M(±20%) [K(±10%)]	40	50.0	480	0.02

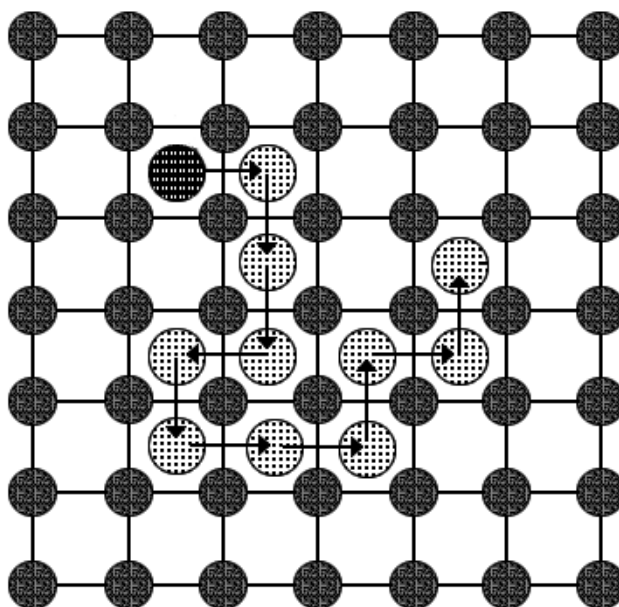
Тип	Индук- тивность, мкГн	Точность, %	Доброт- ность, Q, мин	Тестовая частота, МГц	Резонансная частота, МГц, мин	Активное со- противление, макс, Ом
EC24- R33K	0.33	M($\pm 20\%$) [K($\pm 10\%$)]	40	25.2	350	0.16
EC24- R39K	0.39	M($\pm 20\%$) [K($\pm 10\%$)]	40	25.2	320	0.18
EC24- R47K	0.47	M($\pm 20\%$) [K($\pm 10\%$)]	40	25.2	300	0.26
EC24- R56K	0.56	M($\pm 20\%$) [K($\pm 10\%$)]	40	25.2	280	0.38
EC24- R68K	0.68	M($\pm 20\%$) [K($\pm 10\%$)]	40	25.2	250	0.42
EC24- R82K	0.82	M($\pm 20\%$) [K($\pm 10\%$)]	40	25.2	200	0.55
EC24- 150K	15	K($\pm 10\%$) [J($\pm 5\%$)]	50	2.52	16	0.88
EC24- 180K	18	K($\pm 10\%$) [J($\pm 5\%$)]	50	2.52	15	1.00
EC24- 220K	22	K($\pm 10\%$) [J($\pm 5\%$)]	60	2.52	13	1.20
EC24- 270K	27	K($\pm 10\%$) [J($\pm 5\%$)]	60	2.52	11	1.35
EC24- 330K	33	K($\pm 10\%$) [J($\pm 5\%$)]	50	2.52	10	1.50
EC24- 390K	39	K($\pm 10\%$) [J($\pm 5\%$)]	50	2.52	9.5	1.70
EC24- 470K	47	K($\pm 10\%$) [J($\pm 5\%$)]	50	2.52	8.5	2.30

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

ЧАСТЬ 1

Методические указания к лабораторным работам



Рязань 2012

УДК 621.3

Технология материалов электронной техники. Часть 1: методические указания к лабораторным работам / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: А.П. Авачёв, М.В. Зубков, С.А. Кострюков, В.Г. Мишустин. Рязань, 2012. 24 с.

Рассматриваются лабораторные работы по курсу «Технология материалов электронной техники».

Предназначены студентам направления 200100 – «Электроника и микроэлектроника».

Табл. 6. Ил. 3. Библиогр.: 4 назв.

Диффузия, ионная имплантация, глубина залегания перехода, загонка примеси, разгонка примеси, каналирование, доза ионов

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра биомедицинской и полупроводниковой электроники РГРТУ (зав. кафедрой проф. С.П. Вихров)

Лабораторная работа № 1 РАСЧЕТ ДИФФУЗИОННЫХ СТРУКТУР

Цель работы

Изучить процессы диффузии, исследовать зависимости профиля распределения концентрации примеси от параметров диффузии.

1. Краткие теоретические сведения

Диффузия легирующих примесей в полупроводниковые монокристаллические подложки является основным методом формирования р-п-переходов в дискретных приборах и интегральных микросхемах (ИМС). Помимо р-п-переходов, с помощью процессов диффузии создаются резистивные слои, емкости, высоколегированные проводящие слои. Метод диффузии состоит в миграции через кристалл, нагретый до температуры порядка 1000 °С, легирующих атомов в сторону уменьшения их концентрации. При указанной температуре тепловые колебания кристаллической решетки полупроводника становятся столь значительными, что некоторые атомы основного вещества покидают узлы решетки, образуя точечные дефекты: вакансии и междоузлия. Атомы примеси перемещаются по вакансиям в кристалле в сторону уменьшения концентрации. Следовательно, различают два основных вида диффузии: соответственно диффузию замещения и диффузию внедрения. Скорость распространения атомов при диффузии по типу внедрения, как правило, больше, так как междоузлия свободны, а для осуществления замещения приходится ждать образования вакансий. Кроме того, в некоторых случаях имеют место и другие механизмы диффузии: эстафетный, краудинговый. Теоретически следует учитывать комбинацию указанных видов диффузии. Некая доля примеси совершает диффузию внедрения, а остальная часть – диффузию замещения. Экспериментально установлено, что, например, в кремнии диффузия основных легирующих примесей (бор, фосфор) совершается, как правило, по вакансиям, тогда как прочих примесей – по междоузлиям. Кроме того, диффузия внедрения наиболее вероятна в случае диффузии атомов малых размеров.

В основу теории диффузии положена аналогия между процессами переноса вещества в жидких растворах и тепла за счет теплопроводности. Скорость переноса вещества через сечение единичной площади J , или диффузионный поток, описывается следующим уравнением:

$$J = -D[C(x, t)/x], \quad (1.1)$$

где C – концентрация растворенного вещества, которая, как предполагается, зависит только от x и t ; x – ось координат, совпадающая с направлением потока вещества; t и D – соответственно время и коэффициент диффузии. Знак минус в правой части (1.1) означает, что перенос вещества осуществляется в направлении уменьшения концентрации. Уравнение (1.1) называют первым законом Фика. Предполагая равновероятное перемещение атомов легирующей примеси во всех направлениях в кристалле, (1.1) записывают в виде:

$$\partial C(x, t)/\partial t = D \left[\partial^2 C(x, t)/\partial x^2 \right]. \quad (1.2)$$

Уравнение (1.2) называют вторым законом Фика. Общее решение (1.2) имеет сложный вид. Однако при введении определенных начальных и граничных условий решение упрощается. В полупроводниковой технологии наибольший интерес представляют два случая распределения примесных атомов.

1.1. Диффузия из бесконечного источника

Под термином «бесконечный источник» следует понимать источник с постоянной во времени концентрацией примеси C . Таким бесконечным источником может быть газовая фаза при диффузии в открытой трубе. Начальные и граничные условия можно записать:

- 1) $C(x, 0) = 0$,
- 2) $C(0, t) = C_0$,
- 3) $C(\infty, t) = 0$.

При этих условиях решение уравнения (1.2) имеет вид:

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right), \quad (1.3)$$

где erf – сокращенное обозначение функции ошибок Гаусса (от английского *error function*); x – глубина, соответствующая заданной концентрации, см; t – длительность диффузии, с. В этом уравнении коэффициент диффузии D имеет размерность $\text{см}^2/\text{с}$, а поверхностная концентрация C_0 – см^{-3} .

$$\operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}} \exp(-t^2) dt.$$

Уравнение (1.3) может быть переписано в виде:

$$C(x, t) = C_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right), \quad (1.4)$$

где $\operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} = 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$ – дополнительная до единицы функция ошибок Гаусса.

Вместо erfc -функции можно использовать аппроксимацию:

$$\operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \approx \exp \left[\left(-\frac{x}{2\sqrt{Dt}} + 0.3 \right)^2 \right]. \quad (1.5)$$

График функции (1.4) представлен на рис. 1.1. Глубина, отсчитываемая от $x = 0$, на которой концентрация диффундирующей примеси равняется концентрации примеси в исходной пластине полупроводника (C_B), называется глубиной залегания р-п-перехода x_j (рис. 1.1). При диффузии из бесконечного источника глубина залегания р-п-перехода рассчитывается по формуле (1.6).

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \left(\sqrt{\ln(C_0/C_B)} - 0.3 \right). \quad (1.6)$$

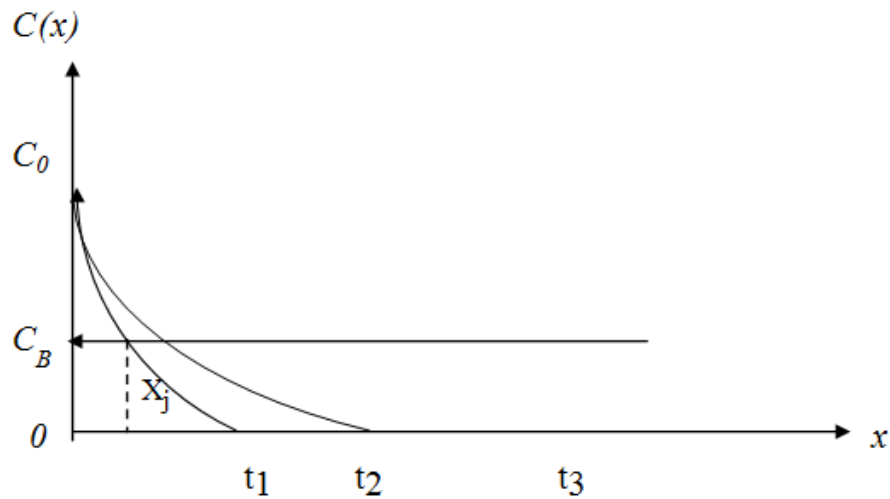


Рис. 1.1. Распределение примеси и определение глубины залегания р-п-перехода

1.2. Диффузия из источника с ограниченным содержанием примеси

Термин «ограниченное содержание примеси» означает, что перед началом диффузии на поверхности полупроводниковой пластины в бесконечно тонком слое содержится заданное количество атомов легирующей примеси N (см⁻²). Причем обеспечивается условие, препятствующее испарению примеси с поверхности, так как диффузия осуществляется при высоких температурах. Примером этого является диффузия в кремний из тонкого поверхностного слоя, защищенного пленкой SiO₂, которая представляет собой отражающую границу. Используя начальные и граничные условия

$$1) C(x, 0) = 0,$$

$$2) C(x, \infty) = 0,$$

$$3) N = \int_0^{\infty} C(x) dx,$$

получают:

$$C(x, t) = \frac{N}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right), \quad (1.7)$$

$$C_0 = \frac{N}{\sqrt{\pi Dt}}. \quad (1.8)$$

Полагая $x = 0$, определяют величину поверхностной концентрации:

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \sqrt{\ln(C_0/C_B)}. \quad (1.9)$$

Уравнение (1.8) называют гауссовым распределением. Глубина залегания р-п-перехода для этого случая:

$$x_j \approx 6\sqrt{Dt}. \quad (1.10)$$

1.3. Двухстадийная диффузия

В планарной технологии ИМС, при создании базовых областей биполярных транзисторов, диффузию проводят в две стадии. Вначале в течение короткого времени t_1 при температуре T_1 , лежащей в пределах 900-1000 °С, осуществляют загонку примеси, представляющую собой диффузию из бесконечного источника с постоянной поверхностной концентрацией C_{01} . Тонкий диффузионный слой, сформированный на первой стадии диффузии, является источником с ограниченным содержанием примеси для второй стадии – разгонки. Разгонку проводят при более высокой температуре T_2 порядка 1150 °С и времени t_2 . Температура T_1 задает коэффициент диффузии примеси D_1 и поверхностную концентрацию C_{01} , определяемую предельной растворимостью примеси. Зависимость предельной растворимости основных легирующих примесей в кремнии от температуры приведена на рис. 1.2.

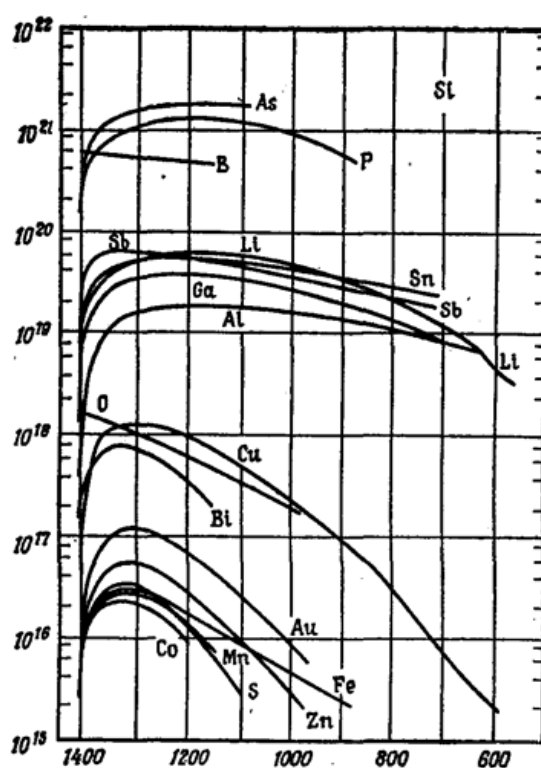


Рис. 1.2. Зависимость предельной растворимости основных легирующих примесей в кремнии от температуры

Необходимым условием двухстадийной диффузии является соблюдение неравенства $D_2 t_2 \gg D_1 t_1$, что обеспечивается правильным выбором четырех основных параметров процесса: t_1 , T_1 , t_2 , T_2 . Введенное при загонке количество примесных атомов N (см⁻²) определяют интегрированием (1.4) в пределах от 0 до ∞ .

Распределение примеси после разгонки определяется выражением

$$C(x, t) = \frac{N}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \exp \left[-\frac{x^2}{4D_2 t_2} \right], \quad (1.11)$$

$$N = 2C_{01} \sqrt{D_1 t_1 / \pi}, \quad (1.12)$$

где D_2 – коэффициент диффузии примеси при температуре разгонки T_2 . Если условие $D_1 t_1 \ll D_2 t_2$ не выполняется, при расчетах используют комбинированное распределение примеси, которое имеет вид:

$$C(x, t_1, t_2) = \frac{2C_{01}}{\pi} \int_{\sqrt{z}}^{\infty} \exp(-y^2) \operatorname{erf}(ay) dy, \quad (1.13)$$

$$z = \frac{x^2}{4(D_1 t_1 + D_2 t_2)},$$

$$a = \sqrt{D_1 t_1 / D_2 t_2}. \quad (1.14)$$

Поверхностная концентрация C_{02} после разгонки рассчитывается по формуле:

$$C_{02} = \frac{2}{\pi} C_{01} \operatorname{arctg}(a). \quad (1.15)$$

2. Порядок выполнения работы

1. Диффузия из источника с бесконечным содержанием примеси

Используя данные табл. 1.1, построить распределение примеси и рассчитать глубину залегания р-п-перехода. Сравнить полученную аналитически глубину залегания р-п-перехода и значение, полученное из графика. Рассчитать поверхностное сопротивление диффузионного слоя. Расчёт проводится в программе MathCad.

Таблица 1.1

№ задания	t , ч	T , °C	ρ , Ом·см	Si	Примесь
1	1	1000	4	n	B
2	0.5	1100	10	p	P
3	1.3	900	20	n	Al
4	2	900	2	p	Sb
5	2.5	1000	1	p	P
6	1.2	1100	8	n	B
7	1.6	1050	10	n	B
8	2.2	1000	14	p	Sb
9	3	900	20	n	B
10	2.6	1000	2	p	P
11	1.8	1100	10	n	Al
12	2.1	900	4	p	Sb
13	2	1000	16	n	B
14	1.5	1100	8	p	P

Окончание таблицы 1.1

15	2.8	900	4	n	B
----	-----	-----	---	---	---

16	2.6	1000	20	p	Sb
17	2.4	1000	14	n	Al
18	1.2	1100	6	p	P
19	0.8	1100	10	n	B
20	2.5	1000	4	p	Sb

2. Диффузия из источника с ограниченным содержанием примеси

Используя данные табл. 1.2, построить распределение примеси и рассчитать глубину залегания р-п-перехода. Сравнить полученную аналитически глубину залегания р-п-перехода и значение, полученное из графика. Рассчитать поверхностное сопротивление диффузионного слоя. Результаты расчетов и графическую зависимость концентрации примеси представить преподавателю.

Таблица 1.2

№ задания	$T, ^\circ\text{C}$	$t, \text{ч}$	$N, \text{см}^{-2}$	$\rho, \text{Ом}\cdot\text{см}$	Si	Примесь
1	1000	1	$1 \cdot 10^{14}$	10	n	B
2	1100	1.5	$1 \cdot 10^{14}$	4	p	P
3	1000	2.0	$2 \cdot 10^{14}$	8	n	B
4	1100	1.2	$1 \cdot 10^{14}$	12	p	P
5	1050	2.2	$1 \cdot 10^{14}$	20	p	P
6	1000	1.5	$5 \cdot 10^{14}$	18	n	B
7	950	3.0	$1 \cdot 10^{14}$	2	p	As
8	1100	1.0	$1 \cdot 10^{14}$	6	p	P
9	1150	1.8	$4 \cdot 10^{14}$	4	n	B
10	1000	3.0	$1 \cdot 10^{14}$	10	n	B
11	1100	2.6	$1 \cdot 10^{14}$	12	n	B
12	1050	1.8	$5 \cdot 10^{14}$	16	p	As
13	950	3.5	$1 \cdot 10^{14}$	20	n	B
14	1000	2.5	$1 \cdot 10^{14}$	20	p	P
15	1100	2.0	$1 \cdot 10^{14}$	10	p	As
16	1150	4.0	$2 \cdot 10^{14}$	20	n	B
17	950	4.0	$1 \cdot 10^{14}$	20	p	As
18	1000	3.5	$8 \cdot 10^{14}$	18	n	B
19	1100	2.5	$1 \cdot 10^{14}$	10	p	P
20	1150	1.8	$5 \cdot 10^{14}$	10	n	B

3. Двухстадийная диффузия

Используя данные табл. 1.3, построить распределение примеси и рассчитать глубину залегания р-п-перехода. Рассчитать поверхностное сопротивление диффузионного слоя. Результаты расчета и графическую зависимость распределения примеси представить преподавателю.

Таблица 1.3

№ задания	$T_{\text{заг}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{раз}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{заг}}, \text{ч}$	$t_{\text{раз}}, \text{ч}$	$\rho, \text{Ом}\cdot\text{см}$	Si	Примесь
1	1000	1100	0.5	2.0	10	n	B
2	900	1000	1.0	1.5	4	p	As
3	1000	1000	0.5	3.0	4	p	P
4	1100	1150	1.0	3.0	15	n	B
5	900	1100	1.0	1.5	6	n	B
6	950	1000	1.0	3.0	8	p	As
7	1000	1150	1.0	3.0	10	p	P
8	1000	1100	1.2	2.0	4	n	B
9	950	1100	1.0	1.5	4	p	As
10	1000	1100	1.0	2.0	8	n	B
11	1100	1200	1.0	2.0	12	p	P
12	1100	1200	0.5	1.0	12	n	B
13	1000	1100	1.0	3.0	20	p	As
14	950	1100	2.0	3.0	10	n	B
15	1000	1200	2.0	2.0	20	n	B
16	1000	1000	1.5	4.0	18	p	P
17	1000	1100	1.0	2.5	14	p	As
18	950	1100	2.0	2.5	20	p	P
19	1000	1100	1.0	2.5	10	n	B
20	1100	1200	1.0	2.0	4	n	B

Ниже представлены результаты расчёта в программе MathCad.

1. Диффузия из бесконечного источника

Подложка кремния р-типа имеет удельное сопротивление

$$\rho = 2 \text{ Ом}\cdot\text{см},$$

тогда концентрация примеси в этой подложке:

$$C_{\text{ф}} = \frac{1}{\rho \cdot q \cdot \mu_{\text{p}}}; \quad C_{\text{ф}} = 6.002 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

Предельная растворимость Sb в кремнии при температуре 900 °C:

$$C_{\text{с}} = 2.58 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}.$$

Рассчитаем коэффициент диффузии:

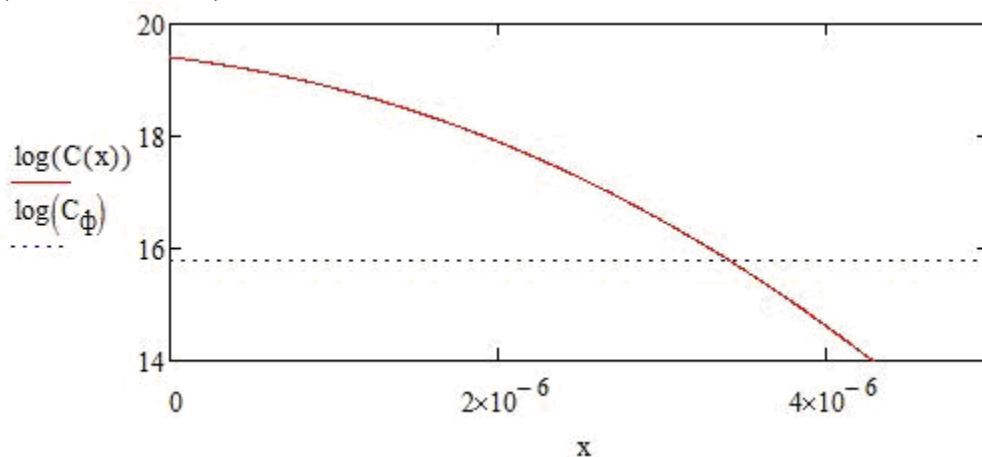
$$D_0 = 5.6 \text{ см}^2/\text{с}$$

$$\Delta E_a = 3.95 \text{ эВ}$$

$$D(T) = D_0 \cdot e^{-\frac{\Delta E_a}{k \cdot T}} \text{ см}^2/\text{с}$$

$$C(x, t, T) = C_s \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D(T) \cdot t}}\right) \text{ см}^3$$

$$C(x) = C(x, 7200, 1173) \text{ см}^{-3}$$



$$tx = 4 \cdot 10^{-6}$$

Given

$$C(tx) = C_\phi$$

$$x_j = \operatorname{Minerr}(tx) \quad x_j = 3.414 \times 10^{-6} \text{ см.}$$

Подвижность основных носителей заряда в слое:

$$C(x) = C(x) - C_\phi$$

$$\mu_{\max} = 1416 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$\mu_{\min} = 60.5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$\alpha = 0.719$$

$$C_0 = 9.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$$

$$\mu(x) = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{1 + \left(\frac{C(x)}{C_0}\right)^\alpha}$$

Средняя проводимость равна:

$$\sigma = \frac{q}{x_j} \int_0^{x_j} \mu(x) \cdot C(x) dx$$

$$\sigma = 96.688 \text{ 1/Ом} \cdot \text{м.}$$

Величина поверхностного сопротивления:

$$R_s = \frac{1}{\sigma \cdot x_j}$$

$$R_s = 3029 \text{ Ом/м.}$$

2. Диффузия из источника с ограниченным содержанием примеси

Подложка кремния р-типа имеет удельное сопротивление

$$\rho = 12 \text{ Ом·см,}$$

тогда концентрация примеси в этой подложке:

$$C_{\phi} = \frac{1}{\rho \cdot q \cdot \mu_p}; \quad C_{\phi} = 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

Рассчитаем коэффициент диффузии:

$$D_0 = 3.85 \text{ см}^2/\text{с}$$

$$\Delta E_a = 3.66 \text{ эВ}$$

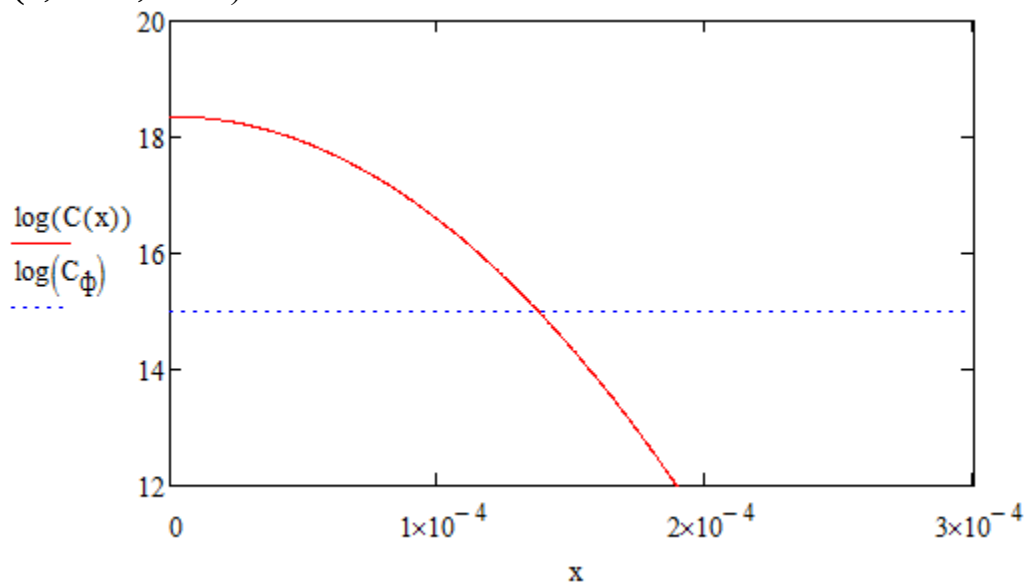
$$D(T) = D_0 \cdot e^{-\frac{\Delta E_a}{k \cdot T}} \text{ см}^2/\text{с.}$$

Концентрация примеси в источнике:

$$Q = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$$

$$C(x, t, T) = \frac{Q}{\sqrt{\pi \cdot D(T) \cdot t}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4 \cdot D(T) \cdot t}} \text{ см}^{-3}$$

$$C(x) = C(x, 4320, 1373) \text{ см}^{-3}$$



$$tx = 1 \cdot 10^{-4}$$

Given

$$C(tx) = C_{\phi}$$

$$x_j = \text{Minerr}(tx) \quad x_j = 1.375 \times 10^{-4} \text{ см.}$$

Подвижность основных носителей заряда в слое:

$$C(x) = C(x) - C_{\phi}$$

$$\mu_{\max} = 1414 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$\mu_{\min} = 52.5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$\alpha = 0.719$$

$$C_0 = 9.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$$

$$\mu(x) = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{1 + \left(\frac{C(x)}{C_0} \right)^\alpha}.$$

Средняя проводимость равна:

$$\sigma = \frac{q}{x_j} \int_0^{x_j} \mu(x) \cdot C(x) dx$$

$$\sigma = 27.429 \text{ 1/Ом} \cdot \text{м}.$$

Величина поверхностного сопротивления:

$$R_s = \frac{1}{\sigma \cdot x_j}$$

$$R_s = 265.243 \text{ Ом/м}.$$

3. Двухстадийная диффузия

Подложка кремния n-типа имеет удельное сопротивление

$$\rho = 15 \text{ Ом} \cdot \text{см},$$

тогда концентрация примеси в этой подложке:

$$C_\phi = \frac{1}{\rho \cdot q \cdot \mu_n}; \quad C_\phi = 2.943 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}.$$

Предельная растворимость В в кремнии при температуре 1100 °С:

$$C_s = 4.4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}.$$

Коэффициент диффузии атомов бора в кремнии:

$$D_0 = 10.5 \text{ см}^2/\text{с}$$

$$\Delta E_a = 3.69 \text{ эВ}$$

$$D(T) = D_0 \cdot e^{-\frac{\Delta E_a}{k \cdot T}} \text{ см}^2/\text{с}.$$

Параметры процесса диффузии:

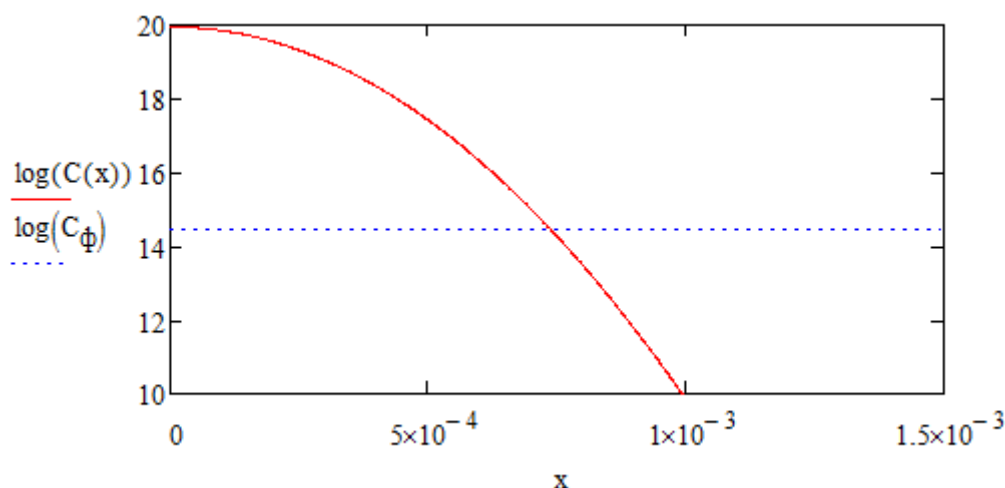
$$T_{\text{заг}} = 1373 \text{ К} \quad t_{\text{заг}} = 3600 \text{ с}$$

$$T_{\text{раз}} = 1423 \text{ К} \quad t_{\text{раз}} = 10800 \text{ с}$$

$$Dt = D(T_{\text{заг}}) \cdot t_{\text{заг}} + D(T_{\text{раз}}) \cdot t_{\text{раз}}.$$

Распределение концентрации примет вид:

$$C(x) = \frac{2}{\pi} \cdot C_s \cdot \sqrt{\frac{D(T_{\text{заг}}) \cdot t_{\text{заг}}}{Dt}} \cdot \exp \left[- \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{Dt}} \right)^2 \right].$$



3. Контрольные вопросы

1. Чем определяется поверхностная концентрация примеси?
2. От каких параметров зависит глубина залегания эмиттерного перехода?
3. От каких параметров зависит коэффициент диффузии?
4. Из каких основных элементов состоит установка для проведения диффузии?
5. От чего зависит скорость процесса диффузии?

Лабораторная работа № 2 ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ

Цель работы

Изучить процессы ионной имплантации. По заданному варианту произвести расчёт профиля распределения примеси.

1. Краткие теоретические сведения

1.1. Метод ионной имплантации

Метод ионной имплантации состоит в бомбардировке пучками ускоренных ионов с энергиями от 10 кэВ до 1 МэВ твердых тел с целью изменения их свойств и структуры.

Основные явления при имплантации. Ускоренные ионы проникают в кристаллическую решетку, преодолевая отталкивающее противодействие положительных зарядов ядер атомов. Глубина проникновения ионов возрастает с увеличением их энергии. Легкие ионы проникают более глубоко, чем тяжелые, однако траектории движения тяжелых ионов более прямолинейны. При точной ориентации направления падения пучка ионов вдоль одной из кристаллографических осей пластины полупроводника – (110) или (111) – часть ионов движется вдоль атомных рядов, между которыми имеются достаточно широкие каналы, свободные от атомов. Это явление называют каналированием. Попадая в канал, ионы испытывают менее сильное торможение и проникают в несколько раз глубже, чем

в случае неориентированного внедрения. Если энергия, переданная атому решетки, превышает энергию связи атомов в твердом теле, то атом покидает узел. В результате образуется пара Френкеля – дефект, состоящий из вакансии и междоузельного атома. Атомы, находящиеся в поверхностном слое, получив энергию от иона, могут отрываться от кристалла – происходит процесс распыления и образуется дефект по Шоттки – вакансии в приповерхностной области кристалла. Энергия первично смещенного атома, называемого атомом отдачи, сравнительно велика, поэтому на пути своего движения атом отдачи образует целый каскад смещений, вследствие чего в кристалле возникают отдельные разупорядоченные зоны размером 3–10 нм. По мере имплантации ионов идет накопление радиационных дефектов. Когда плотность ионов, внедренных на единице поверхности, превосходит критическую, называемую дозой аморфизации, образуется сплошной аморфный слой. Внедренный ион может попасть в вакантный узел, став донором или акцептором, но вероятность замещения узлов мала. Большинство внедренных ионов находится в междоузлиях, где они не являются электрически активными. Для перевода их в узлы и восстановления кристаллической структуры полупроводника производят отжиг. В процессе отжига происходят распад и аннигиляция радиационных дефектов, а внедренные примеси занимают вакантные узлы, в результате чего образуется слой с электропроводностью р- или n-типа.

Средний полный пробег иона. Глубина проникновения иона в вещество характеризуется пробегом. Траектории отдельных ионов в кристалле подобны ломаным линиям, каждый прямолинейный участок и полная длина которых отличаются друг от друга. Вся совокупность пробегов отдельных ионов группируется по закону нормального распределения случайной величины со значением среднего полного пробега R и среднеквадратичным отклонением пробега ΔR . Практическую важность имеет средний нормальный пробег R_p – проекция траектории среднего полного пробега на направление первоначальной скорости иона и его среднеквадратичное отклонение ΔR_p . Для расчета среднего полного пробега R (см) иона с энергией E (эВ) используют формулы:

$$R = \rho / L, \quad (2.1)$$

$$\rho = \frac{2}{k} \varepsilon^{1/2} \left(1 + \frac{\varepsilon k}{3\beta} \right) - \frac{2c/k}{k\sqrt{c/k+d}} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{\varepsilon}{c/k+d}} \right), \quad (2.2)$$

$$\varepsilon = FE, \quad (2.3)$$

$$L = \pi a^2 \gamma N_2, F = \frac{6.9 \cdot 10^6 a M_2}{Z_1 Z_2 (M_1 + M_2)}, \quad (2.4)$$

где L – нормирующий множитель пробега, см⁻¹; F – нормирующий множитель энергии, эВ⁻¹.

Радиус экранирования заряда ядра атомными электронами (см):

$$a = \frac{4.7 \cdot 10^{-9}}{\left(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3} \right)^{1/2}}. \quad (2.5)$$

Коэффициент передачи ионом с массой M_1 атому с массой M_2 максимально возможной энергии при лобовом столкновении:

$$\gamma = 4M_1M_2 / (M_1 + M_2)^2. \quad (2.6)$$

Коэффициенты, учитывающие торможение, обусловленное электронным взаимодействием:

$$k = 2.47 \cdot 10^{11} Z_1^{2/3} \sqrt{Z_2 / M_2} [a(1 + M_2 / M_1)]^{3/2}, \quad (2.7)$$

$$\beta = 6.16 \cdot 10^3 Z_2 M_1 F. \quad (2.8)$$

Параметры, учитывающие торможение, обусловленное ядерным взаимодействием: $c = 0.45$, $d = 0.3$.

Собственная концентрация атомов в кристалле см^{-3} , заряды ядер иона атомов мишени Z_2 .

Метод ионной имплантации является основным в планарной технологии. При изготовлении биполярных транзисторов ионную имплантацию применяют для получения эмиттера, базы, коллектора, сильнолегированных приконтактных областей и т.д. Основными преимуществами этого метода по сравнению с диффузией являются возможность прецизионного контроля количества внедренной примеси и высокая однородность концентрации по поверхности пластины. Процесс включает в себя ионизацию атомов примеси и их ускорение до высоких энергий в электрическом поле. Ионы примеси бомбардируют поверхность полупроводника и проникают в кристаллическую решетку. Глубина проникновения возрастает с увеличением энергии. Так, энергии в диапазоне 3 – 500 кэВ соответствует глубина 10 – 1000 нм. При попадании ионов в кристаллическую решетку происходит как их каналирование – проникновение через межатомные промежутки (каналы), так и взаимодействие с атомами решетки. В первом случае глубина проникновения ионов в несколько раз больше, но это требует точной ориентации поверхности кристалла относительно направления пучка. В более общем случае образуются дефекты кристалла – вакансии и междоузлия. Внедренные ионы находятся в основном в междоузлиях и не являются электрически активными. Для перевода их в узлы, а также для устранения часто возникающих радиационных повреждений полупроводника производят отжиг. Ионная имплантация в сочетании с термической обработкой называется ионным легированием. Получили распространение две разновидности ионной имплантации – имплантация как загонка с последующей диффузионной разгонкой и имплантация "в чистом виде" – ионное легирование. Большая часть дефектов отжигается при температуре порядка 600 °С. При $T < 1000^\circ\text{C}$ диффузионными процессами после имплантации пренебрегают.

1.2. Основные параметры ионной имплантации

Средний нормальный пробег иона R_p и его среднеквадратичное отклонение ΔR_p представляют собой проекцию траектории пробега ионов на направление первоначальной скорости и разброс этого параметра. Величина R_p описывается нормальным законом распределения случайных чисел. Доза облучения – это количество частиц, бомбардирующих единицу поверхности за данное время. Если

известны плотность ионного тока j и время t , то доза облучения N , см^{-2} рассчитывается по формуле:

$$N = jt / qn, \quad (2.9)$$

где $n = 1, 2, 3$ – кратность ионизации.

В табл. 2.1 даны значения средних нормальных пробегов, выраженные в нанометрах (нм) для ряда ионов с энергиями 20 – 200 кэВ в кремнии, которые рассчитаны на ЭВМ.

Таблица 2.1

E , кэВ		B	Al	P	As	Sb
20	R_p	78	29	26	16	14
	ΔR_p	32	11	9,4	3,7	2,4
40	R_p	161	56	49	27	23
	ΔR_p	54	19	16,4	6,2	3,8
60	R_p	244	85	73	38	31
	ΔR_p	71	27	23	8,4	5,1
80	R_p	324	114	98	48	38
	ΔR_p	84	35	30	10,5	6,3
100	R_p	398	144	123	58	46
	ΔR_p	94	42	35	12,5	7,4
120	R_p	469	175	149	68	53
	ΔR_p	102	48	41	14,5	8,4
140	R_p	537	205	175	79	60
	ΔR_p	110	54	47	16	9,5
160	R_p	603	236	201	89	67
	ΔR_p	116	60	52	18	10,5
180	R_p	665	266	228	99	74
	ΔR_p	121	60	57	20	11,5
200	R_p	725	297	254	110	81
	ΔR_p	126	70	61	22	12,5

1.3. Распределение примеси при ионной имплантации

Если пренебречь каналированием, например, используя неориентированное внедрение, то распределение примеси, как и для случая диффузии из ограниченного источника, описывается кривой Гаусса. Максимум концентрации примеси в отличие от случая введения ее методом диффузии залегает не на поверхности, а на глубине $x = R_p$. В качестве примера на рис. 2.1 приведены распределения для бора, внедренного в кремний с дозой 10^{12} см^{-2} с различной энергией ионов.

$$C(x) = \frac{N}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_p} \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{(x - R_p)^2}{(\Delta R_p)^2} \right] \quad (2.10)$$

$$C_{\max} = 0.4N / \Delta R_p \quad (2.11)$$

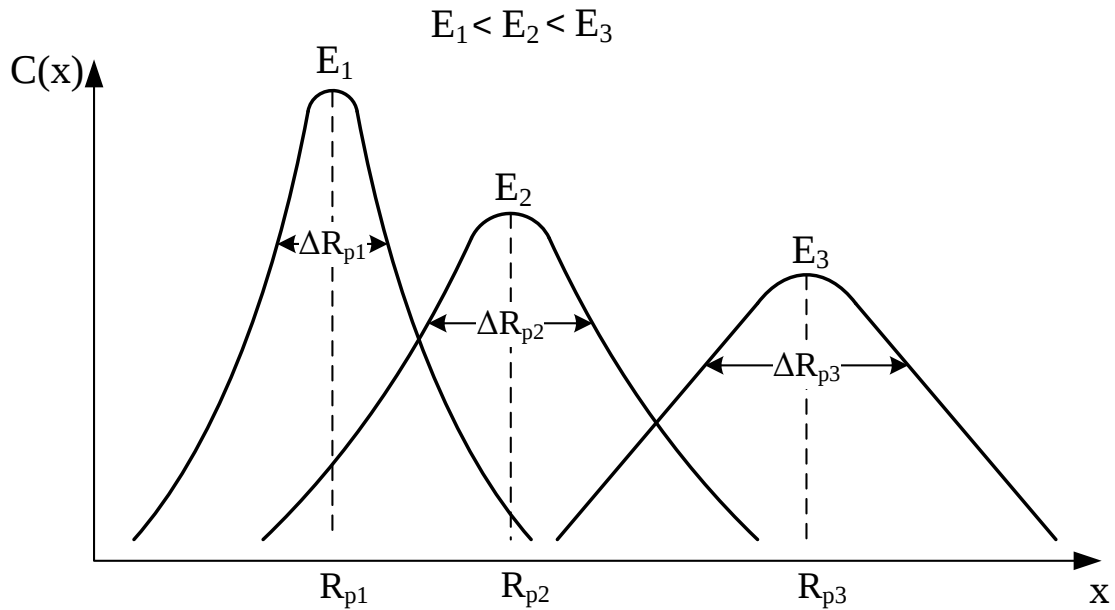


Рис. 2.1. Распределение примеси при ионной имплантации для бора

1.4. Диффузия примеси из ионно-имплантированного слоя

Одним из наиболее распространенных приемов в современной технологии является сочетание ионной имплантации и диффузии. Ионная имплантация служит для предварительной загонки строго фиксированного количества примеси с высокой воспроизводимостью, а диффузия – для последующей разгонки на требуемую глубину. Диффузия примесей из ионно-легированного слоя для доз облучения менее 10^{15} см^{-2} идет как из источника с ограниченным содержанием примеси [см. уравнение (1.7)]. Распределение концентрации представляют в виде:

$$C(x,t) = \frac{N}{\sqrt{2\Delta R_p} + \sqrt{Dt}} \exp \left[-\left\{ \frac{x - R_p}{\sqrt{2\Delta R_p} + \sqrt{Dt}} \right\}^2 \right]. \quad (2.12)$$

Сразу после имплантации, а также после низкотемпературного отжига $\sqrt{Dt} \ll \Delta R_p$ и распределение (2.4) соответствует кривой (2.2). После диффузионной разгонки при высокой температуре $\sqrt{Dt} \gg R_p$, $R_p \ll x$ и распределение (2.4) подобно диффузионному (1.7). Если $\sqrt{Dt} \approx R_p$, то распределение примеси следует строить согласно кривой (2.4).

2. Порядок выполнения работы

Расчёт проводится в программе MathCad. Данные для расчетов представлены в табл. 2.2. Построить распределение примеси, внедренной в Si с помощью ионной имплантации, определить глубину залегания p-n-перехода и поверхностное

сопротивление ионно-имплантированного слоя. Провести разгонку ионно-имплантированного слоя, определить поверхностное сопротивление после разгонки и глубину залегания р-п-перехода.

Таблица 2.2

№ задания	$N, \text{см}^{-2}$	$E, \text{кэВ}$	$T_{\text{раз}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{раз}}, \text{ч}$	$\rho, \text{Ом}\cdot\text{см}$	Si	Примесь
1	$1 \cdot 10^{12}$	20	1000	1.0	14	n	Al
2	$1 \cdot 10^{12}$	60	1100	1.5	10	p	As
3	$1 \cdot 10^{12}$	80	1200	2.0	8	p	P
4	$2 \cdot 10^{12}$	30	1050	1.0	4	n	B
5	$4 \cdot 10^{12}$	40	1100	1.5	6	n	Al
6	$6 \cdot 10^{12}$	50	1000	1.8	12	p	P
7	$8 \cdot 10^{12}$	70	1100	2.0	10	n	B
8	$2 \cdot 10^{12}$	80	1100	1.5	14	p	As
9	$2 \cdot 10^{12}$	60	1200	2.0	10	n	B
10	$4 \cdot 10^{12}$	70	1100	1.6	10	p	P
11	$4 \cdot 10^{12}$	80	1200	2.0	12	n	B
12	$6 \cdot 10^{12}$	100	1100	1.8	4	p	As
13	$6 \cdot 10^{12}$	120	1200	2.5	4	n	Al
14	$8 \cdot 10^{12}$	80	1100	1.8	6	p	As
15	$1 \cdot 10^{12}$	80	1000	2.0	6	n	B
16	$4 \cdot 10^{12}$	70	1100	2.5	6	n	B
17	$1 \cdot 10^{12}$	50	1000	1.0	20	p	P
18	$1 \cdot 10^{12}$	60	1100	2.0	4	n	B
19	$1 \cdot 10^{12}$	80	1200	3.0	4	p	P
20	$6 \cdot 10^{12}$	100	1000	1.5	10	n	Al

Ниже представлены результаты расчёта в программе MathCad.

При расчете используются следующие константы:

1) доза облучения

$$N_1 = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2};$$

2) концентрация атомов в кремнии

$$N_2 = 4.98 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3};$$

3) энергия иона

$$E = 7 \cdot 10^4 \text{ эВ};$$

4) масса иона неона

$$M_1 = 20.1797 \text{ а.е.м.};$$

5) масса атома кремния

$$M_2 = 28.055 \text{ а.е.м.};$$

6) заряд ядра неона

$$Z_1 = 10;$$

7) заряд ядра кремния

$$Z_2 = 14.$$

Производим расчет среднего нормального пробега ионов и среднеквадратичного отклонения. Радиус экранирования заряда ядра атомными электронами:

$$a = \frac{4.7 \cdot 10^{-9}}{\sqrt{Z_1^{\frac{2}{3}} + Z_2^{\frac{2}{3}}}} = 1.454 \cdot 10^{-9} \text{ см.}$$

Нормирующие множители для энергии и пробега:

$$F = \frac{6.9 \cdot 10^6 \cdot a \cdot M_2}{Z_1 \cdot Z_2 \cdot (M_1 + M_2)} = 4.17 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{эВ}}$$

$$L = \pi \cdot a^2 \cdot \gamma \cdot N_2 = 1.909 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}.$$

Коэффициент передачи максимально возможной энергии при лобовом столкновении иона с атомом мишени:

$$\gamma = \frac{4 \cdot M_1 \cdot M_2}{(M_1 + M_2)^2} = 0.973.$$

Коэффициенты, учитывающие торможение:

1) вызванное электронным взаимодействием:

$$k = 2.47 \cdot 10^{11} \cdot Z_1^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{Z_2}{M_2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[a \cdot \left(1 + \frac{M_2}{M_1} \right) \right]^{\frac{3}{2}} = 0.166$$

$$\beta = 6.16 \cdot 10^3 \cdot Z_2 \cdot M_1 \cdot F = 72.565;$$

2) вызванное ядерным взаимодействием:

$$c = 0.45$$

$$d = 0.3.$$

Безразмерные величины:

1) энергии:

$$\varepsilon = F \cdot A = 2.919;$$

2) пробега:

$$\rho = \frac{2}{k} \cdot \varepsilon^{\frac{1}{2}} \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon \cdot k}{3 \cdot \beta} \right) - \frac{2 \cdot \frac{c}{k}}{k \cdot \sqrt{\frac{c}{k} + d}} \cdot a \tan \left(\sqrt{\frac{\varepsilon}{\frac{c}{k} + d}} \right) = 5.992.$$

Средний полный пробег ионов неона в кремнии:

$$R = \frac{\rho}{L} = 3.139 \cdot 10^{-5} \text{ см.}$$

Полная энергия, затраченная на упругое рассеяние иона:

$$\varepsilon_n = \frac{c}{k} \cdot \ln \left(1 + \frac{\varepsilon}{\frac{c}{k} + d} \right) = 1.837.$$

Корректирующая поправка, обусловленная упругим рассеянием иона:

$$f = \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{M_2}{M_1} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon}} \right)^{-1} = 0.731.$$

Средний нормальный пробег:

$$R_p = f \cdot R = 2.295 \cdot 10^{-5} \text{ см.}$$

Так как полученное значение ε меньше 10, ядерная тормозная способность находится как:

$$S_n = \frac{c \cdot \varepsilon^{\frac{1}{2}}}{d + \varepsilon} = 0.239.$$

Стандартное среднеквадратическое отклонение нормального пробега:

$$\mu = \frac{M_2}{M_1} = 1.392,$$

$$\Delta R_p = R_p \cdot \sqrt{\frac{\rho}{9 \cdot \varepsilon} \cdot (\gamma + \mu) \cdot S_n} = 8.237 \cdot 10^{-6} \text{ см.}$$

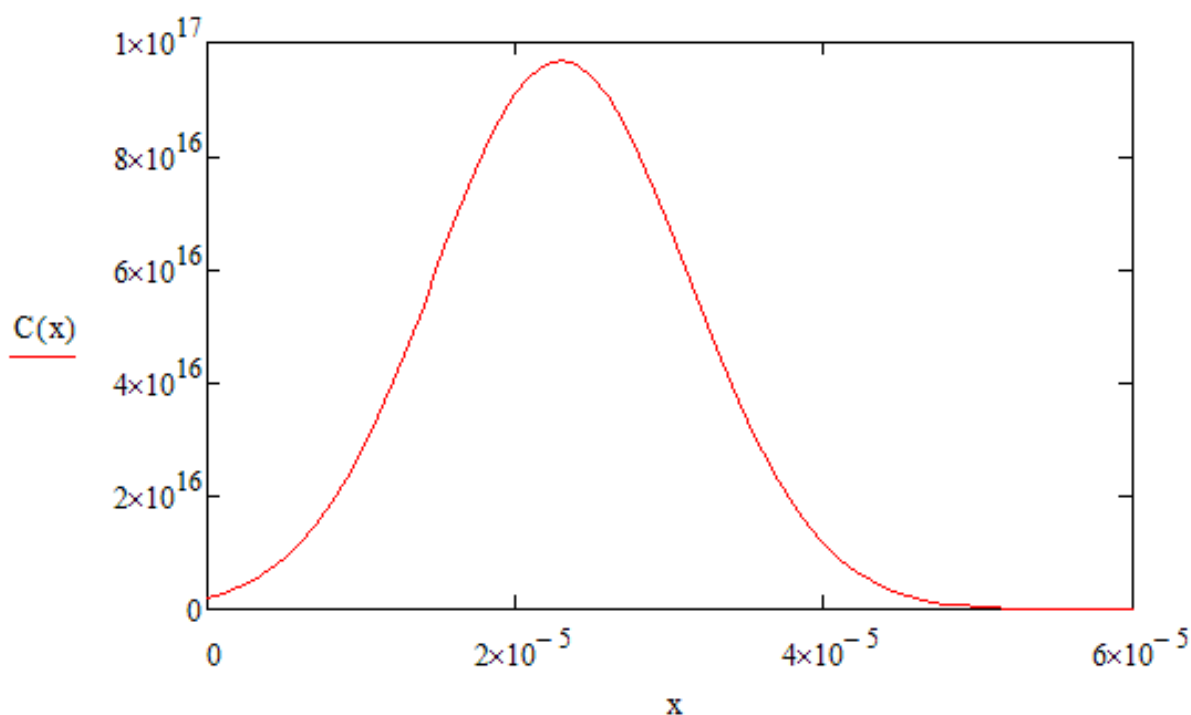
Расчет профиля распределения легирующей примеси:

$$x = 0, 10^{-6} \dots 10^{-4} \text{ см}$$

$$R_p = 2.295 \cdot 10^{-5} \text{ см}$$

$$\Delta R_p = 8.237 \cdot 10^{-6} \text{ см}$$

$$C(x) = \frac{N_1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \Delta R_p} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{(x - R_p)^2}{\Delta R_p^2} \right] \text{ см}^{-3}.$$



Контрольные вопросы

1. Опишите процесс проникновения ионов в вещество.
2. Что такое доза облучения, чем она определяется?
3. Как зависят длина нормального пробега и отклонения нормального пробега от энергии имплантируемых ионов? Постройте графики и объясните.
4. Как изменится профиль распределения ионно-имплантируемой примеси при наличии эффекта каналирования?
5. Опишите основные элементы установки для ионной имплантации.

Лабораторная работа № 3 ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ ЧЕРЕЗ СЛОЙ ОКИСЛА

Цель работы

Изучить процессы ионной имплантации через слой диэлектрика. По заданному варианту произвести расчёт профиля распределения примеси.

1. Краткие теоретические сведения

1. Диффузия примеси из ионно-имплантированного слоя

Одним из наиболее распространенных приемов в современной технологии является сочетание ионной имплантации и диффузии. Ионная имплантация служит для предварительной загонки строго фиксированного количества примеси с высокой воспроизводимостью, а диффузия – для последующей разгонки на требуемую глубину. Диффузия примесей из ионно-легированного слоя для доз облучения менее 10^{15} см^{-2} идет как из источника с ограниченным содержанием примеси [см. уравнение (1.7)]. Распределение концентрации представляют в виде:

$$C(x, t) = \frac{N}{\sqrt{2\Delta R_p} + \sqrt{Dt}} \exp \left[- \left\{ \frac{x - R_p}{\sqrt{2\Delta R_p} + 2\sqrt{Dt}} \right\}^2 \right]. \quad (3.1)$$

Сразу после имплантации, а также после низкотемпературного отжига $(Dt)^{0.5} \ll \Delta R_p$ и распределение (3.1) соответствует кривой (2.10). После диффузионной разгонки при высокой температуре $(Dt)^{0.5} \gg R_p$, $R_p \ll x$ и распределение (3.1) подобно диффузионному (1.7). Если $(Dt)^{0.5} \approx R_p$, то распределение примеси следует строить согласно кривой (3.1).

2. Расчет распределения концентрации примеси при имплантации через слой окисла

Имплантация примесей через пленку диоксида используется для создания МДП-структур. Для расчета распределения концентрации примеси в кремнии необходимы численные значения следующих параметров: пробег и стандартное отклонение R_{p1} и ΔR_{p1} в SiO_2 , R_{p2} , ΔR_{p2} в Si , толщина окисла d , энергия и доза облучения N .

На первом этапе определяют так называемую C_ϕ , толщину эквивалентного слоя кремния d_2 , которой соответствует доза ионов, тормозящихся в пленке SiO_2 , по формуле:

$$d_2 = R_{p2} + \left(d_1 - R_{p1} \right) \frac{\Delta R_{p2}}{\Delta R_{p1}}. \quad (3.2)$$

При построении распределения внедренной примеси в кремний начало отсчета помещают на поверхности кремния, концентрацию рассчитывают из выражения:

$$C(x) = \frac{0.4N}{\Delta R_{p2}} \exp \left[- \left\{ \frac{x + d_2 - R_{p2}}{\sqrt{2\Delta R_{p2}}} \right\}^2 \right]. \quad (3.3)$$

Распределение концентрации примеси в пленке SiO_2 вычисляется аналогично:

$$C(x) = \frac{0.4N}{\Delta R_{p1}} \exp \left[- \left\{ \frac{x + d_1 - R_{p1}}{\sqrt{2\Delta R_{p1}}} \right\}^2 \right]. \quad (3.4)$$

Дозу ионов примеси N_1 , остающейся в пленке диоксида, определяют из выражения:

$$N_1 = \frac{N}{\sqrt{2\pi\Delta R_{p1}}} \int_0^{d_1} \exp \left[- \left\{ \frac{x - R_{p1}}{\sqrt{2\Delta R_{p1}}} \right\}^2 \right] dx. \quad (3.5)$$

Тогда доза ионов примеси, прошедшей в кремний, $N_2 = N - N_1$.

2. Порядок выполнения работы

Расчет профиля распределения примеси выполнять при условии, что ионная имплантация проводится через слой SiO_2 толщиной 0,1 мкм. Построить распределение примеси, внедренной в Si с помощью ионной имплантации, определить глубину залегания p-n-перехода и поверхностное сопротивление ионно-имплантированного слоя. Данные для расчетов представлены в табл. 3.1. Провести разгонку ионно-имплантированного слоя, определить поверхностное сопротивление после разгонки и глубину залегания p-n-перехода. Расчет проводится в программе MathCad.

Таблица 3.1

№ задания	$N, \text{см}^{-2}$	$E, \text{кэВ}$	$T_{\text{раз}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{раз}}, \text{ч}$	$\rho, \text{Ом}\cdot\text{см}$	Si	Примесь
1	$1 \cdot 10^{12}$	20	1000	1.0	14	n	Al

Окончание таблицы 3.1

№ задания	$N, \text{см}^{-2}$	$E, \text{кэВ}$	$T_{\text{раз}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{раз}}, \text{ч}$	$\rho, \text{Ом}\cdot\text{см}$	Si	Примесь
2	$1 \cdot 10^{12}$	60	1100	1.5	10	p	As
3	$1 \cdot 10^{12}$	80	1200	2.0	8	p	P
4	$2 \cdot 10^{12}$	30	1050	1.0	4	n	B
5	$4 \cdot 10^{12}$	40	1100	1.5	6	n	Al
6	$6 \cdot 10^{12}$	50	1000	1.8	12	p	P
7	$8 \cdot 10^{12}$	70	1100	2.0	10	n	B
8	$2 \cdot 10^{12}$	80	1100	1.5	14	p	As
9	$2 \cdot 10^{12}$	60	1200	2.0	10	n	B
10	$4 \cdot 10^{12}$	70	1100	1.6	10	p	P
11	$4 \cdot 10^{12}$	80	1200	2.0	12	n	B
12	$6 \cdot 10^{12}$	100	1100	1.8	4	p	As
13	$6 \cdot 10^{12}$	120	1200	2.5	4	n	Al
14	$8 \cdot 10^{12}$	80	1100	1.8	6	p	As
15	$1 \cdot 10^{12}$	80	1000	2.0	6	n	B
16	$4 \cdot 10^{12}$	70	1100	2.5	6	n	B
17	$1 \cdot 10^{12}$	50	1000	1.0	20	p	P
18	$1 \cdot 10^{12}$	60	1100	2.0	4	n	B
19	$1 \cdot 10^{12}$	80	1200	3.0	4	p	P
20	$6 \cdot 10^{12}$	100	1000	1.5	10	n	Al

3. Контрольные вопросы

1. Как влияет энергия ионов на профиль распределения примеси?

2. Что такое коэффициент распыления?
3. Что такое скорость распыления?
4. Какие технологические параметры влияют на глубину залегания р-п-перехода?
5. Какие требования предъявляются к подзатворному диэлектрику?

Библиографический список

1. Никоненко В.А. Математическое моделирование технологических процессов: моделирование в среде MathCAD. Практикум. М.: МИСиС, 2001. 48 с.
2. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: учеб. пособие для вузов. М.: Лаборатория базовых знаний, 2000. 488 с.
3. Курносое А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1986. 368 с.
4. Введение в процессы интегральных микро- и нанотехнологий: учеб. пособие для вузов: в 2 т. Т1: Физико-химические основы технологии микроэлектроники / Ю.Д. Чистяков, Ю.П. Райнова. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 252 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1	
Расчет диффузионных структур.....	1
Лабораторная работа № 2	
Ионная имплантация.....	11
Лабораторная работа № 3	
Ионная имплантация через слой окисла.....	19

Технология материалов электронной техники. Часть 1

Составители: А в а ч ё в Алексей Петрович
З у б к о в Михаил Владимирович
К о с т р ю к о в Сергей Анатольевич
М и ш у с т и н Владислав Геннадьевич

Редактор Н.А. Орлова
Корректор М.Е. Цветкова

Подписано в печать 30.06.12. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,5.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

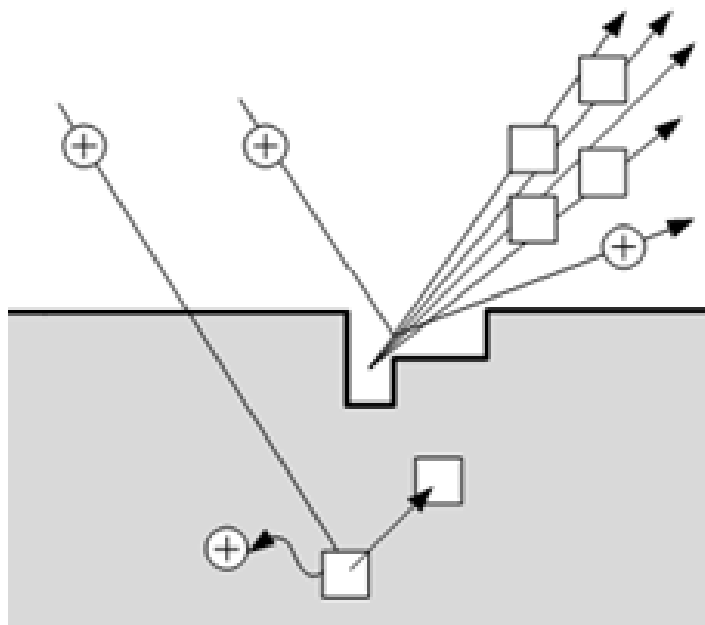
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

ЧАСТЬ 1

Методические указания к лабораторным работам



УДК 621.3

Физико-химические основы технологических процессов микро- и нанoeлектроники. Часть 1: методические указания к лабораторным работам / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: А.П. Авачёв, Ю.В. Воробьева, В.Г. Мишустин, П.А.Фомин. Рязань, 2011. 48 с.

Содержат сведения по изучению основ физико-химических процессов в технологии микро- и нанoeлектроники в части методов нанесения (эпитаксия, магнетронное напыление), модифицирования (ионная имплантация) и удаления (электрохимическое травление) вещества.

Предназначены для подготовки дипломированных специалистов по направлению 200100 – «Электроника и микроэлектроника».

Табл. 9. Ил. 27. Библиогр.: 13 назв.

Физическая химия, микроэлектроника, интегральная микросхема, эпитаксия, ионная имплантация, магнетронное распыление, сканирующая зондовая микроскопия

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра биомедицинской и полупроводниковой электроники РГРТУ (зав. кафедрой проф. С.П. Вихров)

Физико-химические основы технологических процессов микро- и нанoeлектроники. Часть 1

Составители: А в а ч ё в Алексей Петрович
В о р о б ь е в а Юлия Владимировна
М и ш у с т и н Владислав Геннадьевич
Ф о м и н Павел Анатольевич

Редактор Н.А. Орлова

Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 30.08.11. Формат бумаги 60 × 84 1/16.

Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 3,0.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Лабораторная работа №1

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ И ТОПОЛОГИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Цель работы

Изучить топологию полупроводниковой ИМС по заданному варианту, произвести измерения топологических размеров элементов и зарисовать эскизы элементов полупроводниковой ИМС.

1. Краткие теоретические сведения

Интегральная микросхема – конструктивно законченное микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функциональную обработку сигналов, содержащее совокупность электрически связанных между собой элементов и (или) компонентов, изготовленных в едином технологическом цикле.

Полупроводниковая интегральная микросхема (ПИМС) – микросхема, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в объеме и на поверхности полупроводника.

Кристалл интегральной микросхемы – часть полупроводниковой пластины, в объеме и на поверхности которой сформированы элементы полупроводниковой микросхемы, межэлементные соединения и контактные площадки (рис. 1.1).

Элемент интегральной микросхемы – часть микросхемы, реализующая функцию какого-либо электрорадиоэлемента, которая выполнена нераздельно от кристалла и не может быть выделена как самостоятельное изделие.

Корпус интегральной микросхемы – часть конструкции ИМС, предназначенная для защиты от внешних воздействий и для соединения с внешними электрическими цепями с помощью выводов.

Контактная площадка – металлизированный участок на плате, служащий для соединения выводов элементов, а также для контроля электрических параметров и режимов функционирования.

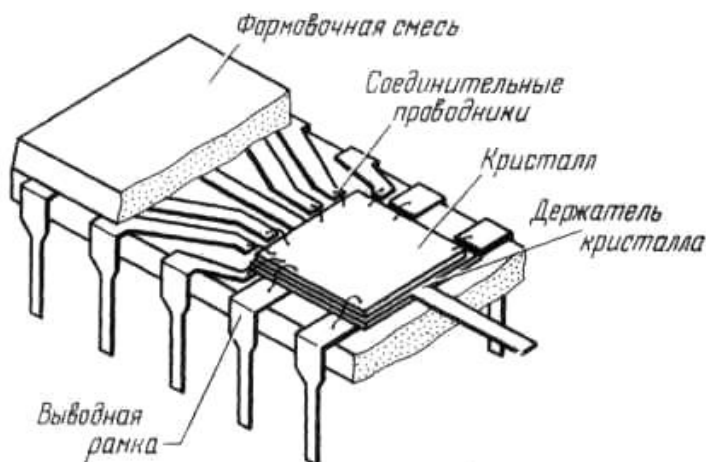


Рис. 1.1. Кристалл ИМС в пластмассовом плоском корпусе с двухрядным расположением выводов

Под топологией ИМС понимается взаимное расположение и соединение элементов микросхемы (рис. 1.2). Основными элементами полупроводниковых ИМС являются: резистор, конденсатор, диод, биполярный транзистор, полевой транзистор, МДП-транзистор и вспомогательные элементы: диффузионные перемычки, контактные площадки и фигуры совмещения.

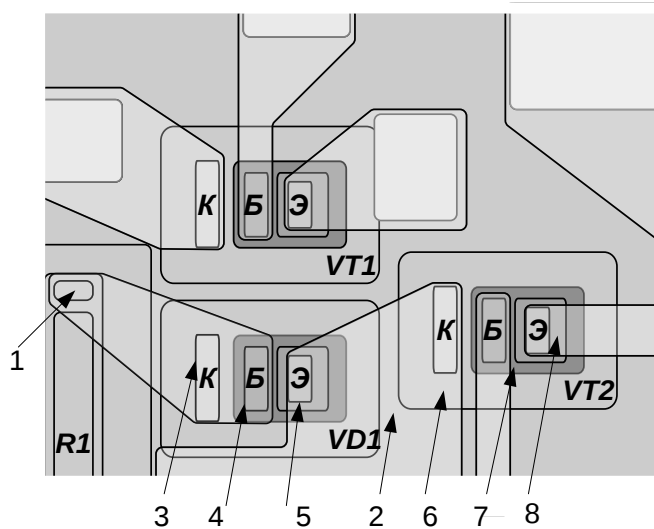


Рис. 1.2. Фрагмент топологии микросхемы с биполярными транзисторами малой мощности: $VD1$ – диод (транзистор в диодном включении); $VT1$, $VT2$ – транзисторы; $R1$, $R2$ – диффузионные резисторы; 1 – контактное окно к диффузионным резисторам; 2 – p -область разделительной диффузии; 3...5 – контуры контактных окон к соответственно коллектору, базе, эмиттеру; 6 ... 8 – области коллектора, базы, эмиттера

1.1. Резисторы

На рис. 1.3 приведены типичные конструкции резисторов. Наиболее распространены резисторы прямоугольной формы как самые простые в изготовлении.

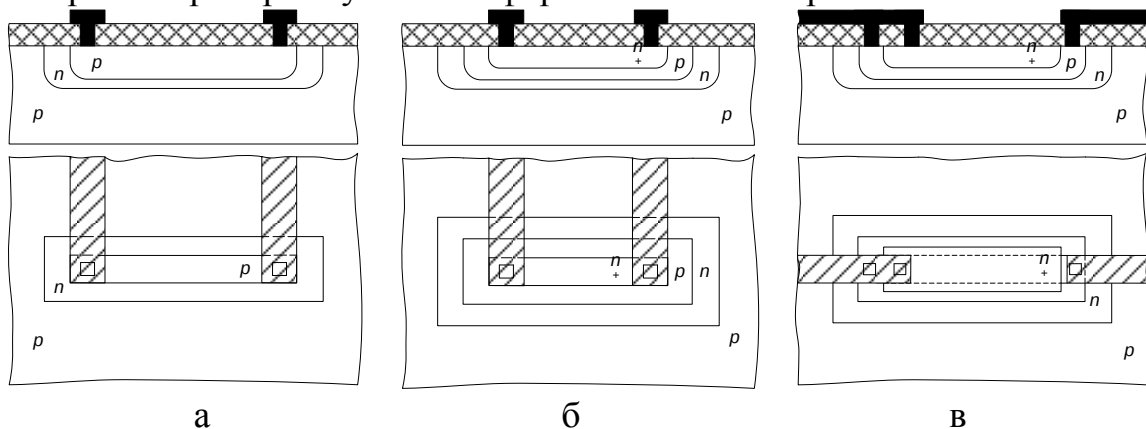


Рис. 1.3. Конструкции и топологии интегральных резисторов: а – диффузионный в базовом слое; б – диффузионный в эмиттерном слое; в – пинч-резистор в базовом слое

Резисторы полупроводниковых ИМС формируются на основе слоев: эмиттерного, базового и базового под эмиттерным (пинч-резисторы). Если базовый и

эмиттерный слой получают диффузией, то и резисторы называют *диффузионными*.

Диффузионные резисторы в ИМС формируются в едином технологическом цикле одновременно с базовыми и эмиттерными областями биполярных транзисторов. Это упрощает технологический процесс. Тело резистора размещается в кармане n -типа проводимости, который размещается в пластине p -типа. Для нормальной работы резистора p - n -переход карман – пластина должен быть закрыт (смещен в обратном направлении). Это достигается подачей на пластину самого низкого потенциала микросхемы. Подключение резистора к другим элементам схемы осуществляется через контактные окна с помощью проводников металлизации.

Диффузионные резисторы на эмиттерном p^+ -слое из-за сильного легирования получаются низкоомными, их применение ограничивается низким пробивным напряжением (5-7 В) p - n -перехода эмиттер-база. Для получения высокоомных резисторов применяют *пинч-резисторы* (за счет уменьшения площади поперечного сечения). Толщина базового слоя уменьшена за счет эмиттерного слоя. Третье контактное окно на пинч-резисторе необходимо для подключения эмиттерного слоя к высокопотенциальной части для запирающего p - n^+ -перехода на резисторе.

Конструкция ионно-легированного резистора практически не отличается от конструкций, рассмотренных выше. Однако технология ионного легирования позволяет получить тонкие слои с высоким значением удельного поверхностного сопротивления.

В табл. 1.1 приведены типичные значения толщин слоев и поверхностных удельных сопротивлений резисторов полупроводниковых ИМС.

Табл. 1.1

Характеристики интегральных резисторов

Тип резистора	Толщина слоя d , мкм	Удельное поверхностное сопротивление ρ_s , Ом/□
Диффузионный на базовом слое	2,5 – 3,5	100 – 300
Диффузионный на эмиттерном слое	1,2 – 2,5	1 – 10
Пинч-резистор	0,5 – 1,0	1000 – 3000

1.2. Конденсаторы

В полупроводниковых ИМС различают две разновидности конденсаторов: МДП-конденсатор и диффузионный конденсатор. Нижняя обкладка МДП-конденсатора образована p^+ -эмиттерным слоем, а верхняя обкладка металлическая (рис. 1.4).

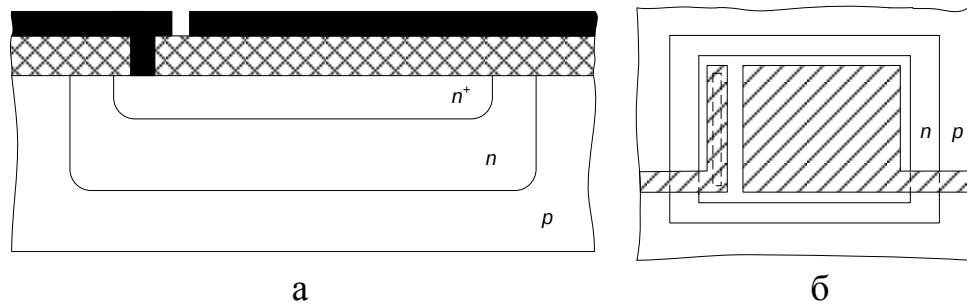


Рис. 1.4. Конструкция (а) и топология (б) МДП-конденсатора

Для формирования диффузионных конденсаторов используются барьерные емкости обратного смещенных р-п-переходов: эмиттер-база, база-коллектор и коллектор-пластина.

В настоящее время вместо реальных емкостных или индуктивных элементов (большой емкости) используют их электронные аналоги – гираторные схемы, имитирующие свойства индуктивностей и емкостей.

1.3. Биполярные транзисторы

В полупроводниковых ИМС биполярный п-р-п-транзистор является основным схемным элементом (рис. 1.5). У п-р-п-транзисторов быстродействие при прочих равных условиях лучше, чем у р-п-р-транзисторов. Это объясняется тем, что подвижность электронов выше, чем дырок.

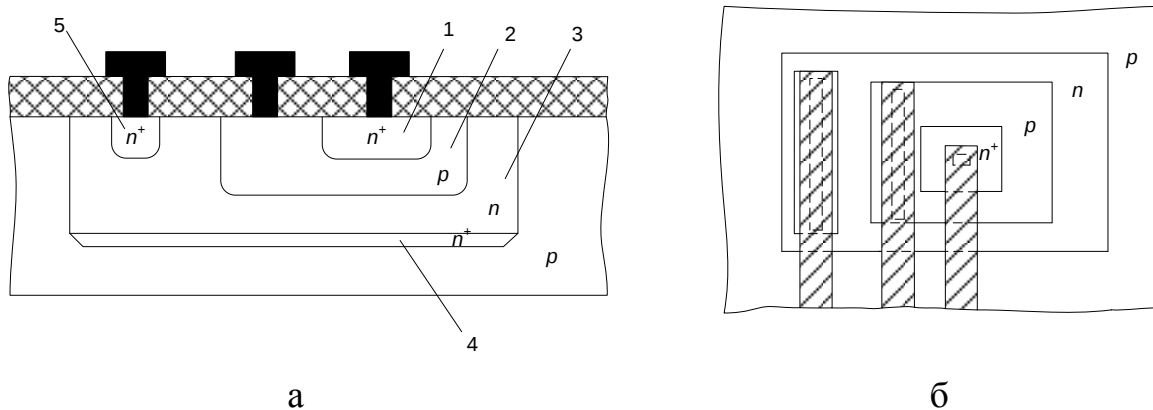


Рис. 1.5. Конструкция (а) и топология (б) биполярного транзистора:
1– эмиттер; 2 – база; 3 – коллектор; 4 – скрытый слой;
5 – приконтактная область коллектора

Эмиттер транзистора сильно легируют для получения максимального коэффициента инжекции. Базу делают тонкой (намного меньше диффузионной длины инжектируемых в базу электронов) для повышения коэффициента переноса и низколегированной. Подколлекторный скрытый n^+ -слой нужен для уменьшения сопротивления коллектора в режиме насыщения. Область коллекторного контакта легируют до n^+ для предотвращения образования паразитного р-слоя в случае диффузии III-валентного алюминия.

В аналоговых ИМС находят применение горизонтальные р-п-р-транзисторы, совместимые с планарно-эпитаксиальной технологией изготовления п-р-п-транзисторов (рис. 1.6).

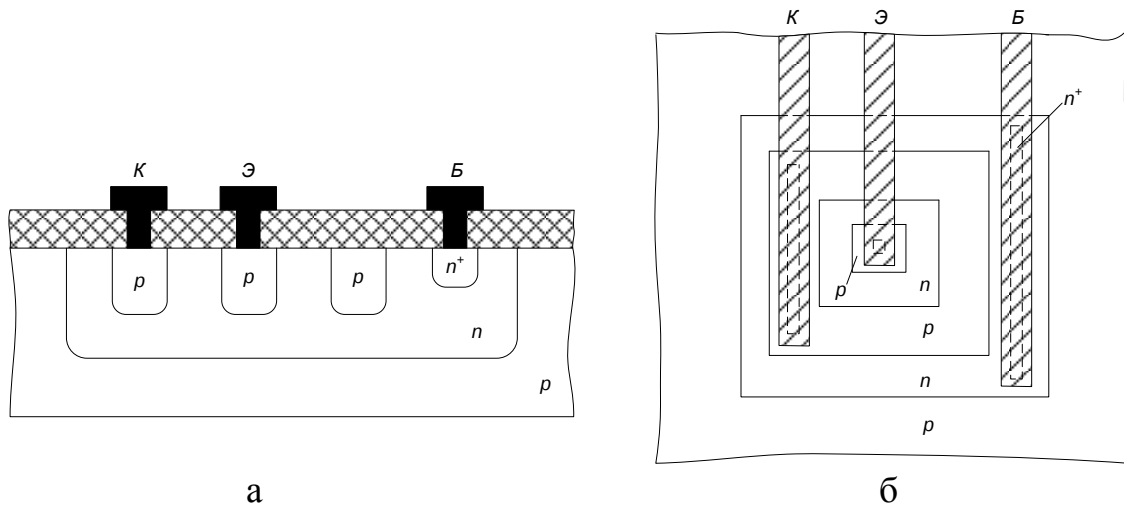


Рис. 1.6. Конструкция (а) и топология (б) биполярного горизонтального транзистора

1.4. Диоды

Диоды полупроводниковых ИМС можно сформировать на любом из р-п-переходов планарно-эпитаксиального транзистора (рис.1.7). Наиболее удобны для этих целей переходы эмиттер-база и база-коллектор. При соответствующем выборе варианта диодного включения транзистора возможно подобрать оптимальные параметры по быстродействию, пробивному напряжению, обратному току (табл. 1.2).

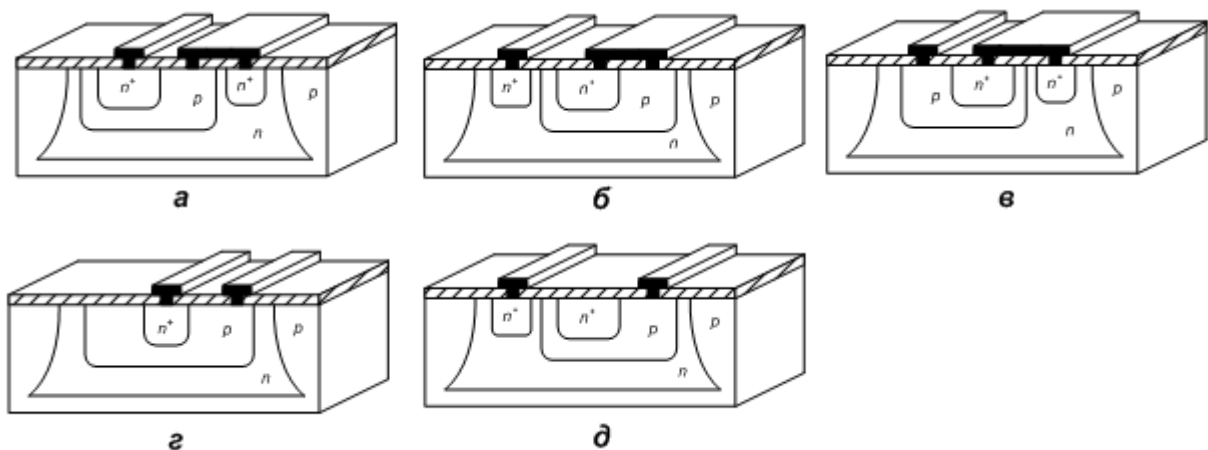


Рис. 1.7. Конструкции интегральных диодов: а – на основе перехода база-эмиттер с коллектором, закороченным на базу (БК-Э); б – на основе перехода коллектор-база с эмиттером, закороченным на базу (БЭ-К); в – с использованием эмиттерного и коллекторного переходов, когда эмиттерные и коллекторные области соединены (Б-ЭК); г – на основе перехода база-эмиттер с разомкнутой цепью коллектора (Б-Э), д – на основе перехода база-коллектор с разомкнутой цепью эмиттера (Б-К)

Табл. 1.2

Параметры интегральных диодов

Вариант диодного включения транзистора	Пробивное напряжение $U_{пр}$, В	Обратный ток $I_{обр}$, нА	Быстродействие, время восстановления обратного тока $\tau_{вост}$, нс
БК–Э	7 – 8	1,0	10
БЭ–К	40 – 70	30,0	50
Б–КЭ	7 – 8	40,0	100
Б–Э	7 – 8	1,0	50
Б–К	40 – 70	3,0	75

1.5. Полевые транзисторы

На рис. 1.8 приведена конструкция полевого транзистора с каналом n-типа проводимости. Канал образуется между стоком и истоком. Толщина канала регулируется двумя обратносмещенными p-n-переходами: затвор-эпитаксиальный слой и эпитаксиальный слой-подложка.

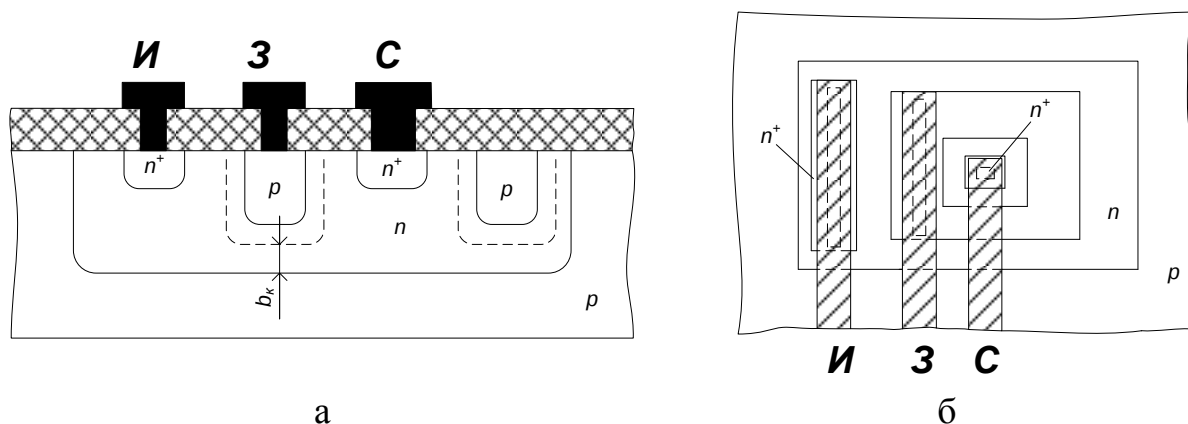


Рис. 1.8. Конструкция (а) и топология (б) полевого транзистора

1.6. Вспомогательные элементы ПИМС

Элементы ПИМС электрически соединены между собой с помощью металлических пленочных проводников, расположенных на поверхности изолирующего окисла или межслойной изоляции. Контактное соединение проводника со всеми областями кристалла осуществляется через контактное окно в окисле, причем для получения надежного контакта окно закрывается проводником с перекрытием.

Для того чтобы обеспечить необходимую изоляцию между двумя разными трассами металлизации, в варианте топологии с однослойной металлизацией используют вспомогательный элемент – *диффузионную перемычку*. В такой перемычке один проводник расположен на поверхности изолирующего окисла, а другой протекает под ним в виде участка p⁺- или n⁺-слоя (рис. 1.9). Диффузионная перемычка по существу является низкоомным диффузионным резистором, над телом которого проложен пересекающийся проводник.

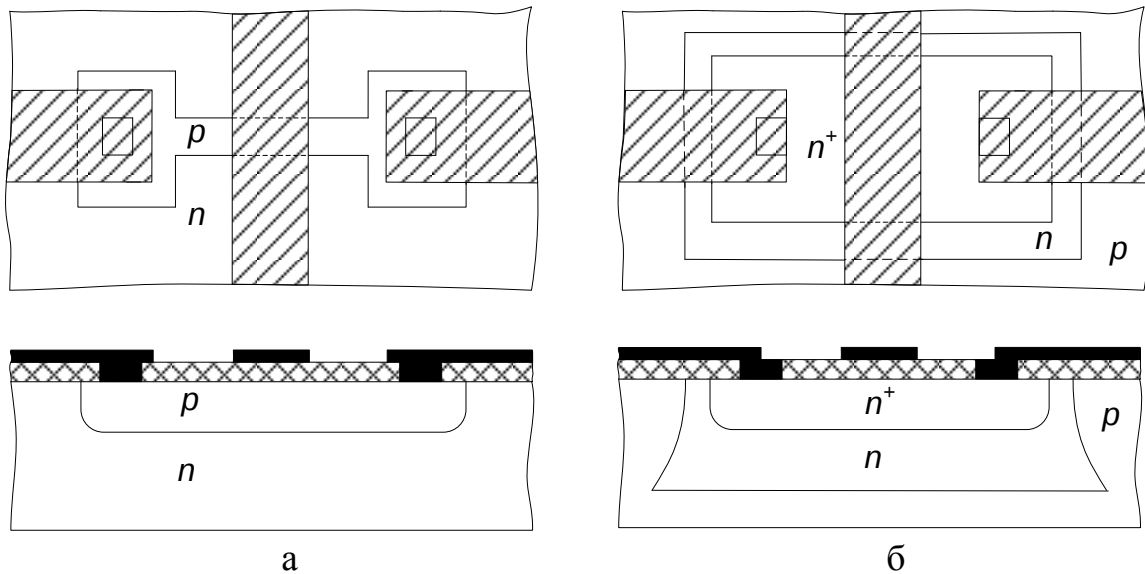


Рис. 1.9. Прокладка шин металлизации над каналом резистора (а) и через n^+ -перемычку (б)

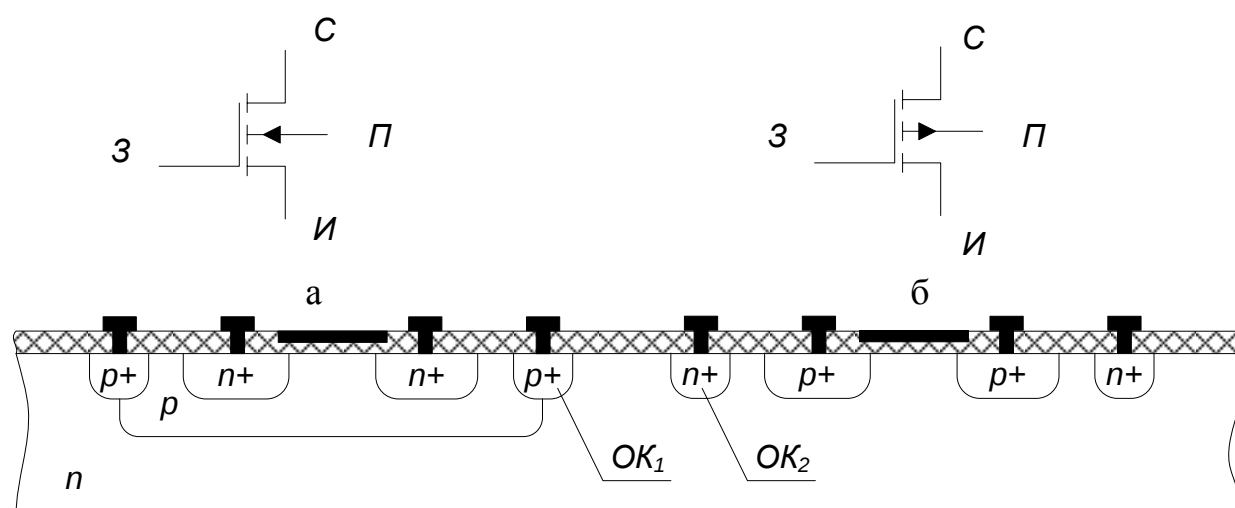
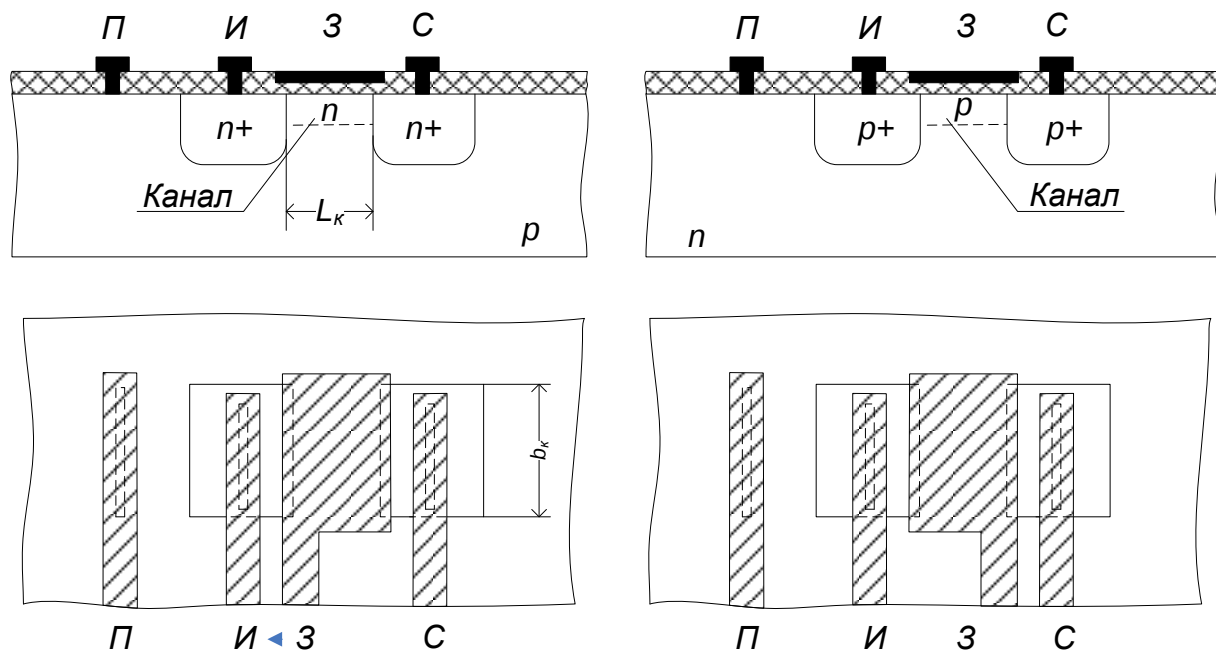
Вторым вспомогательным элементом ПИМС является внешняя *контактная площадка*. Она предназначена для электрического соединения кристалла с внешними выводами корпуса с помощью гибких проводников. От кристалла площадка изолируется окислом, а от внешней среды пассивирующим (защитным) слоем, в котором делают окно для приварки внешнего гибкого вывода.

Последним вспомогательным элементом ПИМС являются *фигуры совмещения*. Они имеют прямоугольную или крестообразную форму или выполняются в виде набора рисок разной толщины. Каждая фигура состоит из двух квадратов: основного (внешнего) и встроенного (внутреннего). Качество совмещения определяют по взаимному положению основного и встроенного квадратов. Совмещение будет идеальным, если все фигуры концентричны. Чаще всего фигуры совмещения располагают на периферии кристалла между внешними контактными площадками.

1.7. МДП-транзисторы

МДП-транзистор имеет 4 вывода: исток, сток, затвор и подложка. Основными конструктивными параметрами МДП-транзистора являются длина канала L_K и ширина канала b_K (рис. 1.10). Для обеспечения надежного наведения канала с учетом возможного несовмещения отдельных областей затвор должен располагаться над каналом с некоторым (небольшим) перекрытием.

Особенностью МДП ИМС является то, что в качестве пассивных элементов используют МДП-транзисторы. При использовании МДП-транзистора в качестве резистора необходимо на его затвор подавать постоянное напряжение, величина которого будет определять номинал сопротивления. В качестве конденсаторов в МДП ИМС используют емкость затвор-подложка или барьерную емкость р-п-перехода сток (исток)-подложка.



В

Рис. 1.10. Конструкция МДП-транзисторов: а – п-МДП-транзистор; б – р-МДП-транзистор; в – комплиментарная пара транзисторов: ОК₁, ОК₂ – охран-
ные кольца

1.8. Способы изоляции элементов

Между активными и пассивными элементами ПИМС необходимо обеспечить надежную электрическую изоляцию.

Различают три способа изоляции:

- обратносмещенным р-п-переходом (недостаток – наличие паразитных емкостей и токов утечки);
- диэлектриком (меньшая интегральная плотность, сложность технологии);
- комбинированный.

1.9. Параметры интегральных микросхем

Степень интеграции интегральной микросхемы K – это показатель степени сложности ИМС в зависимости от числа в ней элементов и (или) компонентов

$$K = \lg N, \quad (1.1)$$

где N – количество элементов и компонентов ИМС.

Интегральная плотность микросхемы m – число элементов и компонентов, приходящихся на единицу площади ИМС (с учетом корпуса, но без выводов)

$$m = N/S, \quad (1.2)$$

где S – площадь микросхемы с учетом корпуса.

Для бескорпусных ИМС вводится понятие интегральная плотность на подложке (кристалле):

$$m' = N/S, \quad (1.3)$$

где S – площадь подложки (кристалла) ИС.

2. Описание лабораторной установки

Для выполнения работы используется следующая аппаратура: оптическая система видеонаблюдения с видеокамерой, монитор, компьютер с платой видеозахвата, кассеты с образцами, лупа, микрометрическая линейка.

Для получения изображения топологии интегральной микросхемы используется система видеонаблюдения атомно-силового микроскопа NTEGRA. Она обеспечивает получение изображений с увеличением в 85 – 1050 раз. Основными элементами конструкции оптической системы являются: видеомикроскоп, позиционирующий штатив, блок осветителя и монитор. Элемент конструкции оптической системы приведён на рис. 1.11.

3. Порядок выполнения работы

1. Используя микрометрическую линейку, определите коэффициент оптического увеличения микроскопа и цену деления шкалы окуляра микроскопа. Для этого расположите микрометрическую линейку на предметном столике, находящемся под объективом видеомикроскопа. С помощью юстировочных винтов позиционера видеомикроскопа отрегулируйте его положение так, чтобы центр объектива находился над центральным «окошком» линейки. Вращая регулятор увеличения, добейтесь, чтобы изображение микрометрической линейки занимало весь экран монитора целиком. При необходимости проведите точную фокусировку. Запомните положения регуляторов увеличения и точной настройки. Определите горизонтальный размер изображения на экране монитора, сосчитав количество делений, перекрывающих экран. Цена деления микрометрической линейки указана на ее корпусе.

2. Рассмотрите под микроскопом образец заготовки полупроводниковой ИМС. Для этого положите исследуемую микросхему на предметный столик. Изменяя настройки увеличения, получите чёткое изображение полной топологии кристалла микросхемы. Сохраните полученное изображение, используя специальную программу видеозахвата на компьютере.



Рис. 1.11. Элементы настройки изображения: 1 – регулятор увеличения; 2 – модуль трансфокатора; 3 – ручка механизма грубой фокусировки; 4 – кольцо точной фокусировки; 5 – световодная система; 6 – юстировочные винты позиционера видеомикроскопа

Определите элементную базу ИМС. Найдите на микросхеме пассивные, активные, технологические и конструктивные элементы. Контур области изоляции диэлектриком (контур «кармана») имеет вид тёмной утолщённой линии, при этом прямые углы в контуре обязательно закруглены. Вне контура «кармана» на поверхности кристалла наблюдаются характерные крапинки. Контур области изоляции р-п-переходом имеет вид тонких тёмных линий с прямыми углами без закруглений.

3. Определите масштаб изображения топологии ИМС, для чего установите настройки микроскопа в положения, при которых определялся коэффициент увеличения. При необходимости измените положение модуля трансфокатора с помощью юстировочных винтов. Пользуясь тем, что горизонтальный размер полученного изображения на мониторе известен, определите размеры областей, указанных преподавателем.

4. Получите изображения отдельных элементов микросхемы в увеличенном масштабе. Сохраните все полученные изображения топологии, используя специальную программу видеозахвата.

5. Определите количественные параметры ИМС – степень интеграции K и интегральную плотность на кристалле m' .

6. Заполните табл. 1.3, используя сохраненные результаты визуального осмотра и результаты определения размеров элементов.

Табл. 1.3

Характеристики и параметры ПИМС

Обозначенный № элемента на микросхеме	Выполняемая функция элемента	Количество контактных площадок	Степень интеграции	Плотность упаковки $K_v, \text{см}^{-3}$

7. Произведите расчет геометрии конструктивных параметров элементов полупроводниковой микросхемы, указанных преподавателем: для диффузионного резистора – длины l и ширины b ; для МДП-конденсатора – длины l_0 и ширины b_0 верхней обкладки; для биполярного транзистора – длины l и ширины b базовой области; для МДП-транзистора – длины l и ширины b затвора. Нанесите эти размеры в микрометрах на эскиз топологии.

8. По заданию преподавателя начертите эскизы конструкций указанных элементов ИМС.

9. На общей топологии ИМС задайте обозначения активных, пассивных и вспомогательных элементов. Исследуйте контактную металлизацию на поверхности кристалла. По результатам данного анализа постройте принципиальную электрическую схему, соответствующую разводке металлизации в ПИМС.

4. Содержание отчета

1. Краткое описание конструкции элементов полупроводниковых ИМС с эскизами поперечных сечений диффузионного резистора, МДП-конденсатора, планарно-эпитаксиального транзистора, п-канального и р-канального МДП-транзисторов.

2. Заполненная по результатам работы табл. 1.3.

3. Эскиз топологии ИМС в масштабе с указанием типа проводимости, названия и размеров областей в микрометрах.

4. Эскизы конструкций отдельных интегральных элементов.

5. Принципиальную электрическую схему ИМС.

5. Контрольные вопросы

1. Какими параметрами характеризуются микросхемы?

2. Какие конструкции интегральных резисторов, конденсаторов вам известны?

3. Что такое топология интегральной микросхемы?

4. Что такое активные и пассивные элементы ИМС?

5. Каким образом реализуется изоляция элементов в микросхемах?

6. Что называется контактной площадкой ИМС? Для чего она предназначена?

7. Оцените отношение сопротивлений двух интегральных резисторов, указанных преподавателем на микросхеме.

8. Как рассчитать удельное поверхностное сопротивление диффузионного резистора по известной топологии и номиналу сопротивления?

9. Как рассчитать удельную емкость конденсатора по известной топологии и номиналу емкости?

Лабораторная работа №2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА ИСПАРИТЕЛЯ КОЛЬЦЕВОЙ ФОРМЫ

Цель работы

Изучить процессы магнетронного распыления материалов с последующим осаждением, произвести расчет толщины напыляемой пленки и ее распределения в зависимости от радиуса подложки и расстояния до испарителя.

1. Краткие теоретические сведения

Одним из наиболее эффективных методов нанесения пленок в планарной технологии является метод магнетронного распыления материалов. Этот метод является разновидностью ионно-плазменного распыления. Распыление материала в этих системах происходит за счет бомбардировки поверхности мишени ионами рабочего газа. Скорость распыления в магнетронной системе в 50 – 100 раз выше по сравнению с обычным ионно-плазменным распылением. Высокая скорость распыления материала в магнетронной системе распыления определяется высокой плотностью ионного тока на мишень. Высокая плотность ионного тока достигается за счет локализации плазмы у поверхности мишени с помощью сильного поперечного магнитного поля.

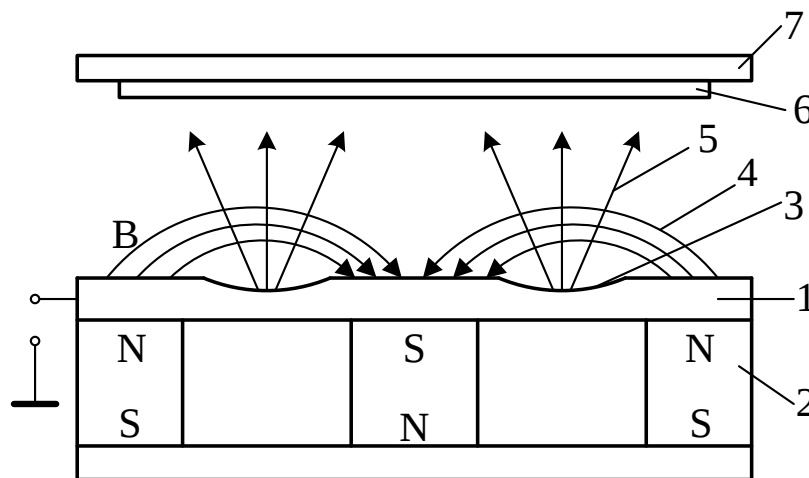


Рис. 2.1. Схема магнетронной системы распыления: 1 – мишень; 2 – магнитная система; 3 – зона распыления (эрозии); 4 – магнитные силовые линии; 5 – поток распыляемого вещества; 6 – подложка; 7 – подложкодержатель

Схема магнетронной системы распыления показана на рис. 2.1. Основными элементами системы являются мишень 1 и магнитная система 2. Магнитные силовые линии 4 замкнуты между полюсами магнитной системы. Между мишенью 1 и подложкодержателем 7 прикладывается электрическое поле и возбуждается аномальный тлеющий разряд. Замкнутое магнитное поле у поверхности мишени локализует разряд вблизи этой поверхности. Положительные ионы из плазмы аномального тлеющего разряда ускоряются электрическим полем и бомбарди-

руют мишень (катод). Под действием ионной бомбардировки происходит распыление мишени. Электроны, эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки, попадают в область скрещенных электрического и магнитного полей и оказываются в ловушке. Траектории движения электронов в ловушке близки к циклоидальным. Эффективность ионизации и плотность плазмы в этой области значительно увеличиваются. Это приводит к повышению концентрации ионов у поверхности мишени, увеличению интенсивности ионной бомбардировки мишени и к значительному росту скорости распыления мишени.

При построении модели скорости осаждения пленки путем распыления материала из кольцевого испарителя сделаем следующие допущения:

- распыленные атомы распределяются в пространстве по закону косинуса;
- распыленные атомы не сталкиваются друг с другом и с атомами рабочего газа;
- распыленные атомы осаждаются в точке соударения с подложкой.

В общем случае толщина пленки в произвольной точке подложки описывается выражением:

$$h = \frac{V}{\pi^2} \cos \varphi \cos \phi \cdot t, \quad (2.1)$$

где V – скорость распыления по толщине; φ – угол между нормалью к поверхности распыления и направлением распыления; ϕ – угол между нормалью к поверхности подложки и направлением осаждения; r – расстояние от элемента распыления до точки осаждения; t – время распыления.

Модель процесса напыления будем строить для случая, показанного на рис. 2.1, когда мишень и подложка параллельны и соосны. В этом случае угол распыления равен углу конденсации, т.е. $\varphi = \phi$. Рассмотрим геометрическую схему модели мишень-подложка, которая представлена на рис. 2.2.

Распределение распыленного материала по подложке является центрально-симметричным и описывается одной переменной – расстоянием от центра l . Бесконечно тонкий кольцевой элемент поверхности мишени можно представить в виде $dS = R \cdot d\alpha \cdot dR$, где α – угол между l и проекцией R на плоскость подложки $X'Y'$.

Угол φ можно выразить через радиус кольца и расстояние между мишенью и подложкой – $\cos \varphi = H/r$. Подставляя эти соотношения в уравнение (2.1) и суммируя дифференциальные элементы кольца мишени путем интегрирования, получаем:

$$h = \int_t \int_{R\alpha} \frac{V}{\pi^2} \frac{H^2}{r^2} R d\alpha dR dt. \quad (2.2)$$

Выразим расстояние r через элементы призмы l, R, d, H, α :

$$r = \sqrt{H^2 + l^2 + R^2 - 2lR \cos \alpha}, \quad (2.3)$$

где $l^2 + R^2 - 2lR \cos \alpha = d^2$. Подставим выражение (2.3) в уравнение (2.2):

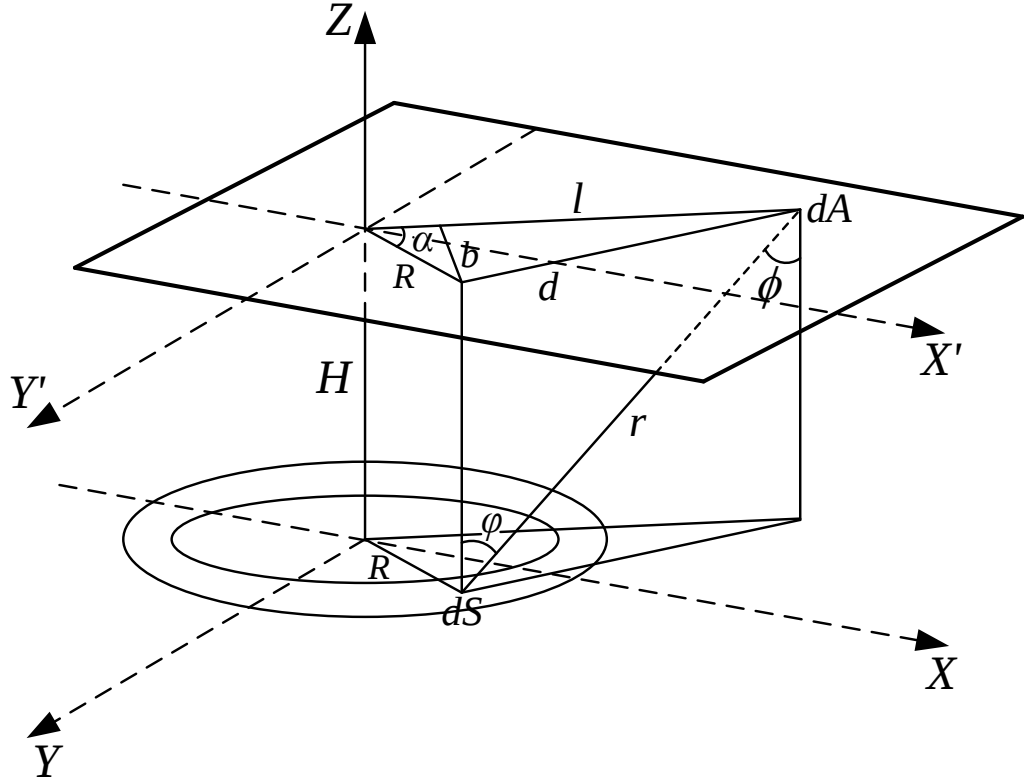


Рис. 2.2. Геометрическая схема модели мишень-подложка

$$h = \int_t \int_{R\alpha} \int \frac{V}{\pi} \frac{H^2 R}{(H^2 + l^2 + R^2 - 2lR \cos \alpha)^2} d\alpha dR dt. \quad (2.4)$$

Проинтегрировав это выражение по времени, получим полное количество распыленного вещества. В нашем случае полагаем, что скорость распыления постоянна во времени и не зависит от радиуса кольца распыления, тогда:

$$h = \frac{Vt}{\pi} \int \int \frac{H^2 R}{R\alpha (H^2 + l^2 + R^2 - 2lR \cos \alpha)^2} dR d\alpha. \quad (2.5)$$

Для интегрирования выражения (2.5) по углу делаем замену $b = H^2 + l^2 + R^2$, $c = -2lR$, получаем:

$$h = \frac{Vt}{\pi} \int \int \frac{H^2 R}{R\alpha (b + c \cdot \cos \alpha)^2} dR d\alpha. \quad (2.6)$$

Интегрирование проводим от 0 до 2π , делаем обратную подстановку, получаем:

$$h = 2Vt \int \frac{H^2 R}{R [(H^2 + R^2 - l^2)^2 + (2lR)^2]^{3/2}} dR. \quad (2.7)$$

Можно провести дальнейшее интегрирование, но результат будет очень громоздким. Поэтому при расчете будем использовать численное интегрирование выражения (2.7).

Количественной характеристикой процесса ионного распыления материалов является скорость распыления, которая определяется как:

$$V = \frac{h}{t}, \quad (2.8)$$

где h – толщина распыленного материала; t – время распыления.

Для расчета скорости распыления материалов при нормальном падении ионов можно пользоваться выражением:

$$V = \frac{j_1 \cdot Y \cdot M_2}{q \cdot N_A \cdot \rho}, \quad (2.9)$$

где j_1 – плотность ионного тока в сечении, перпендикулярном к направлению падения ионов, А/см²; Y – коэффициент распыления материала, атом/ион; M_2 – атомная масса атомов мишени, г/моль; q – заряд электрона ($1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл); N_A – число Авогадро ($6,023 \cdot 10^{23}$ атом/моль); ρ – плотность материала, г/см².

Коэффициент распыления Y характеризует эффективность распыления и определяется как среднее число атомов, удаляемых с поверхности твердого тела одной падающей частицей:

$$Y = \frac{\Gamma_2}{Q_1}, \quad (2.10)$$

где Γ_2 – поток атомов, выбитых с поверхности мишени, Q_1 – поток бомбардирующих ионов. Для коэффициента распыления типичны значения 1–5, хотя он может изменяться от 0 до 100. Это зависит от энергии и массы первичных частиц и угла их падения на поверхность, массы атомов мишени, кристаллического состояния твердого тела и ориентации кристалла, от поверхностной энергии связи атомов мишени.

Для реализации распыления атомам мишени должна быть сообщена энергия, превышающая энергию их связи в твердом теле. Эта энергия обозначается как пороговая энергия распыления $E_{пор}$. Величина ее колеблется в пределах 10 – 40 эВ. При энергиях меньше пороговой распыление отсутствует. При больших энергиях коэффициент распыления растет с увеличением энергии первичных частиц, достигает максимума, а затем опять падает. Уменьшение коэффициента распыления при более высоких энергиях связано с большой глубиной проникновения частиц в твердое тело и меньшим выделением энергии в поверхностном слое.

Согласно теории Зигмунда для аморфных и поликристаллических материалов для низких энергий ионов до 1 кэВ коэффициент распыления определяется следующим выражением:

$$Y = \frac{3}{\pi^2} \alpha \frac{M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} \cdot \frac{E_1}{2E_c}, \quad (2.11)$$

где M_1 и M_2 – атомные массы ионов и атомов мишени, г/моль; E_1 – энергия падающих ионов, эВ; E_c – энергия сублимации атомов мишени (энергия связи атома с поверхностью), эВ; α – безразмерный параметр, зависящий от M_1/M_2 .

Зависимость параметра α от отношения M_1/M_2 при нормальном падении пучка ионов показана на рис. 2.3.

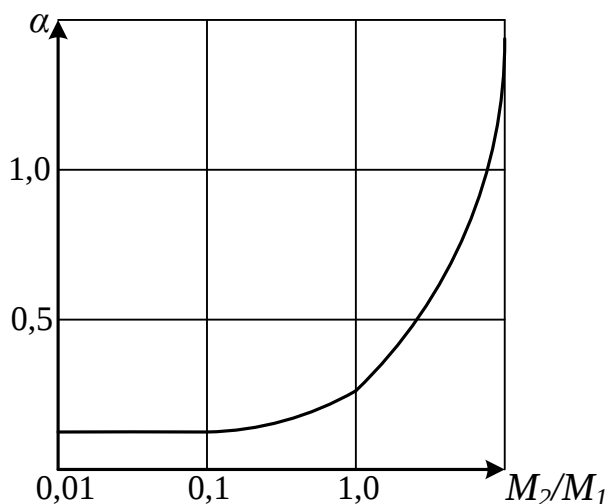


Рис. 2.3. Зависимость коэффициента α от отношения массы атома распыляемого материала M_2 к массе иона M_1

Для упрощения расчетов коэффициента распыления зависимость рис. 2.3 можно аппроксимировать. Для $\alpha(M_2/M_1)$ используется выражение Мацунами:

$$\alpha(M_2/M_1) = 0.10 + 0.16(M_2/M_1)^{0.7}. \quad (2.12)$$

Поскольку энергия ионов при распылении в магнетронной системе при работе на аргоне лежит в диапазоне 350 – 450 эВ, то при расчете коэффициента распыления будет использоваться выражение (2.11). Справочные данные по характеристикам распыляемых материалов приведены в табл. 2.1.

Расчеты проводятся в следующем порядке. Вначале рассчитывается коэффициент распыления и скорость распыления материала мишени. Затем проводится построение контурного изображения толщины напыляемой пленки в виде распределения по всей поверхности, ограниченной радиусом подложки и расстояния до испарителя. Контурный график такого распределения представлен на рис. 2.4. После этого рассчитывается распределение толщины напыленной пленки по подложке и неравномерность этого распределения. С учетом выданного задания проводится оптимизация положения подложкодержателя с подложкой относительно мишени.

2. Порядок выполнения работы

Оптимизировать процесс напыления материала в магнетронной системе распыления: определить расстояние от поверхности мишени, на котором можно получить заданную толщину напыляемой пленки с требуемой неравномерностью при максимально возможной скорости напыления. Варианты заданий приведены в табл. 2.2.

Табл. 2.1

Характеристики некоторых материалов, необходимые для расчета

Материал	Атомный номер Z_2	Атомная масса M_2 , г/моль	Энергия сублимации E_s , эВ	Плотность ρ , г/см ³
Be	4	9	3,48	1,85
Mg	12	24,3	1,59	1,76
Al	13	27	3,26	2,7
Si	14	28	3,91	2,42
Ti	22	47,9	4,34	4,52
V	23	51	3,7	6,11
Cr	24	52	3,68	7,19
Mn	25	54,9	3,15	7,44
Fe	26	55,9	4,15	7,87
Ni	28	58,7	4,41	8,9
Cu	29	63,5	3,56	8,96
Ge	32	72,6	3,77	5,32
Nb	41	92,9	7,5	8,57
Mo	42	96	6,9	10,2
Ag	47	107,8	2,7	10,5
Ta	73	181	8,7	16,6
W	74	183	8,76	19,3
Pt	78	195	5,56	21,5
Au	79	197	3,92	19,32

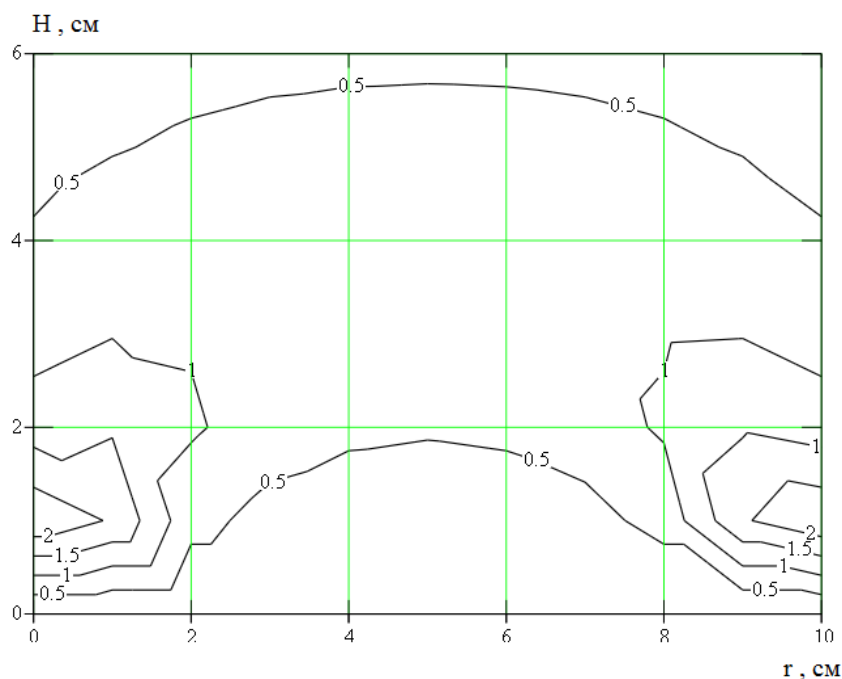


Рис. 2.4. Контурный график распределения толщины напыляемой пленки в зависимости от радиуса пластины и расстояния до испарителя

Табл. 2.2

№ варианта	Материал	Толщина пленки h , мкм	Диаметр пластины d , см	Неравномерность $\Delta \pm \%$	Радиус распыления R_1 , см
1	Al	1,0	10	5	5,5
2	Si	0,5	7,6	5	5
3	Cr	0,1	10	5	5,5
4	Cu	0,3	10	3	6,5
5	Ti	0,1	7,6	2	5
6	Mo	0,2	7,6	3	4,5

Примечание: 1. Рабочий газ – Ar.

2. Ширина кольца распыления $R_2 - R_1 = 0,5$ см

1. Запустить программу MathCAD. Открыть файл «Лабораторная работа №2».
2. Выбрать из табл. 2.1 необходимые для расчета параметры. Ввести выбранные параметры в соответствующие ячейки входных данных.
3. Определить коэффициент α по аппроксимирующему выражению.
4. Получить контурное изображение профиля распределения напыляемой пленки в зависимости от радиуса подложки и расстояния до испарителя.
5. Задать значение расстояния подложки от испарителя H .
6. Определить среднюю, максимальную и минимальную толщину напыленной пленки по двумерному графику распределения толщины пленки графическим способом. Для этого можно использовать функцию «Трассировка» из меню «Формат».
7. Ввести полученные данные в соответствующие ячейки и получить значение неравномерности толщины пленки по пластине.
8. Добиться требуемой неравномерности толщины пленки, меняя расстояние до испарителя (H).
9. Добиться требуемой средней толщины напыленной пленки с помощью параметра «время напыления».
10. Занести в отчет все входные данные, полученные результаты и график распределения примеси.

4. Контрольные вопросы

1. Какой эффект лежит в основе магнетронного распыления материалов?
2. Из каких основных элементов состоит магнетронная система распыления?
3. От чего зависит скорость распыления материала при ионной бомбардировке?
4. От каких параметров зависит коэффициент распыления?
5. Какие допущения делаются при построении модели кольцевого испарителя?

Лабораторная работа №3 НАКЛОННАЯ ЛОКАЛЬНАЯ ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ

Цель работы

Изучить процессы наклонной локальной ионной имплантации с учётом распределения примеси под края защитной маски, исследовать зависимости профиля распределения концентрации примеси от параметров ионной имплантации.

1. Краткие теоретические сведения

1.1. Характеристики процесса ионной имплантации

Суть процесса ионного внедрения заключается в формировании пучков ионов с одинаковой массой и зарядом, обладающих необходимой энергией, и внедрении их в подложку (мишень) в заданном количестве, называемом дозой. Таким образом, основными характеристиками процесса являются *энергия* и *доза ионов*.

Необходимая энергия E_0 приобретается ионом под действием разности потенциалов U :

$$E_0 = neU, \quad (3.1)$$

где n – кратность ионизации, $n = 1, 2, 3$; e – заряд электрона.

Применение ионного легирования по сравнению с диффузионным позволяет обеспечить:

- строгое задание количества примеси, определяемого током ионов в процессе внедрения;
- воспроизводимость и однородность распределения примеси;
- возможность использования в качестве маски при легировании слоев SiO_2 и Si_3N_4 ;
- внедрение через тонкие слои диэлектриков и резистивных материалов;
- более низкую по сравнению с диффузией температуру процесса.

Вместе с тем процесс ионного внедрения сопровождается рядом явлений, для устранения которых необходимо использование специальных технологических приемов. В результате взаимодействия с ионами в решетку полупроводника вносятся радиационные повреждения, которые при последующих операциях могут искажать профили распределения примеси. Дефекты способствуют также увеличению токов утечки и изменению других характеристик приборов. Устранение дефектов требует постимплантационной высокотемпературной обработки – отжига.

1.2. Пробег ионов

При движении в твердом теле быстрый ион в результате столкновений с ядрами и электронами теряет свою энергию и останавливается. Полная длина пути, пройденного ионом, и ее проекция на направление первоначального движения иона называются соответственно пробегом R и проекцией R_p пробега (рис. 3.1, а). По всей длине пробега образуются дефектные области (рис. 3.1, б).

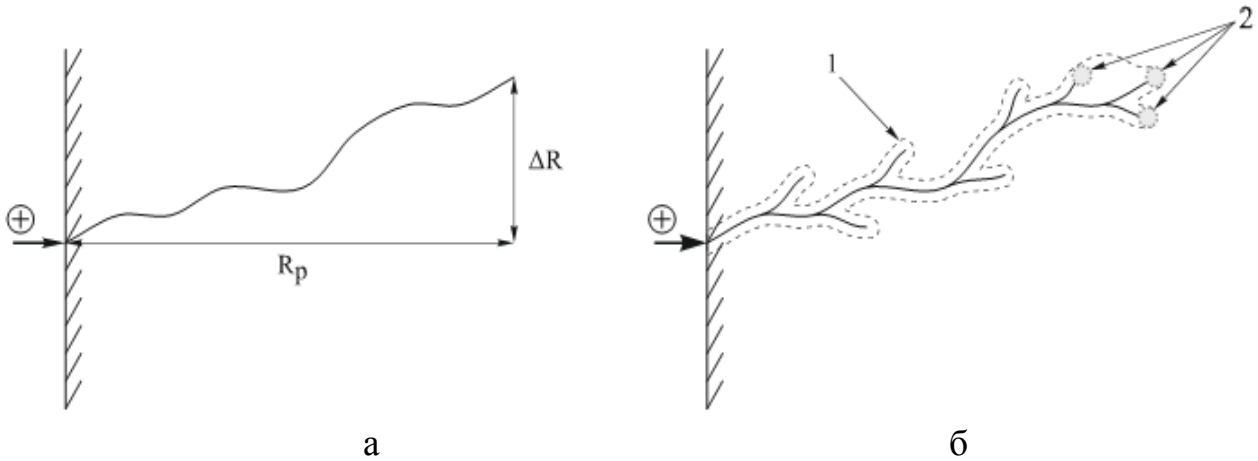


Рис. 3.1. Схема движения внедряемого иона: а – пробег R , проекция пробега R_p и рассеяние пробега ΔR_p и ΔR ; б – образование дефектных областей в подложке на пути иона: 1 – точечные дефекты; 2 – аморфные области

Вследствие того, что число столкновений и энергия, передаваемая при столкновении, являются переменными величинами, характеризующими случайный процесс, пробег ионов данного типа с одной и той же начальной энергией не будет одинаковым. Другими словами, движущиеся ионы после торможения останавливаются в точках, разбросанных по всему объему твердого тела, что приводит к распределению пробега и их проекций, для описания которых требуются такие характеристики функции распределения, как средний пробег ионов, среднеквадратичное отклонение пробега ионов и боковое отклонение ионов под край маски (или проекций пробега).

Боковое отклонение имплантируемых ионов обусловлено их отклонением за счет взаимодействия с краем защитной маски (дисперсия ионов под край маски). Им обычно пренебрегают, поскольку оно значительно меньше среднего пробега ионов и среднеквадратичного отклонения пробега ионов. Однако для СБИС с микронными и субмикронными размерами элементов боковое отклонение становится очень важным, поскольку двумерные эффекты вблизи края маски сильно влияют на выходные характеристики приборов. Как и разброс пробега, боковое отклонение является результатом рассеяния ионов, и поэтому оба эти эффекта одинаковы по порядку величины. Существенной становится и геометрия края маски, которая вносит свой вклад в распределение примеси.

Распределение примеси под маску прямоугольной формы с учётом бокового рассеяния можно рассчитать по следующей формуле:

$$C(x, y) = \frac{N}{\sqrt{2\pi} \cdot R_p} \exp\left(-\frac{(y - R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right) \cdot \left(\operatorname{erf} \frac{x + a}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_x} - \operatorname{erf} \frac{x - a}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_x}\right), \quad (3.2)$$

где N – доза имплантации, ΔR_x – отклонение пробега ионов под край маски, a – полуширина маски, y – координата вглубь образца в направлении падения ионного пучка, x – координата вдоль направления поверхности образца, R_p – нормальный пробег, ΔR_p – разброс или стандартное отклонение проективного пробега.

Также одним из основных параметров процесса ионной имплантации является *угол падения* пучка ионов относительно нормали к поверхности мишени. При этом у краев маски наблюдаются два эффекта:

1) образование теневого участка:

$$C(x, y) = \frac{C(x)}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{y - a_1}{\sqrt{2}\Delta R'}\right); \quad (3.3)$$

2) имплантация под край защитной маски:

$$C(x, y) = \frac{C(x)}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{a_2 - y}{\sqrt{2}\Delta R'}\right). \quad (3.4)$$

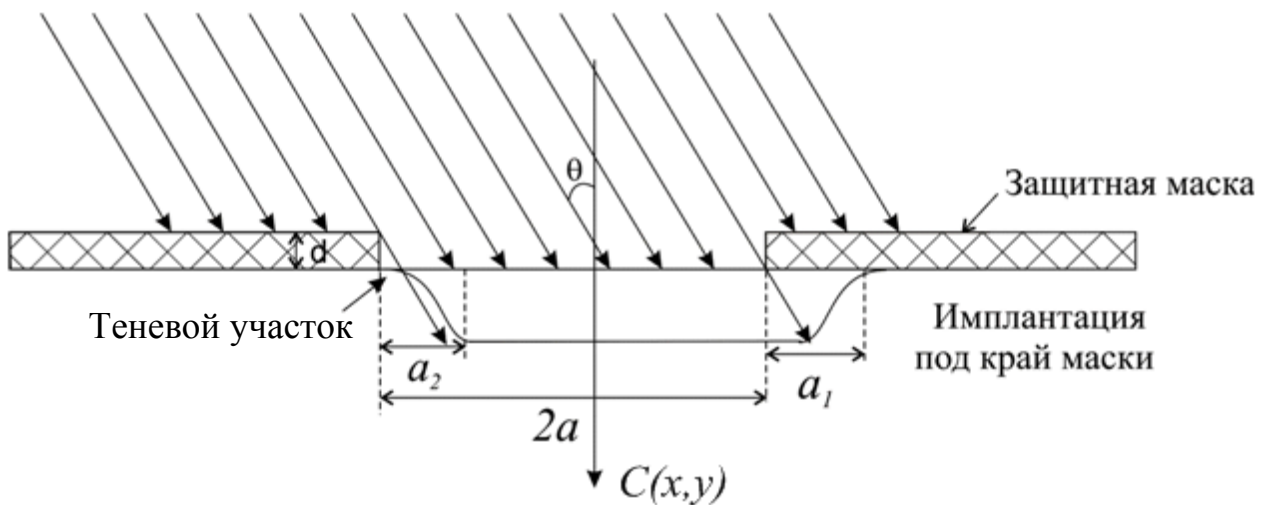


Рис. 3.2. Формирование боковых профилей распределения наклонноимплантированных примесей

Из геометрических соображений следует:

$$\begin{aligned} a_1 &= x \cdot \operatorname{tg} \theta, \\ a_2 &= (x + d) \cdot \operatorname{tg} \theta, \\ R' &= \Delta R \cdot \sin \theta. \end{aligned} \quad (3.5)$$

2. Порядок выполнения работы

Расчёт проводится в программе MathCad. Согласно варианту задания задайте исходные данные (табл. 3.1). Рассчитайте отклонение пробега ионов под край маски ΔR_x . Для расчёта используйте значения коэффициентов, приведённые в табл. 3.2. Далее расчёт осуществляется по следующей последовательности:

$$\begin{aligned} f(E) &:= z + s(E) \cdot E \\ \Delta R_x &:= f(E) \cdot 10^{-7} \text{ см} \end{aligned}$$

1. Доза имплантации, [ион/см²]:

$$N := N_0 \cdot D.$$

2. Расчёт параметров $a_1(x)$ и $a_2(x)$:

$$a_1(x) := a - [d + (R_p + \Delta R_p) \cdot \cos(\theta)] \cdot \tan(\theta),$$

$$a2(x) := a + [(Rp + \Delta Rp) \cdot \cos(\theta)] \cdot \tan(\theta).$$

3. Расчет эквиконцентрационной зависимости распределения примеси в кремнии:

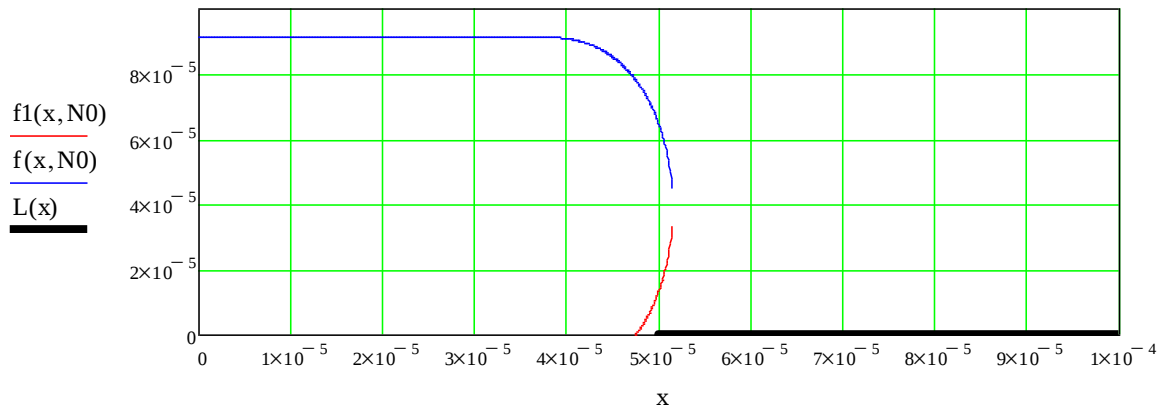
$$f(x, N0) := Rp \cdot \cos(\theta) + \sqrt{2 \cdot (\Delta Rp \cdot \cos(\theta))^2 \cdot \ln \left[\frac{N}{N0 \cdot \Delta Rp \cdot \cos(\theta) \cdot \sqrt{2\pi}} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - a1(x)}{\Delta Rx \cdot \sin(\theta)} \right) \right) \right]}$$

$$f1(x, N0) := Rp \cdot \cos(\theta) - \sqrt{2 \cdot (\Delta Rp \cdot \cos(\theta))^2 \cdot \ln \left[\frac{N}{N0 \cdot \Delta Rp \cdot \cos(\theta) \cdot \sqrt{2\pi}} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - a1(x)}{\Delta Rx \cdot \sin(\theta)} \right) \right) \right]}$$

Построение края маски:

$$L(x) := \begin{cases} 0 & \text{if } x > a \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

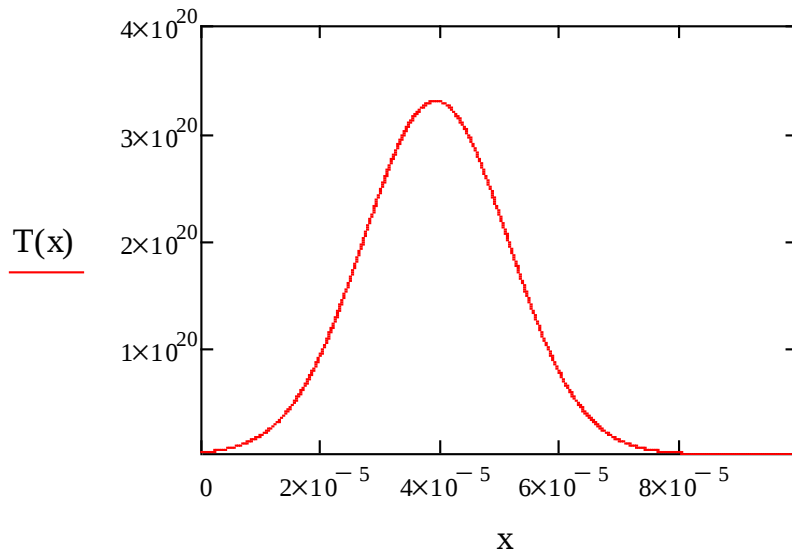
Для этого необходимо использовать сочетание клавиш «Ctrl +]», а для создания условий if и otherwise «Shift +]» и «Ctrl + Shift +]».



4. Распределение ионно-имплантированной примеси:

$$\Delta R := \Delta Rp \cdot \cos(\theta) + \Delta Rx \cdot \sin(\theta)$$

$$T(x) := \frac{N}{\sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \Delta R \cdot \left(1 + \operatorname{erf} \left(Rp \cdot \frac{\cos(\theta)}{\sqrt{2} \Delta R} \right) \right)} \cdot \exp \left[\frac{-(x - Rp \cdot \cos(\theta))^2}{2 \cdot \Delta R^2} \right]$$



5. Расчет профиля распределения примеси с учётом эффекта образования теневого участка и имплантации под край маски:

$$C(x,y) := \frac{N}{\Delta R_p \cdot \cos(\theta) \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{y - R_p \cdot \cos(\theta)}{\Delta R_p \cdot \cos(\theta)}\right)^2\right] \cdot \left(1 - \operatorname{erf}\left(-\frac{x - a_1(x)}{\Delta R_x \cdot \sin(\theta)}\right)\right)$$

$$x := R_p + \Delta R_p$$

$$C(x) := N_0 \cdot \exp\left[\left(-\frac{x - R_p \cdot \cos(\theta)}{\sqrt{2} \cdot \Delta R}\right)^2\right];$$

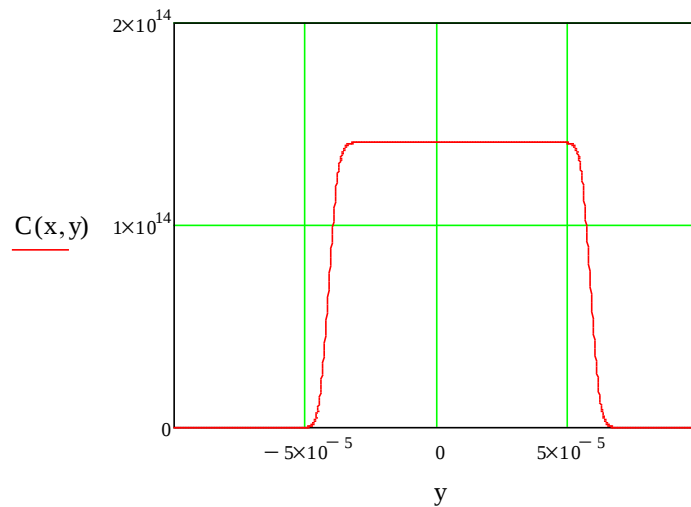
а) распределение примеси под край маски:

$$C_2(x,y) := \frac{C(x)}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left[-\frac{(y - a_1(x)) + [2 \cdot a - 2 \cdot [d + (R_p + \Delta R_p) \cdot \cos(\theta)] \cdot \tan(\theta)]}{\sqrt{2} \cdot (\Delta R_x \cdot \sin(\theta))}\right]$$

б) распределение примеси с образованием теневого участка:

$$C_3(x,y) := \frac{C(x)}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left[-\frac{a_2(x) - y}{\sqrt{2} \cdot (\Delta R_x \cdot \sin(\theta))}\right]$$

$$C(x,y) := \begin{cases} C_3(x,y) & \text{if } 0 \leq y \leq 2a \\ C_2(x,y) & \text{if } -2a \leq y < 0 \end{cases}$$



6. Расчет трёхмерного распределения примеси:

$$C(x,y) := \frac{N}{\Delta R_p \cdot \cos(\theta) \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{y - R_p \cdot \cos(\theta)}{\Delta R_p \cdot \cos(\theta)}\right)^2\right] \cdot \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x - a_1(x)}{\Delta R_x \cdot \sin(\theta)}\right)\right)$$

$$x_{\text{low}} := 0 \quad x_{\text{high}} := 0.6 \cdot 10^{-4} \text{ см}$$

$$y_{\text{low}} := 0 \quad y_{\text{high}} := 10^{-4} \text{ см}$$

$$x_n := 60 \quad y_n := 60$$

$$i := 0.. x_n - 1$$

$$x_{\text{ind}_i} := x_{\text{low}} + i \cdot \frac{x_{\text{high}} - x_{\text{low}}}{x_n - 1}$$

$$j := 0.. y_n - 1$$

$$y_{indj} := y_{low} + j \cdot \frac{y_{high} - y_{low}}{y_n - 1}$$

$$M_{i,j} := C(x_{ind_i}, y_{ind_j}).$$

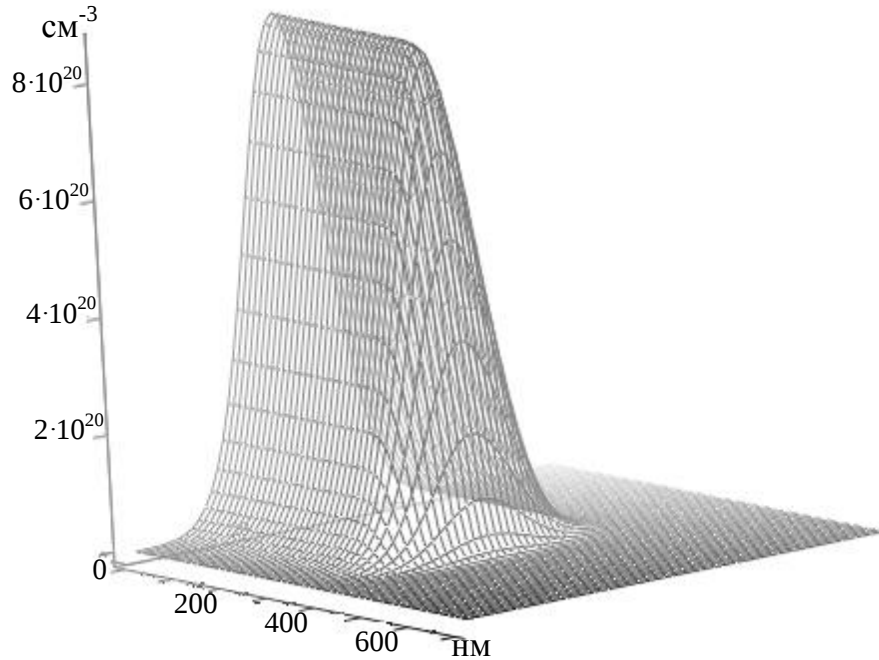


Рис 3.3. Трехмерное распределение имплантированной примеси

7. Максимальный уход р-п-перехода за край маски:

$$C1(x) := \frac{N}{N0 \cdot \Delta R_p \cdot \cos(\theta) \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - a1(x)}{\Delta R_x \cdot \sin(\theta)} \right) \right] - 1$$

$$x := a$$

$$x1 := \operatorname{root}(C1(x), x)$$

$$\Delta x1 := x1 - a.$$

Вычислить $C(x1, R_p)$.

8. Положение р-п-перехода под маской:

$$C2(x) := \frac{1}{N0} \cdot \left[\frac{N}{\Delta R_p \cdot \cos(\theta) \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{a2(x) - x}{\Delta R_x \cdot \sin(\theta)} \right) \right) \right] - 1$$

$$x := a$$

$$x2 := \operatorname{root}(C2(x), x)$$

$$\Delta x2 := x2 - a.$$

Вычислить $C(x2, 0)$.

9. Вывести значения глубины р-п-перехода в центре окна $f(0, N0)$, максимальную концентрацию примеси в легированной области $C(0, R_p)$, максимальный уход р-п-перехода за край маски, уход р-п-перехода за край маски.

Табл. 3.1

№	Примесь	E_0 , эВ	R_p , нм	ΔR_p , нм	a , нм	D , мкКл/см ²	d , нм	θ , °	N_0 , см ⁻³
1	P	100	123	35	400	100	2	6	10^{15}
2	P	120	149	41	500	150	3	7	10^{16}
3	P	140	175	47	400	200	2	8	10^{17}
4	P	160	201	52	500	100	3	9	10^{15}
5	P	180	228	57	400	150	2	10	10^{16}
6	B	100	398	94	500	200	3	6	10^{17}
7	B	120	469	102	400	100	2	7	10^{15}
8	B	140	537	110	500	150	3	8	10^{16}
9	B	160	603	121	400	200	2	9	10^{17}
10	B	180	665	126	500	100	3	10	10^{15}
11	As	100	58	12.5	400	150	2	6	10^{16}
12	As	120	68	14.5	500	200	3	7	10^{17}
13	As	140	79	16	400	100	2	8	10^{15}
14	As	160	89	18	500	150	3	9	10^{16}
15	As	180	99	20	400	200	2	10	10^{17}
16	Sb	100	46	7.4	500	100	3	6	10^{15}
17	Sb	120	53	8.4	400	150	2	7	10^{16}
18	Sb	140	60	9.5	500	200	3	8	10^{17}
19	Sb	160	67	10.5	400	100	2	9	10^{15}
20	Sb	180	74	11.5	500	150	3	10	10^{16}

Табл. 3.2

Значения коэффициентов для расчёта ΔR_x

	Sb	As	P	B
z	1.07	-0.25	0	2.09
$s(E)$	0.124	0.186	0.48	$1.48 - 2.72 \cdot 10^{-3} \cdot E$

3. Контрольные вопросы

1. Опишите процесс проникновения ионов в вещество.
2. Что такое доза облучения, чем она определяется?
3. Как зависит длина нормального пробега и отклонение нормального пробега от энергии имплантируемых ионов, постройте графики и объясните.
4. Чем обусловлено проникновение примеси под защитную маску в процессе ионной имплантации?
5. Как изменится профиль распределения ионно-имплантируемой примеси при наличии эффекта каналирования?
6. Опишите физические явления, обуславливающие образование теневого участка в процессе наклонной локальной ионной имплантации.
7. Для чего применяется локальная наклонная ионная имплантация?
8. Опишите основные элементы установки для ионной имплантации.

Лабораторная работа №4
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО ВЫХОДА КРЕМНИЯ ПРИ ХЛОРИДНОМ МЕТОДЕ ЭПИТАКСИИ

Цель работы

Изучить процесс хлоридного метода эпитаксии, провести термодинамический анализ системы «тетрахлорид кремния – водород» и определить выход кремния при заданных параметрах процесса.

1. Краткие теоретические сведения

Основополагающим элементом любой полупроводниковой биполярной структуры является р-п-переход. Технологический процесс его формирования во многом определяет его свойства. Так в процессе диффузии формирование р-п-переходов происходит только вследствие компенсации имеющихся в исходном материале примесей. В большинстве случаев это нежелательно, так как во время каждого последующего цикла диффузии число атомов примеси, необходимое для компенсации ранее введенных атомов легирующей добавки, увеличивается экспоненциально. Пределы растворимости используемых при диффузии в кремний примесей таковы, что выполнить более трех последовательных диффузионных процессов практически невозможно. Поэтому методом диффузии трудно создавать высокоомные слои (с низкой концентрацией примесей) и контролировать ход диффузии в них. Немаловажным является также и то, что подвижность носителей заряда обратнопропорциональна полному количеству примесей, содержащемуся в полупроводнике. В материале с большой концентрацией доноров и акцепторов подвижность уменьшается, что ухудшает электрические параметры приборов.

Решение различных технико-конструкторских задач, в том числе и вышеперечисленных, возможно с применением *эпитаксиальных процессов* в технологии микроэлектроники. Одним из важнейших применений эпитаксии является процесс формирования скрытого слоя в полупроводниковых интегральных микросхемах. Наличие скрытого слоя позволяет повысить быстродействие биполярных транзисторов и всей микросхемы в целом.

Под *эпитаксией* понимается процесс ориентированного выращивания монокристаллического слоя на поверхности монокристаллической подложки. В процессе эпитаксиального выращивания образующаяся фаза закономерно продолжает кристаллическую решетку подложки с образованием переходного эпитаксиального слоя. Переходный слой способствует когерентному срастанию двух решеток по плоскостям и направлениям со сходной плотностью упаковки атомов, через него передается основная информация о кристаллической структуре подложки в эпитаксиальный слой.

В современной технологии процессы эпитаксии занимают одно из ведущих мест в производстве полупроводниковых интегральных микросхем и

большинства типов дискретных полупроводниковых приборов. Эпитаксиальные слои в настоящее время могут быть получены в структурном отношении более совершенными, чем объемные монокристаллы. Они обладают практически идеальной однородностью распределения легирующих примесей. Содержание неконтролируемых примесей в них значительно ниже, чем в монокристаллах, полученных методом Чохральского или бестигельной зонной плавкой.

При эпитаксии атомы примеси внедряются из внешней среды в кристаллическую решетку эпитаксиального слоя непосредственно в процессе роста. Отношение числа атомов кремния к числу атомов примеси легко регулируется, а электрофизические параметры эпитаксиального слоя могут изменяться в очень широких пределах, причем полностью исключается необходимость компенсации примесей.

По природе взаимодействия «подложка – растущая кристаллическая фаза» различают три вида эпитаксиальных процессов: гомоэпитаксия (автоэпитаксия – АЭС), гетероэпитаксия и хемоэпитаксия. *Гомоэпитаксия* – это процесс выращивания монокристаллического слоя вещества, однотипного по структуре с подложкой и отличающегося от нее только содержанием легирующих примесей. *Гетероэпитаксия* – это процесс выращивания монокристаллического слоя вещества, отличающегося по химическому составу от вещества подложки, но близкому ему по кристаллографической структуре. *Хемоэпитаксия* – это процесс выращивания монокристаллического слоя вещества, в результате которого образование новой фазы происходит при химическом взаимодействии вещества подложки с веществом, поступающим из внешней среды. Полученный хемоэпитаксиальный слой отличается по составу как от вещества подложки, так и от вещества, поступающего на ее поверхность извне.

1.1. Газофазная эпитаксия кремния

Эпитаксиальные слои можно получить из газообразной фазы или из конденсированной фазы (жидкой и твердой). И настоящее время почти все практически важные методы получения авто- и гетероэпитаксиальных слоев относятся к первой группе.

Наиболее широкое практическое применение находят методы выращивания пленок при взаимодействии нагретой подложки с различными парогазовыми смесями в открытом процессе. Этими методами получают автоэпитаксиальные слои полупроводников (кремний, германий, арсенид галлия и др.), используя в качестве активного газа-носителя водород.

Промышленная технология изготовления автоэпитаксиальных слоев кремния в основном базируется на использовании группы химических диссоциативных газофазных методов. К ним прежде всего относятся «хлоридный метод» — восстановление кремния из парогазовой смеси $[\text{SiCl}_4 + \text{H}_2]$ и «силановый» метод, основанный на пиролизе моносилана $[\text{SiH}_4 + \text{H}_2]$. В меньшей степени распространены методы восстановления кремния из SiHCl_3 и Si_2Cl_6

Успех технологии газофазного химического осаждения (ГХО) объясняется следующими ее достоинствами.

Во-первых, любой материал может быть получен при температуре, значительно меньшей, чем при кристаллизации из расплава. Благодаря этому, а также исключению дорогих плавильных печей и ванн, может быть обеспечена большая чистота при меньших затратах.

Во-вторых, поток осаждающегося вещества направлен в сторону нагретой поверхности, которая может иметь сколь угодно сложную конфигурацию, а не только плоскую, как при вакуумном напылении.

В-третьих, благодаря огромному выбору исходных реагентов и типов химических реакций (восстановление, пиролиз, диспропорционирование, гидролиз, окисление) метод применим для получения большого числа сплавов и химических соединений.

В ряде случаев используются методы конденсации кремния из молекулярных пучков в сверхвысоком вакууме (до 10^{-6} Па), которые находят все большее применение в связи с созданием мобильных установок и мощных безмасляных средств откачки, позволяющих снизить температуру автоэпитаксии кремния до 700 – 900 К.

При газофазной эпитаксии атомы полупроводника переносятся к подложке в составе химического соединения. Для кремния это могут быть, например, тетрахлорид кремния SiCl_4 или силан SiH_4 . Весь процесс можно разбить на ряд стадий: перенос реагентов к поверхности подложки; адсорбция и химическая реакция реагентов на поверхности подложки; десорбция продуктов реакции; перенос продуктов реакции от поверхности подложки к основному потоку; упорядочение адсорбированных атомов в кристаллическую решетку. Результирующая скорость роста эпитаксиального слоя определяется самой медленной стадией из приведенных выше.

Если скорость реакции лимитируется массопереносом, то основным фактором, определяющим скорость осаждения, можно считать пограничный слой. Такой режим называют диффузионным, так как реагенты и продукты реакции должны преодолевать динамический пограничный слой преимущественно диффузией. Скорость реакции в диффузионном режиме можно регулировать изменением толщины пограничного слоя, существование которого обусловлено адсорбционными силами самой поверхности, а по мере удаления от нее — внутренним трением (вязкостью) газа. Чем больше его толщина, тем труднее идет доставка к поверхности реагентов из ядра потока.

В процессе выращивания эпитаксиальных слоев можно осуществлять их легирование. При этом атомы примеси внедряются в кристаллическую решетку растущей пленки. Соотношение атомов примеси и атомов кремния в газовой фазе регулируют таким образом, чтобы выращенный слой содержал заданное количество примеси. Можно получать слои с любым отличным от подложки уровнем легирования. Это позволяет получать высокоомные слои на низкоомной подложке или создавать резкие р-п-переходы, не прибегая, например, к твердофазной

диффузии. Возможно также непрерывное изменение степени легирования эпитаксиального слоя в процессе его выращивания, что приводит к постепенному изменению уровня легирования по толщине слоя. Этот метод используется, в частности, в производстве полупроводниковых солнечных батарей с улучшенными рабочими характеристиками.

1.2. Хлоридный метод эпитаксии

Хлоридный метод – исторически первый и наиболее распространенный промышленный метод получения автоэпитаксиальных слоев кремния. Его широкое применение связано с доступностью высокочистого тетрахлорида кремния и водорода в промышленных масштабах, освоением процесса восстановления кремния из тетрахлорида, сравнительно низкими затратами, относительной безопасностью процесса и возможностью управления его основными параметрами.

Процесс эпитаксии протекает в системах проточного типа. Рост АЭС из парогазовой смеси $[\text{SiCl}_4 + \text{H}_2]$ происходит на поверхности кремниевой подложки, разогретой до температур 1200 – 1400 К. Парогазовую смесь (ПГС) $[\text{SiCl}_4 + \text{H}_2]$ получают путем насыщения водорода парами тетрахлорида кремния при пропускании водорода через испаритель с жидким SiCl_4 .

Взаимодействие тетрахлорида кремния с водородом описывается химической реакцией:



Действительный ход этой реакции многостадийен и может быть представлен в виде последовательных и параллельных реакций, которые будут рассмотрены при термодинамическом анализе.

Реакцию осуществляют при температурах 1000 – 1250 °С. Реально реакция происходит в несколько стадий с образованием промежуточных продуктов SiHCl_3 и SiCl_2 . Скорость роста эпитаксиального слоя зависит от температуры процесса и ряда других технологических факторов и обычно находится в диапазоне от 0,5 до 1,5 мкм/мин. Указанная выше реакция (точнее, все ее составляющие) обратима. Это означает, что при определенных условиях, например, когда температура реакции выходит за пределы некоторого рабочего интервала, скорость роста становится отрицательной, то есть вместо роста эпитаксиального слоя идет его травление парами HCl . Или если концентрация SiCl_4 слишком высока, травление будет происходить и в отсутствие HCl в несущем газе (рис. 4.1). Так, при температуре 1170 °С и молярной концентрации SiCl_4 , равной 0,27 – 0,28, начинается травление Si .

Непосредственно перед процессом эпитаксии подложки подвергаются термообработке в водороде или вакууме при температурах 1150 – 1300 °С и высокотемпературному травлению в ПГС $[\text{HCl} + \text{H}_2]$. Предэпитаксиальная обработка подложек проводится с целью их очистки и обеспечения геометрического совершенства поверхности.

Легирование эпитаксиальных слоев осуществляется путем контролируемого введения паров легколетучих соединений элементов III и V групп периодической системы в парогазовую смесь $[\text{SiCl}_4 + \text{H}_2]$. Способы легирования могут быть различными:

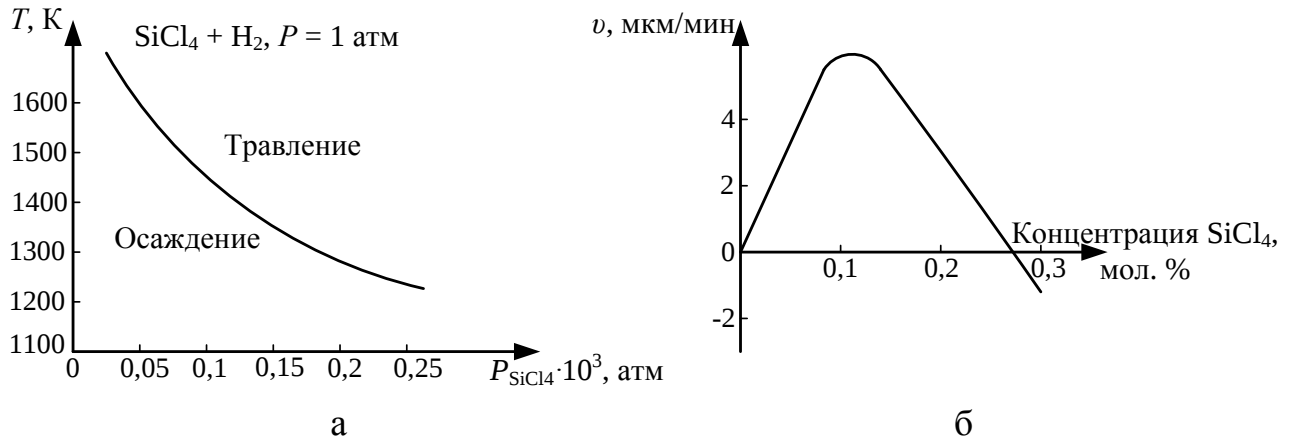


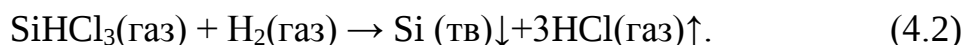
Рис. 4.1. Граница областей роста и травления кремния в системе $\text{SiCl}_4\text{--H}_2$ в зависимости от температуры и парциального давления P_{SiCl_4} (а) и зависимость скорости роста эпитаксиального слоя SiCl_2 ($T = 1170^\circ\text{C}$) (б)

1) легирование из раствора (для получения пленок n-типа с $\rho \geq 0,1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$). С этой целью к жидкому SiCl_4 добавляют летучие примеси PCl_5 , BCl_3 и BBr_3 , которые испаряются вместе с SiCl_4 и поступают в реактор. Недостатком этого метода является необходимость приготовления специального раствора для каждой степени легирования;

2) газовое легирование, являющееся более практичным. При этом примесь вводится в реактор отдельным газовым потоком. В качестве донорных примесей используется фосфин (PH_3) или арсин (AsH_3), а в качестве акцепторной примеси диборан (B_2H_6). Эти газы разбавляют водородом и вводят в реакционную камеру. Используя такой метод, удастся выращивать эпитаксиальные слои n- и p-типа с концентрацией примеси $5 \cdot 10^{14} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$.

К достоинствам хлоридного метода следует отнести возможность получения достаточно совершенных слоев и относительную простоту оборудования. Недостатки – значительная диффузия примесей из подложки в слой и довольно высокая степень автолегирования. Диффузия обусловлена высокой температурой процессов; для ее уменьшения в качестве легирующей примеси в подложке выбирают элемент с наименьшим коэффициентом диффузии (в случае подложек n-типа не фосфор, а мышьяк или сурьму). Ограничением метода в ряде случаев является трудность получения достаточно чистого SiCl_4 .

Можно использовать восстановление трихлорсилана (SiHCl_3) водородом – метод, близкий к хлоридному методу. Наиболее вероятно протекание реакции по уравнению:



Использование трихлорсилана при водородном восстановлении имеет ряд преимуществ по сравнению с SiCl_4 . Это легкая дистилляционная очистка из-за отсутствия азеотропов с примесями и большая скорость осаждения. Перечисленные преимущества позволяют существенно повысить производительность установок при производстве полупроводникового кремния. Хлорсиланы также предпочтительнее использовать вместо силана и дисилана при осаждении методом ГХО, так как гомогенное зародышеобразование мелких (тонкодисперсных) частиц с хлорсиланами менее вероятно.

Таким образом, трихлорсилан является практически наиболее важным веществом для производства кремния, а тетрахлорид кремния – основным побочным продуктом этого производства.

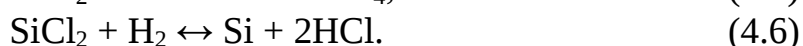
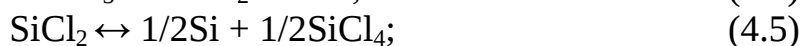
1.3. Термодинамический анализ системы $\text{SiCl}_2 + \text{H}_2$

Термодинамический анализ позволяет определить принципиальную возможность осуществления реакции, смещение равновесия в ту или иную сторону в интересующем процессе и максимально возможный выход элементарного кремния в зависимости от температуры и состава ПГС.

Система Si-Cl-H является классическим примером сложного, неоднозначного взаимодействия реагентов при повышенных температурах. Выяснилось, что простая запись основной реакции (4.1) вовсе не раскрывает ее истинный механизм, который включает множество промежуточных стадий и продуктов. Спектральный анализ показал наличие в реагирующей смеси помимо H_2 , HCl , SiCl_4 таких соединений, как SiHCl_3 , SiH_2Cl_2 , SiH_3Cl , и еще ряда других (всего более 20 компонентов).

В общем виде ход реакции можно представить следующим образом: исходные реагенты $\rightarrow$ переходные состояния $\rightarrow$ продукты реакции. Только исходные реагенты и продукты реакции являются стабильными химическими соединениями, свойства которых можно изучить экспериментальным путем.

Хорошее экспериментальное подтверждение находит механизм процесса взаимодействия тетрахлорида кремния с водородом, который можно представить состоящим из четырех элементарных стадий:



Для расчета выхода продуктов реакций используются константы равновесия реакций K_p . Значения этих констант для реакций (4.3) – (4.6) при различных температурах представлены в табл. 4.1.

Табл. 4.1

Значения константы равновесия для реакций (4.3) – (4.6)

Температура, К	(4.3)	(4.4)	(4.5)	(4.6)
1173	0,200	0,00115	71	1,74
1373	0,457	0,025	10	1,2

1473	0,63	0,12	3,8	1,0
1573	0,78	0,48	1,66	0,84
1673	1,0	1,67	0,657	0,72

Если концентрация каждого вещества в момент равновесия удовлетворяет всем уравнениям равновесия для реакций, возможных в данном процессе, то, решая составленную таким образом систему уравнений относительно всех неизвестных, получают значения равновесных концентраций продуктов данного процесса. При расчете необходимо учитывать только независимые реакции, только в этом случае число уравнений будет равно числу неизвестных.

Обозначим количество молей компонентов в момент равновесия:

$$n_{\text{SiHCl}_3} = m_1; n_{\text{HCl}} = m_2; n_{\text{SiCl}_4} = m_3; n_{\text{SiCl}_2} = m_4; n_{\text{H}_2} = m_5; n_{\text{Si}} = m_6.$$

Уравнения констант равновесия реакций, протекающих при взаимодействии SiCl_4 с H_2 , можно записать следующим образом:

$$K_{p(4.3)} = \frac{m_1 m_2}{m_3 m_5}; K_{p(4.4)} = \frac{m_2 m_4}{m_1 (m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5)};$$

$$K_{p(4.5)} = \frac{(m_3 (m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5))^{1/2}}{m_4}; K_{p(4.6)} = \frac{m_2^2}{m_5 m_4}.$$

Поскольку

$$K_{p(4.3)} K_{p(4.4)} K_{p(4.5)}^2 = K_{p(4.6)},$$

то мы располагаем только тремя уравнениями с шестью неизвестными. Недостающие три уравнения получаем, составляя уравнения баланса для кремния, водорода и хлора (количества молей до достижения равновесия и в момент равновесия равны).

Для повышения процента извлечения кремния при водородном восстановлении хлоридов требуется большой избыток водорода, что можно представить молярным отношением:

$$[\text{H}_2 : \text{SiCl}_4] = N : 1.$$

Уравнения баланса имеют вид:

- 1) по кремнию: $1 = m_1 + m_4 + m_3 + m_6$;
- 2) по водороду: $N = 0,5m_1 + 0,5m_2 + m_5$;
- 3) по хлору: $2 = 1,5m_1 + 0,5m_2 + 2m_3 + m_4$.

Таким образом, совместное решение системы из шести уравнений с шестью неизвестными позволяет определить равновесные концентрации всех продуктов процесса и выход элементарного кремния.

1.4. Влияние температуры на скорость и механизм хлоридного процесса

Характер температурной зависимости скорости процесса (рис. 4.2) свидетельствует о том, что гетерогенная реакция взаимодействия тетрахлорида кремния с водородом протекает как в кинетической, так и в диффузионной области.

В низкотемпературной области закономерности процесса эпитаксии определяются кинетической стадией процесса диссоциативной адсорбции трихлорсилана. При переходе в высокотемпературную область энергия активации резко уменьшается, и возрастает влияние диффузионных процессов реагирующих веществ на границу раздела фаз.

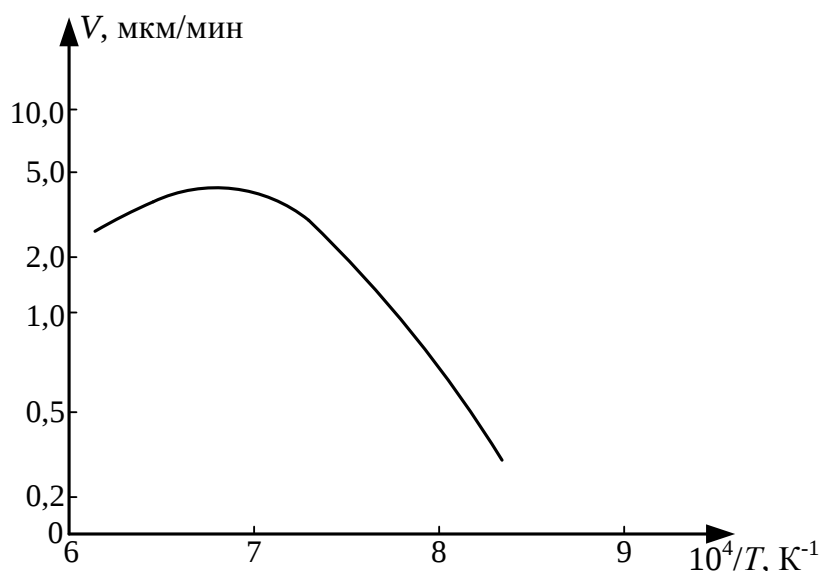


Рис. 4.2. Температурная зависимость скорости хлоридного процесса

1.5. Особенности технологии хлоридного метода эпитаксии

Преимущества ГХО достигаются ценой огромного расхода газообразных смесей, так как их плотность примерно в 1000 раз меньше, чем у твердых тел. Поэтому существенное количество осадка может быть получено только в проточной системе. Огромные объемы протекающего через реактор H_2 , выполняющего функцию не только восстановителя, но и разбавителя, диктуют особые требования именно к его чистоте (прежде всего по $\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$), причем финишная очистка (адсорбция, диффузия через Pd) осуществляется непосредственно в цехе эпитаксии. Чистота H_2 оценивается по точке росы, которая не должна быть выше -75°C , что соответствует концентрации основного вещества 99,9999% или примеси не более $1,0 \text{ млн}^{-1}$.

Поток газа только на первый взгляд кажется простым, легко управляемым и измеряемым. На самом деле даже в прямой трубе он имеет сложную и не вполне контролируемую структуру: неравномерность распределения скорости по сечению и возможную турбулентность.

Конструкция реакционных камер и подложкодержателей определяет условия обтекания подложек газовой смесью, а вследствие этого — однородность свойств слоев и воспроизводимость результатов.

В результате поиска оптимальной конструкции опробованы и в той или иной мере используются многие типы реакторов, которые можно классифицировать по степени близости к одной из двух идеализированных моделей: вытеснения или смешения. В реакторе смешения предусматривается турбулизация смеси

кремнийсодержащего компонента с водородом и легирующими газами для достижения равномерной концентрации смеси во всем реакционном объеме. Реактор вытеснения конструктивно реализуется в виде трубы длинной гораздо превышающей ее сечение и не содержащей источника турбулизации.

В современных установках реализуются обе модели. После поступления газового потока в реакционную камеру необходимо обеспечить равномерный нагрев парогазовой смеси. Для этого организуется полузамкнутый объем с условиями максимально эффективного перемешивания кремнийсодержащего компонента. Далее используется модель вытеснения, когда ПГС проходит в узком и длинном зазоре между подложкодержателем и внутренними стенками реактора.

Основанная на термически активированном гетерогенном превращении эпитаксия должна осуществляться в реакторах с «холодными» стенками (на уровне 500 – 600°C), чтобы избежать осаждения кремния и полихлоридов на них. Основным методом нагрева графитового подложкодержателя является индукционный нагрев низкочастотным током, поле которого проникает глубже в графит и разогрев оказывается более мягким, что продлевает срок службы подложкодержателя.

Этому комплексу требований во многом соответствует вертикальный реактор нового поколения с подложкодержателем-пирамидой (рис. 4.3).

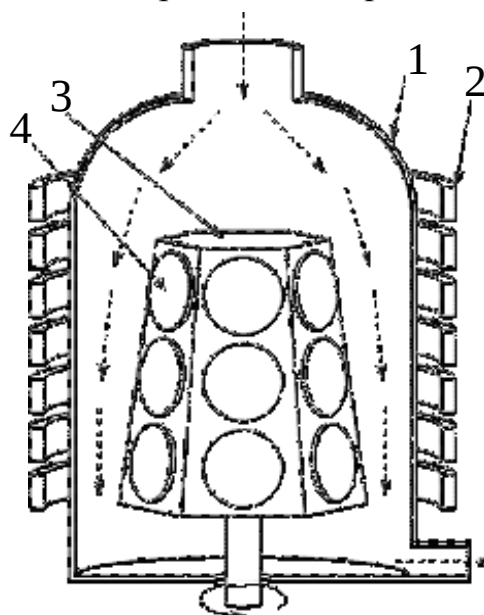


Рис. 4.3. Схема современного промышленного реактора для эпитаксиального наращивания кремния: 1 – реактор, 2 – индуктор, 3 – подложкодержатель, 4 – подложка

2. Варианты заданий

Для заданной температуры процесса эпитаксии и мольного количества водорода (варианты заданий приведены в табл. 4.2) рассчитать количество молей компонентов ПГС, определить выход кремния, построить графическую зависимость выхода компонента химического взаимодействия (по варианту задания) от соотношения $[H_2 : SiCl_4]$.

Табл. 4.2

№ варианта	Температура, К	N – молярное количество H ₂	Компонент ПГС
1	1173	100	HCl
2	1373	200	SiCl ₂
3	1373	100	SiHCl ₃
4	1473	200	HCl
5	1473	100	SiCl ₂
6	1573	200	SiHCl ₃
7	1573	100	SiCl ₂
8	1673	200	HCl

3. Порядок выполнения работы

1. Получить задание у преподавателя.
2. Запустить программу MathCAD.
3. Открыть файл «Лабораторная работа №4».
4. Выбрать из табл. 4.1 и 4.2 необходимые для расчета параметры и константы равновесия реакций, соответствующие заданной температуре. Ввести выбранные параметры в соответствующие ячейки входных данных.
5. Определить молярные концентрации компонентов ПГС.
6. Определить выход кремния в относительных единицах.
7. По точкам построить зависимость выхода компонента химического взаимодействия от соотношения [N : 1].
8. Занести в отчет все входные и выходные данные, полученные результаты и график построенной зависимости.

4. Контрольные вопросы

1. Что такое эпитаксия, какие виды эпитаксиальных процессов различают по природе взаимодействия «подложка – растущая кристаллическая фаза»?
2. Что такое константа равновесия реакции, как она определяется?
3. Опишите достоинства и недостатки хлоридного метода эпитаксии.
4. Опишите достоинства и недостатки эпитаксии при газофазном химическом осаждении.
5. Чем определяются диффузионный и кинетический режимы газофазной химической реакции?
6. Какими способами осуществляется легирование эпитаксиального слоя в хлоридном методе эпитаксии?

Лабораторная работа № 5

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ ПРОВОЛОКИ ВОЛЬФРАМА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗОНДА СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО МИКРОСКОПА

Цель работы

Изучить процесс электрохимического травления вольфрама и технологию подготовки зондов для сканирующего зондового микроскопа. Исследовать влияние времени электрохимического травления на качество зонда.

1. Краткие теоретические сведения

Высокое пространственное разрешение сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) определяется экспоненциальной зависимостью туннельного тока от расстояния до поверхности. Разрешение в направлении по нормали к поверхности достигает долей ангстрема. Латеральное же разрешение зависит от качества зонда и определяется в основном не макроскопическим радиусом кривизны кончика острия, а его атомарной структурой. При правильной подготовке зонда на его кончике с большой вероятностью находится либо одиночный выступающий атом, либо небольшой кластер атомов, который локализует его на размерах, много меньших, чем характерный радиус кривизны острия (рис. 5.1).

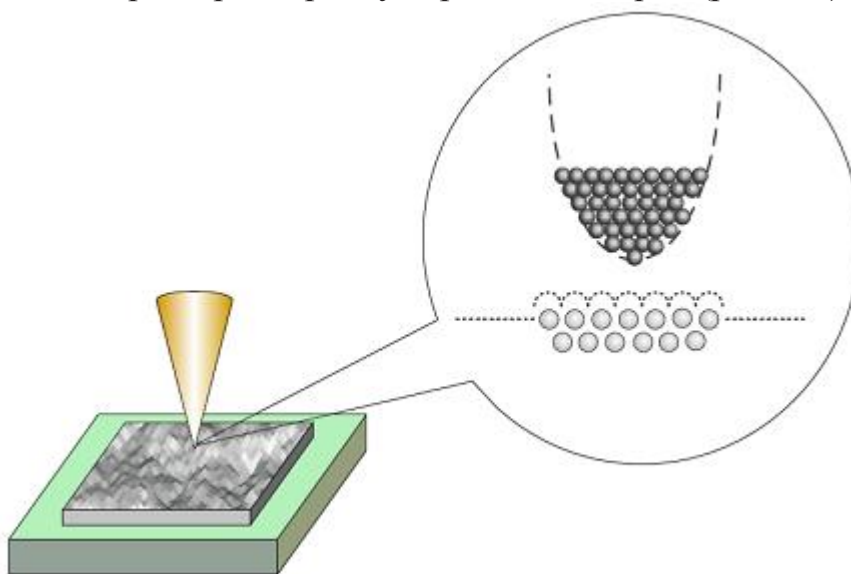


Рис. 5.1. Схематичное изображение острия зонда с одним атомом на конце

С помощью таких зондов удастся получать атомарное пространственное разрешение на образцах из различных материалов.

Профиль кончика зонда является важной характеристикой, так как СЗМ изображения являются сверткой формы поверхности исследуемого образца и зонда, который используется для отображения поверхности. Форма зонда является определяющей при получении качественного изображения. Если для атомарно гладких поверхностей критичным является только радиус кончика, то для отображения ступенек, склонов, ям и прочих резких перепадов по высоте, критическим является угол заточки зонда.

1.1. Зонды для туннельных микроскопов

В сканирующих туннельных микроскопах используются зонды нескольких типов. Широкое распространение получили зонды, приготовленные из вольфрамовой проволоки методом электрохимического травления. Вольфрамовые зонды являются одними из наилучших вариантов при использовании в СЗМ.

В сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) зонд играет роль проводника и может иметь любую форму, но для исключения влияния геометрии зонда важно применять как можно более острый и тонкий зонд. В случае с атомно-силовой микроскопией (АСМ) при выборе используемого зонда приходится идти на компромисс между качеством и надежностью, поскольку для надежного захвата и отслеживания взаимодействия необходимы определенные профиль и форма зонда. Твердость исследуемого образца также оказывает влияние на величину силового взаимодействия.

1.2. Методы создания зондов

Методы создания зондов подразделяются на механические и физико-химические (электрохимическое). Механические методы, как правило, предусматривают простые механические операции, такие как срез металлической проволоки из W, Pt-Ir, Pt-Rh, MO, при котором непосредственно обеспечивается острый кончик. Теоретически на кончике образуется несколько моноатомных щетинок, самая длинная из которых и используется в качестве зонда.

Электрохимическое травление является методом, используемым для придания металлическим зондам формы конуса с острой вершиной. Этот метод продолжает широко использоваться в своей простейшей форме путем погружения металлической проволоки (W, Au, Ta, Fe, Pt, Ir, Pt-Ir) в соответствующий электролит и приложения напряжения к электродам (рис. 5.2).

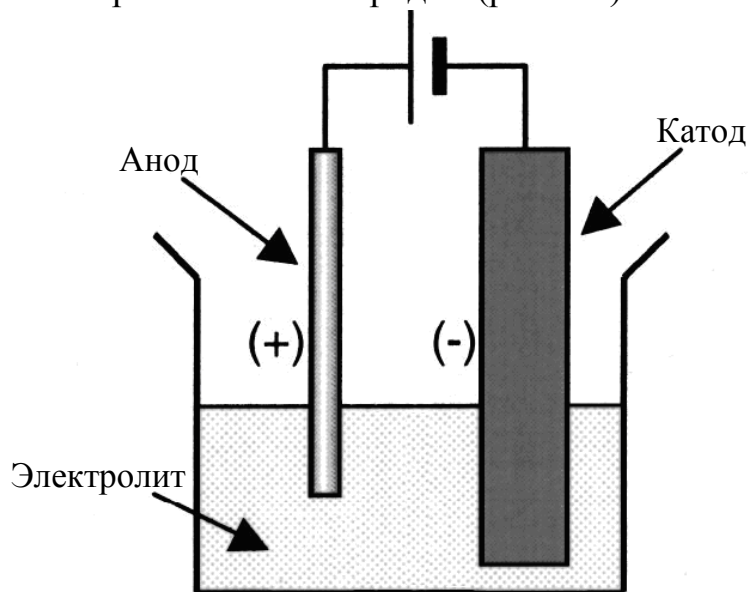


Рис. 5.2. Электрохимическая заточка зонда

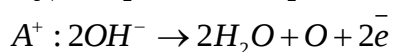
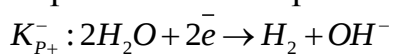
Также возможно изготовление зондов с помощью ионной заточки. В этом случае созданный в вакууме поток ионов Ag^+ направлен по касательной к зонду.

В случае вольфрамового зонда эта операция удаляет изоляционный слой оксида и создает зонд с радиусом кончика несколько нм.

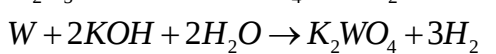
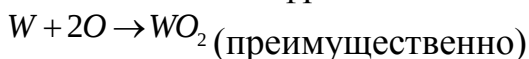
1.3. Особенности анодного растворения вольфрама

В щелочных растворах происходит разложение воды с образованием иона WO_4^{2-} . Процесс выделения водорода на W зависит от pH раствора, плотности тока и вида поверхности. Обычно процесс анодного растворения ведут при плотности тока $i=0,1-0,5$ А/см² и температуре 25-30⁰С. Катодная плотность при этом составляет 0,05-0,1 А/см². Растворение W в щелочи связано с образованием на его поверхности оксидных пленок, при этом в пленке наблюдается объемная проводимость самого оксида и его быстрое растворение.

Уравнения электролиза:

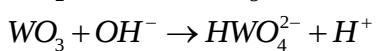
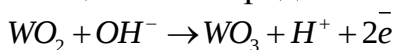


Окисление вольфрама:



Порядок реакции растворения W по ионам OH^- равен 1. В отсутствии тока W покрыт WO_2 .

В щелочной среде возможен механизм:



1.4. Технология электрохимического травления вольфрамового зонда

Технология приготовления СТМ зондов методом электрохимического травления состоит из следующих этапов. Заготовка из вольфрамовой проволоки укрепляется так, чтобы один из ее концов проходил сквозь проводящее кольцо (К) и погружался в водный раствор щелочи (рис. 5.3). Контакт между кольцом и вольфрамовой проволокой осуществляется посредством капли щелочи, расположенной в отверстии кольца. При протекании электрического тока между раствором щелочи и помещенным в нее металлом происходит электрохимический процесс травления металла, при котором атомы металла переходят в раствор.

По мере травления толщина перетравливаемой области становится настолько малой, что происходит разрыв заготовки за счет веса нижней части. При этом автоматически разрывается электрическая цепь и останавливается процесс травления.

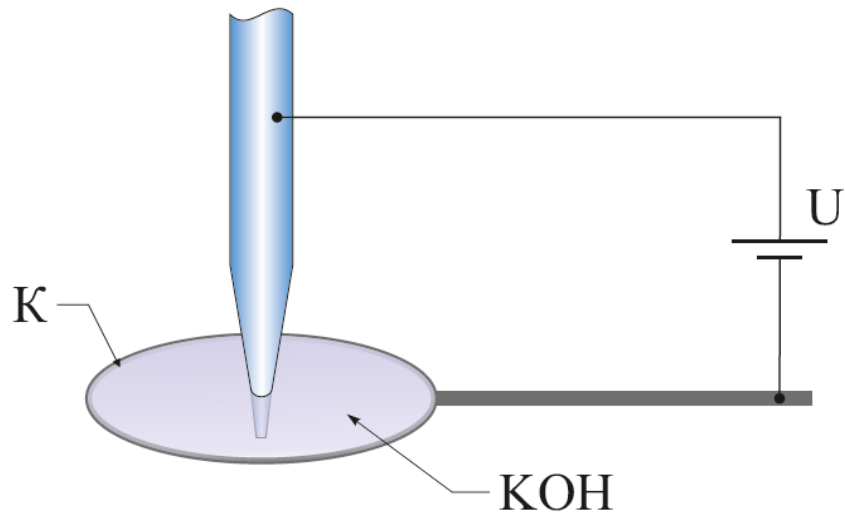


Рис. 5.3. Схема изготовления СТМ зондов из вольфрамовой проволоки с помощью электрохимического травления

1.5. Устройство для травления игл

В работе используется устройство для травления игл (УТИ). Оно предназначено для изготовления и восстановления зондов для зондовых микроскопов методом электрохимического травления. На рис. 5.4 представлена схематическая конструкция УТИ.

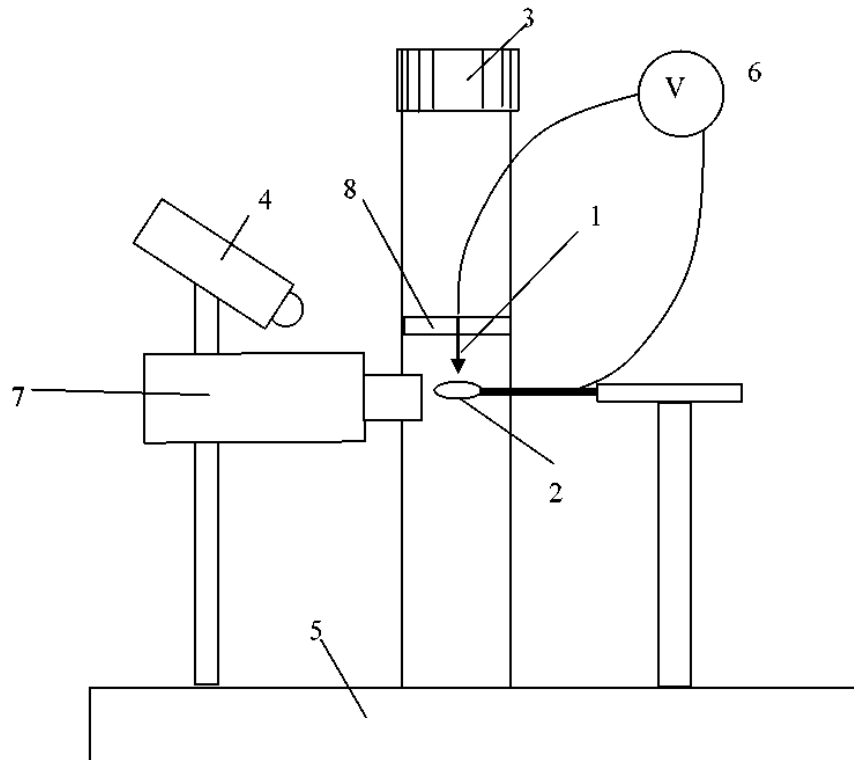


Рис. 5.4. Конструкция устройства для травления игл: 1 – отрезок вольфрамовой проволоки; 2 – кольцо; 3 – винт перемещения по вертикали; 4 – подвижный светодиодный осветитель; 5 – основание; 6 – источник переменного электрического напряжения; 7 – видеомикроскоп; 8 – держатель

УТИ работает следующим образом. Отрезок вольфрамовой проволоки 1 закреплен на держателе 8, который перемещается вверх и вниз по вертикали вручную с помощью винта 3. Освещение обеспечивается подвижным светодиодным осветителем 4. Все элементы конструкции закреплены на основании 5. Вращая винт 3, проволоку опускают в кольцо 2 до нужной глубины. Кольцо изготовлено из нихромовой проволоки. Предварительно на кольцо 2 вешается капля 5-процентного раствора КОН или NaOH. После этого включается источник переменного электрического напряжения 6 и происходит процесс перетравливания вольфрамовой проволоки с образованием острой иглы. Оператор наблюдает за процессом травления на экране компьютера посредством видеомикроскопа 7. После окончания травления иглу 1 вместе с держателем 8 поднимают в верхнее положение и вынимают.

Технические характеристики УТИ:

Типичный радиус закругления кончика иглы: 0,2 мкм;

Материал заготовки иглы вольфрамовая проволока диаметром: 0,1 мм;

Диапазон перемещения по вертикали: 25 мм;

Источник напряжения: 6- 9 В / 0,5 А переменного тока;

Увеличение видеомикроскопа: X 200;

Время травления иглы: не более 2 мин.

2. Порядок выполнения работы

Инструменты и материалы:

- Вольфрамовая проволока диаметром 0,15 мм;
- Устройство для изготовления острия (рис. 5.5);
- Ножницы.

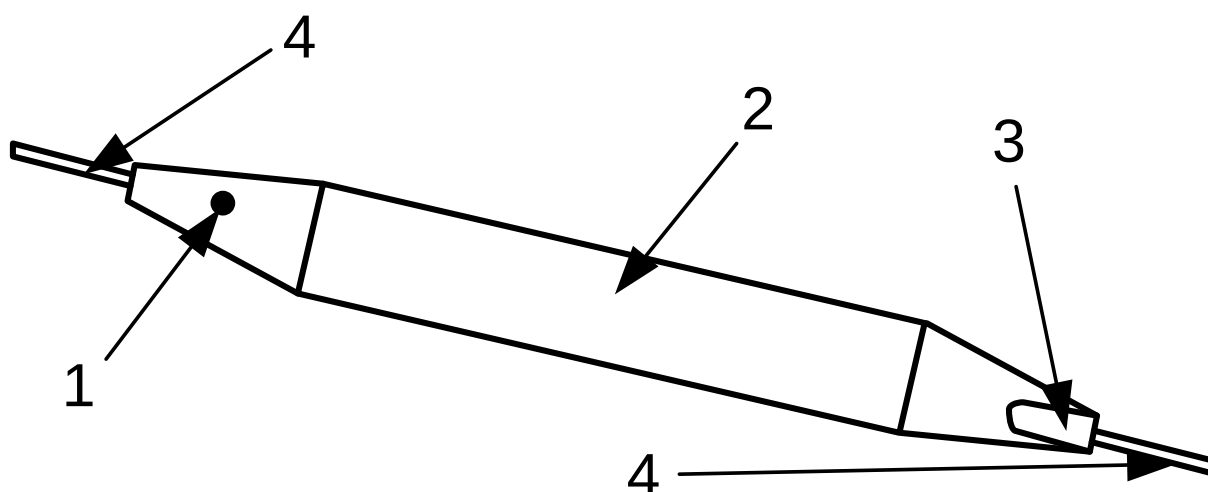
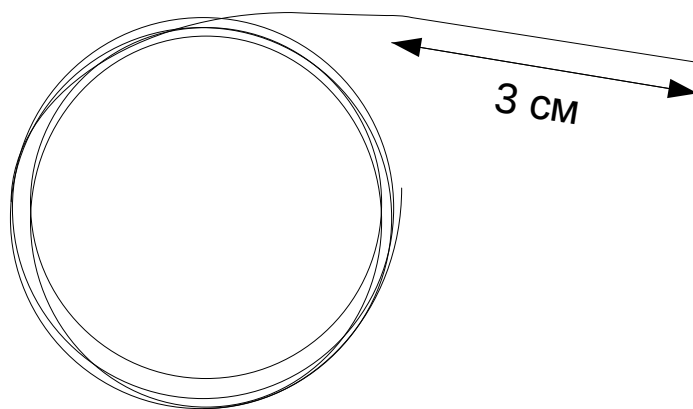
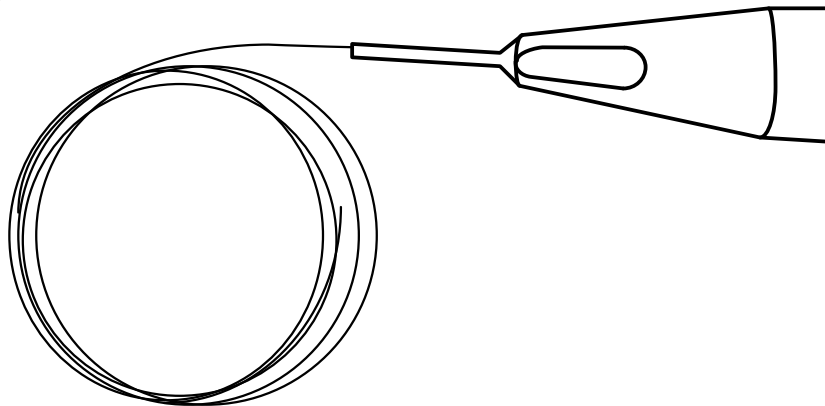


Рис. 5.5. Устройство для изготовления острия зондового датчика:
1 – маркер, 2 – отверстие, 3 – мерная канавка, 4 – капилляры

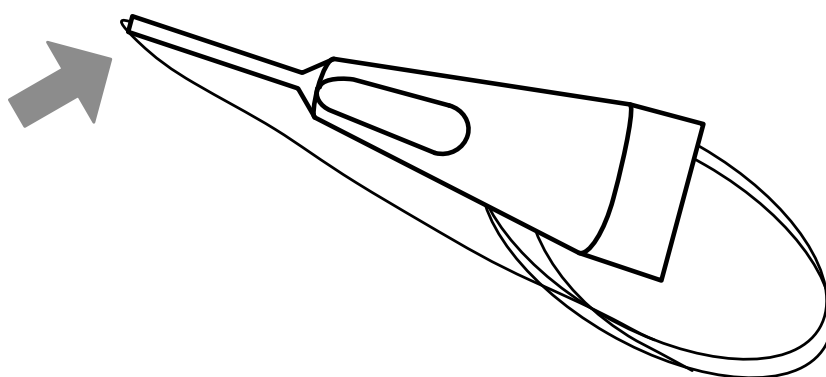
1. Выпрямите проволоку на длину приблизительно 3 сантиметра.



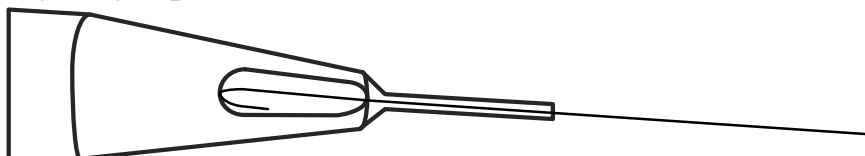
2. Вставьте проволоку до упора в металлический капилляр со стороны мерной канавки устройства.



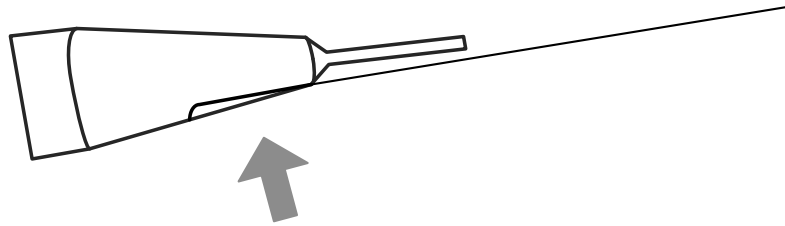
3. Загните проволоку на угол приблизительно 180 градусов, прижимая ее пальцем к металлическому капилляру.



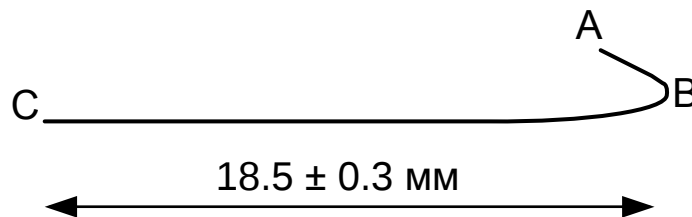
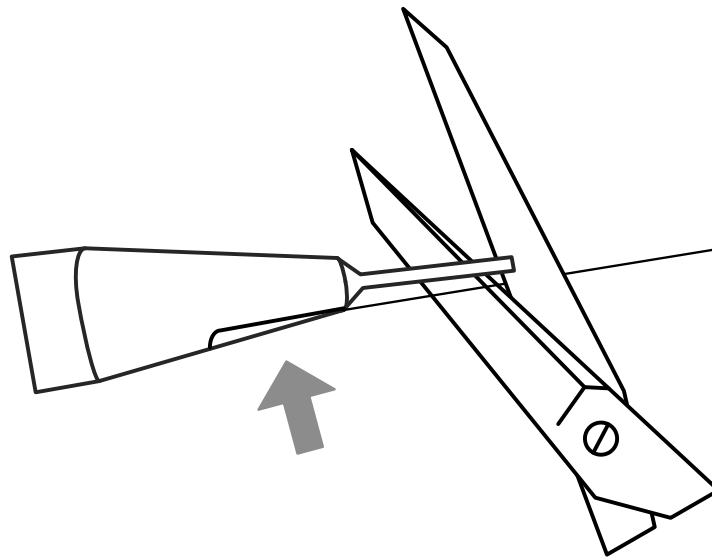
4. Вытащите проволоку из капилляра. Вложите проволоку загнутым концом в мерную канавку до упора.



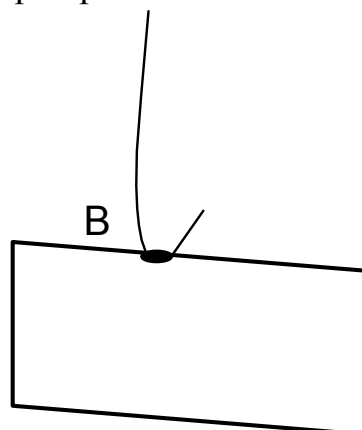
5. Прижмите проволоку пальцем к мерной канавке.



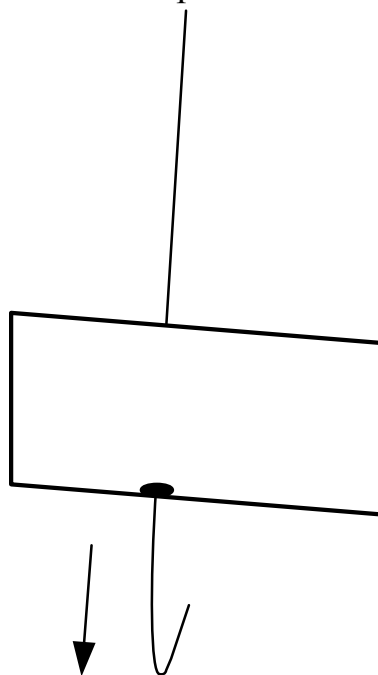
6. Отрежьте проволоку ножницами, упираясь режущей плоскостью ножниц в торец капилляра. Важно обеспечить длину $BC=18,5 \pm 0,3\text{мм}$.



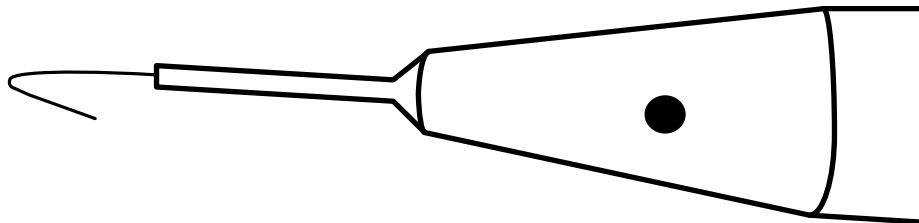
7. Для формирования угла ABC вставьте проволоку со стороны точки B в отверстие, расположенное в центре приспособления.



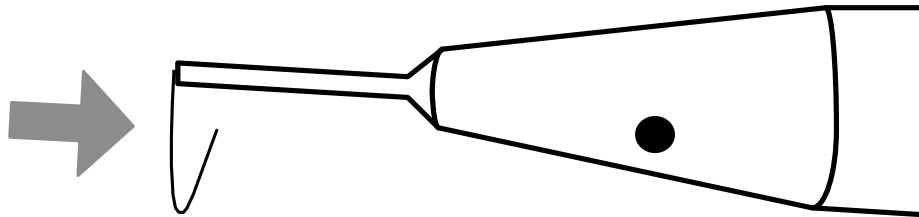
8. Протащите проволоку сквозь отверстие.



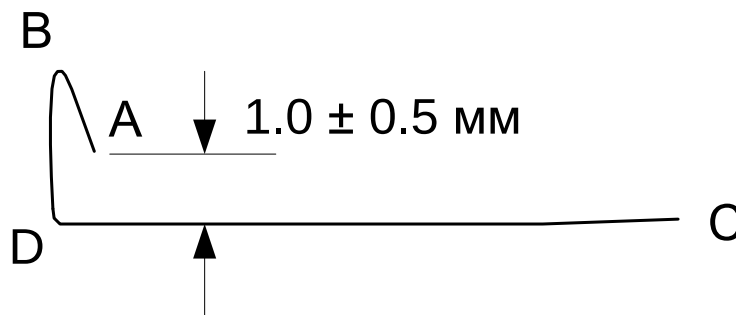
9. Со стороны точки С вставьте проволоку до упора в капилляр, отмеченный красной точкой.



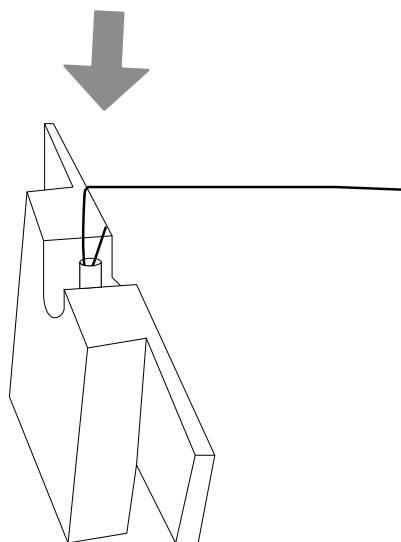
10. Загните проволоку приблизительно на 90 градусов, прижимая ее пальцем.



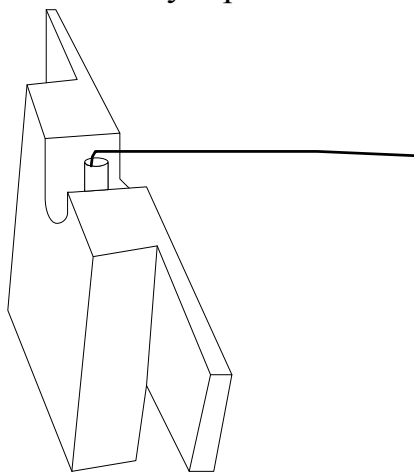
11. Выньте проволоку из капилляра. Угол BDC должен быть в пределах 90 ± 5 градусов. Ширина зазора должна быть не меньше $1,0 \pm 0,5$ мм. При слишком узком зазоре работа датчика может быть нестабильной.



12. Со стороны точки В вставьте проволоку в трубку датчика.



13. Утопите проволоку пальцем до упора.



Датчик готов для последующего изготовления острия путем электрохимического травления.

14. Поверните кольцо 2 в сторону от держателя 8 (рис. 5.4).

15. Вставьте датчик в держатель 8 (рис. 5.4).

16. Подключите УТИ к адаптеру, входящему в комплект поставки, подключите адаптер к электрической сети 220 В.

17. Убедитесь, что режим травления выключен (не горит красная лампочка на выключателе).

18. Подключите цифровой микроскоп к USB-порту компьютера согласно инструкции пользования цифровым микроскопом.

19. Установите держатель с датчиком в такое положение, чтобы проволока-заготовка 1 была вертикальна (рис. 5.4).

20. Поднимите винтом 3 держатель 8 с датчиком в верхнее положение так, чтобы конец проволоки 1 был выше кольца 2.

21. Поверните кольцо 2 так, чтобы оно оказалось под проволокой 1.

22. Отрегулируйте положение цифрового микроскопа, изгибая рукой гибкий стержень-держатель так, чтобы кольцо 2 было в фокусе видеомикроскопа.

23. Поверните кольцо 2 в прежнее положение и навесьте на него каплю 5-процентного раствора КОН (или NaOH) из чашки Петри, как показано на рис. 5.6.

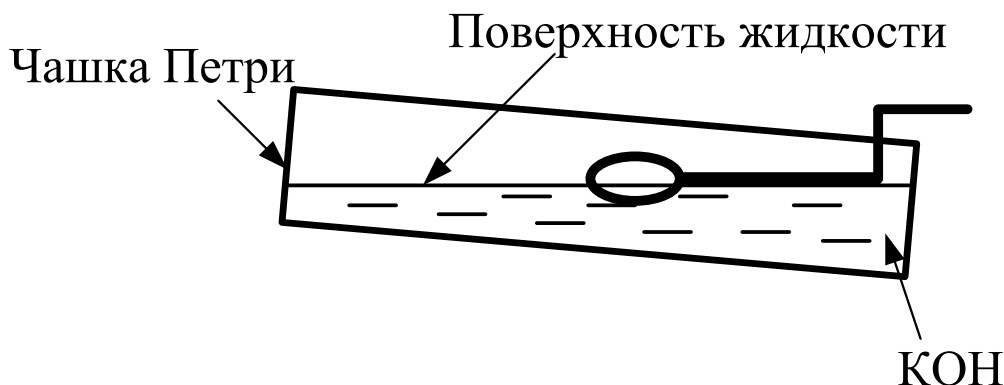


Рис. 5.6. Навешивание капли на кольцо

24. Прикоснитесь поверхностью жидкости к проволочному кольцу, после этого опустите чашку вниз. На кольце образуется капля раствора. Если капля сорвалась при перемещениях кольца, повторно прикоснитесь поверхностью жидкости к проволочному кольцу.

25. Снова поверните кольцо под проволоку 1 и опустите проволоку в каплю, вращая винт 3.

26. Установите зазор между каплей и нижней поверхностью датчика приблизительно 2 мм. При этом длина будущей иглы будет около 5 мм.

27. Включите процесс травления выключателем. При этом загорится лампочка на выключателе и жидкость начнет «кипеть».

28. Наблюдая за процессом травления в микроскоп, периодически прерывайте травление и наблюдайте за утоньшением вольфрамовой проволоки внутри капли.

29. После перетравливания проволоки нижний конец ее падает.

Внимательно следите за процессом травления и немедленно выключите УТИ после падения нижней части заготовки 1!

30. Поднимите держатель 8 с иглой в такое положение, чтобы только самый кончик иглы был погружен в жидкость.

31. Включите на короткое время (не более 1 сек.) процесс травления выключателем. Выключите травление.

32. Сохраните изображение сформированного зонда, используя средства захвата изображения экрана.

33. Поднимите держатель с датчиком с помощью винта 3.

34. Выньте датчик с готовым зондом из держателя.

35. Промойте зонд в струе проточной воды, держа его иглой вниз. Просушите зонд под теплыми струями воздуха. Для просушки зонда можно использовать фен.

3. Контрольные вопросы

1. Назовите основные методы изготовления СМТ-зондов.
2. Назовите основные материалы для СЗМ-зондов и требования к ним.
3. Каковы отличия в требованиях к зондам СТМ и АСМ?
4. Расскажите о методе электрохимического травления с анодным растворением материала.
5. Опишите технологию изготовления зондов методом электрохимического травления.
6. Опишите устройство для изготовления СЗМ зондов.

Библиографический список

1. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: учеб. пособие для вузов. М.: Лаборатория базовых знаний, 2000. 488с.
2. Введение в процессы интегральных микро- и нанотехнологий: учеб. пособие для вузов: в 2 т. Т.1: Физико-химические основы технологии микроэлектроники / Ю.Д. Чистяков, Ю.П. Райнова. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. 392 с.
3. Введение в процессы интегральных микро- и нанотехнологий: учеб. пособие для вузов: в 2 т. Т.2: Технологические аспекты / М.В. Акуленок, В.М. Андреев, Д.Г. Гровов и др. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 252 с.
4. Никоненко В.А. Математическое моделирование технологических процессов: Моделирование в среде MathCAD. Практикум. М.: МИСиС, 2001. 48 с.
5. Коровин Н.В. Общая химия: учебник для техн. направлений и спец. вузов. М.: Высш. школа, 2002. 558 с.
6. Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем: учеб. пособие для вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики» и «Полупроводниковые приборы». – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1986. С. 201 – 228.
7. Коледов Л.А. Технология и конструирование микросхем, микропроцессоров и микросборок. Радио и связь, 1989.
8. Комаров Ф.Ф., Новиков А. П., Буренков А.Ф. Ионная имплантация. М., из-во Университетское, 1994. 415 с.
9. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии: пер. с. англ. – М.: Мир, 1985. 496 с.
10. Физическая химия. В 2 кн. / под ред. К.С.Краснова. М.: Высш. школа, 2001. 512с.
11. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. – М.: Радио и связь, 1990. 496 с.
12. Черняев В.Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА. – М. Высш. школа, 1987. 376 с.
13. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Нижний Новгород, 2004. 114 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1

Изучение элементной базы и топологии
полупроводниковых интегральных микросхем.....1

Лабораторная работа №2

Моделирование процесса магнетронного распыления
материала испарителя кольцевой формы.....12

Лабораторная работа № 3

Наклонная локальная ионная имплантация.....19

Лабораторная работа № 4

Термодинамический анализ и определение максимального выхода
кремния при хлоридном методе эпитаксии.....26

Лабораторная работа № 5

Электрохимическое травление проволоки вольфрама для
изготовления зонда сканирующего зондового микроскопа.....36