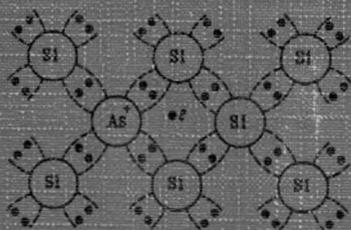
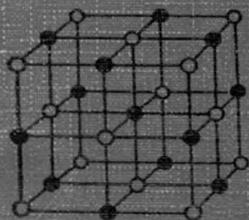


МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)



В. Н. Постникова  
С. Н. Кузнецов  
Ю. В. Каширин

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ  
по курсу  
**«Материалы РЭС»**  
Часть 1



Москва 2004 г.

012382/073)  
0035

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ.

Цель работы: - изучение зависимости удельной электропроводности полупроводникового материала от температуры.

### Краткие теоретические сведения.

Полупроводники по удельному сопротивлению  $10^{-5} - 10^7$  Ом·м занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. При этом они обладают совокупностью специфических свойств, которые и выделяют их среди других веществ.

Для полупроводников характерна сильная зависимость значения удельной проводимости от вида и количества примеси, от величины внешних воздействий – света, температуры, облучения ядерными частицами, давления и т.д.

Согласно зонной теории твердого тела у полупроводников между валентной зоной и зоной проводимости имеется запрещенная зона. При температуре абсолютного нуля и в отсутствии внешнего воздействия их валентная зона полностью заполнена, а зона проводимости свободна от электронов. К полупроводникам условно относят вещества с шириной запрещенной зоны  $\Delta E = 0,05 - 3$  эВ.

**Собственными** называют полупроводники, не содержащие донорных и акцепторных примесей. Зонная диаграмма таких полупроводников представлена на рис. 1.1.

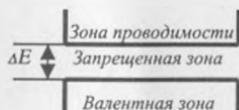


Рис. 1.1

При  $T > 0^\circ$ , в соответствии с законом Больцмана, валентные электроны могут отрывать от атомов и принимать участие в проводимости полупроводника, т.е. переходить из валентной зоны в зону проводимости через запрещенную зону. С уходом электрона в зону проводимости в валентной зоне полупроводника остается свободным энергетическое состояние, называемое дыркой, а сама валентная зона становится не полностью заполненной. Таким образом, в результате разрыва ковалентной связи образуется пара свободных носителей заряда – электрон в зоне проводимости и дырка в валентной зоне, которые и создают собственную электропроводность полупроводника. Энер-

гия, необходимая для разрыва ковалентной связи, определяется шириной запрещенной зоны полупроводника. Для кремния она составляет 1,12 эВ.

**Примесные** полупроводники в отличие от собственных, содержат донорные или акцепторные примеси.

Если в полупроводник 4-ой группы таблицы Менделеева ввести в качестве примеси элемент 5-ой группы, например мышьяк (As), то атому примеси для завершения ковалентных связей с атомами основного вещества необходимо четыре валентных электрона. Пятый электрон атома примеси связан со своим атомом силой кулоновского взаимодействия. Энергия этой связи невелика (0,01 эВ - 0,05 эВ). Так как тепловая энергия при 300°К составляет 0,03 эВ, то при комнатной температуре произойдет ионизация примесных атомов. Примесь, имеющую валентных электронов больше, чем необходимо для завершения связей между ближайшими атомами основного вещества, и в результате этого способную отдавать электроны, называют донорной, а полупроводник с такой примесью – полупроводником с электронной электропроводностью или полупроводником n-типа. Таким образом, энергетический уровень пятого валентного электрона на зонной диаграмме располагается в запрещенной зоне вблизи дна зоны проводимости и называется донорным уровнем (рис. 1.2). Величина  $\Delta E_d$  характеризует энергию, необходимую для возбуждения донорных электронов.



Рис. 1.2

Если в полупроводник 4-ой группы таблицы Менделеева ввести в качестве примеси элемент 3-ей группы, например, бор (В), то все три валентных электрона примесного атома будут участвовать в образовании ковалентных связей. При этом одна из четырех связей с ближайшими атомами основного вещества окажется незавершенной.

Примесь, имеющую валентных электронов меньше, чем это необходимо для завершения связей между ближайшими атомами основного вещества, и вследствие этого способную захватить электроны соседней связи, называют акцепторной, а полупроводник с такой примесью – полупроводником с дырочной электропроводностью или полупроводником p-типа.

Для того чтобы образовалась свободная дырка, необходима энергия меньшая, чем для разрыва ковалентной связи. Значит, локальные энергетиче-

ские уровни акцепторной примеси расположены в запрещенной зоне полупроводника вблизи потолка валентной зоны. Таким образом электроны из валентной зоны переходят на акцепторный уровень (Рис. 1.3). При этом в валентной зоне образуется дырка. Положительно заряженный ион (дырка) может заимствовать электрон от любого соседнего атома, что приведет к перемещению дырки по кристаллу. Величина  $\Delta E_a$  характеризует энергию, необходимую для образования «свободной» дырки.

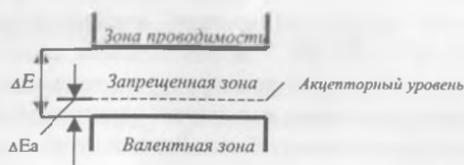


Рис. 1.3

В таблице 1.1 сведены основные термины используемые в полупроводниковой технологии.

Таблица 1.1

Примесь	Проводимость	Основные носители заряда	Полупроводник
-	Собственная	Электроны и дырки	Собственный
Донорная	Электронная	Электроны	n - типа
Акцепторная	Дырочная	Дырки	p - типа

### Основные параметры полупроводниковых материалов.

1.  $\Delta E$  - ширина запрещенной зоны. Измеряется в электронвольтах и характеризует энергию, необходимую на разрыв связей и освобождения электрона. У существующих полупроводников  $\Delta E < 3$  эВ. Так, например, у германия (Ge)  $\Delta E = 0,67$  эВ, у кремния (Si)  $\Delta E = 1,11$  эВ.

2.  $\rho_v$  - удельное сопротивление и обратная ей величина  $\gamma$  - удельная электропроводность принадлежат к наиболее часто измеряемым параметрам в полупроводниковом производстве. Измерения проводятся на каждой пластине в нескольких точках, что позволяет судить об однородности материала. У существующих полупроводников  $\rho_v$  составляет от  $10^{-5}$  до  $10^{+7}$  Ом·м.

3.  $\mu$  - подвижность носителей заряда. Если концентрация носителей отражает их количество в единице объема и определяет проводимость полупроводника, то качество носителей характеризуется подвижностью, т.е. скоростью дрейфа в электрическом поле напряженностью 1 В/м:

$$\mu = V/E \quad [ \text{м}^2/\text{В с} ] \quad (1.1)$$

где:  $V$  – скорость дрейфа зарядов;

$E$  – напряженность электрического поля

Подвижность носителей - важный параметр, определяющий быстродействие приборов.

В технологии полупроводников величина подвижности служит критерием чистоты и структурного совершенства материала. Подвижность измеряется при температуре жидкого азота ( $77^0\text{K}$ ), когда "замораживаются" тепловые колебания атомов решетки и величина ее в чистых образцах резко (в 5-10 раз) увеличивается. В менее чистых образцах доля рассеяния на примесях больше, чем в чистых, и поэтому рост подвижности с понижением температуры невелик.

С увеличением концентрации легирующей примеси подвижность падает, так как ионизированные атомы примеси являются такими же центрами рассеяния, как и атомы загрязняющих примесей.

Произведение подвижности носителей на их концентрацию дает удельную электропроводность:

$$\gamma = \mu n e \quad (1.2)$$

где:  $n$  – концентрация носителей,

$\mu$  - подвижность носителей,

$e$ - заряд электрона.

### Зависимость $\gamma$ от температуры.

Удельная электропроводимость полупроводника определяется концентрацией и подвижностью свободных носителей заряда, значения которых зависят от температуры. Причем для концентрации свободных носителей заряда характерна экспоненциальная температурная зависимость, а для подвижности – степенная. Учитывая, что степенная зависимость слабее экспоненциальной, т.е., иными словами, концентрация носителей зарядов зависит от температуры в большей степени, чем подвижность, то можно записать:

$$\gamma = A e^{-\Delta E/2kT} \quad (1.3)$$

где:  $A$  – предэкспоненциальный множитель, слабо зависящий от температуры.

$k$  – постоянная Больцмана,  $k = 8,6 \cdot 10^{-5}$  эВ/К.

$T$  – температура.

Эту зависимость удобно анализировать в графическом виде, используя координаты Аррениуса  $\ln \gamma = f(1/T)$ , в которых она имеет вид прямой линии.

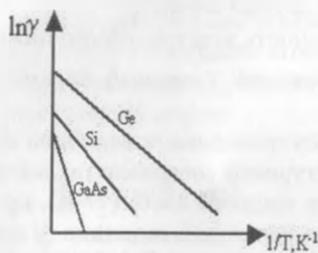


Рис.1.4

На рис. 1.4 показаны зависимости  $\ln \gamma = f(1/T)$  для собственных полупроводников: германия (Ge), кремния (Si) и арсенида галлия (GaAs). Из графиков видно, что чем шире запрещенная зона, тем ниже располагается прямая, т.е. тем ниже удельная электропроводность при одной и той же температуре.

Температурная зависимость  $\ln \gamma = f(1/T)$  для примесных полупроводников приведена на рис. 1.5.

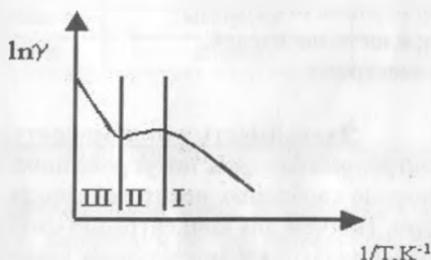


Рис.1.5

Из-за малых значений  $\Delta E_d$  рост электропроводности проявляется в области низких температур (участок I на рис.1.5) за счет увеличения концентрации свободных носителей заряда. В этом диапазоне температур в полупроводнике n-типа происходит переход электронов с донорного уровня в зону проводимости, а в полупроводнике p-типа — из валентной зоны на акцепторный уровень. Процесс возрастания  $\gamma$  с повышением температуры происходит до тех пор, пока не ионизируются все атомы примесей. Собственная же электропроводность полупроводника еще не проявляется. В этих условиях концентрация свободных носителей практически от температуры не зависит и характер изменения  $\gamma$  определяется зависимостью подвижности носи-

телей заряда от температуры. Подвижность носителей заряда с ростом температуры падает из-за усиления колебаний атомов кристаллической решетки, которые являются центрами рассеяния свободных носителей заряда (участок 2). В кремнии эта область приходится на диапазон  $-150 - +150^{\circ}\text{C}$ . Именно в этом диапазоне температур, т.е. на участке 2 работают полупроводниковые приборы. Резкое увеличение удельной электропроводности при дальнейшем росте температуры объясняется началом генерации электронно-дырочных пар и соответствует области собственной электропроводности (участок 3). При таких температурах происходит потеря работоспособности приборов на p-n переходах. Из графика на рис.1.5 видно, что предельная максимальная рабочая температура полупроводниковых приборов определяется шириной запрещенной зоны полупроводникового материала.

### Полупроводниковые материалы

**Германий (Ge)** является одним из первых полупроводников, получивших широкое применение в серийном производстве различных полупроводниковых приборов. Его используют при производстве выпрямительных и импульсных диодов, различных видов транзисторов, фотодиодов, фоторезисторов, детекторов инфракрасного излучения и.д. Диапазон рабочих температур этих приборов от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $80^{\circ}\text{C}$ .

Германий обладает решеткой типа алмаза. По внешнему виду благодаря характерному блеску он напоминает металл. Его кристаллы очень тверды и хрупки. Сравнительно высокая стоимость германия объясняется сложностью получения исходного сырья.

Собственное удельное сопротивление германия составляет  $\rho_v = 0,47$  Ом·м.

Германий, используемый для изготовления полупроводниковых приборов, не должен содержать случайных примесей больше  $5 \times 10^{-9}$  %. Наиболее распространенным способом очистки германия является метод зонной плавки.

**Кремний (Si)** является самым распространенным элементом в земной коре после кислорода, его содержание в ней 28%. Однако в свободном состоянии в природе он не встречается. Его соединениями являются такие распространенные природные материалы, как кремнезем и силикаты.

Кремний применяют для изготовления различных диодов и транзисторов, стабилитронов, фотодиодов, датчиков Холла и многих других полупроводниковых приборов. Кремний используется при изготовлении интегральных схем. Практически 98% полупроводниковых интегральных схем, в настоящее время, выполняются на основе кремния.

Собственное удельное сопротивление кремния составляет  $\rho_v = 2 \cdot 10^3$  Ом·м.

В технологическом отношении кремний более сложный материал, чем германий, так как он имеет высокую температуру плавления  $1420^{\circ}\text{C}$  и в рас-

плавленном состоянии химически весьма активен (вступает в реакцию практически со всеми тигельными материалами).

Кремний значительно дешевле германия из-за доступности исходного сырья. Допустимое содержание посторонних примесей в кремнии, используемом в производстве полупроводниковых приборов, не должно превышать  $10^{-11}$  %.

Благодаря тому, что кремний имеет большую ширину запрещенной зоны, чем германий, кремниевые приборы могут работать при более высоких температурах. Верхний температурный предел работы кремниевых приборов достигает  $200^{\circ}\text{C}$ .

**Арсенид галлия (GaAs)** среди соединений  $A^{III}B^V$  занимает особое место. Большая ширина запрещенной зоны (1,4 эВ), высокая подвижность электронов [ $0,85 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ] позволяют создавать на основе GaAs приборы, работающие в области высоких температур и высоких частот.

Арсенид галлия применяют при изготовлении светодиодов, параметрических, туннельных диодов, диодов Ганна, лазеров, полевых транзисторов, солнечных батарей и других приборов. Представляется перспективным создание интегральных схем на подложке из полупроводникового арсенида галлия.

**Антимонид индия (InSb)** имеет очень малую ширину запрещенной зоны (0,17 эВ) и очень высокую подвижность электронов [ $7,7 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ]. InSb используют при изготовлении детекторов в инфракрасной области спектра, датчиков Холла, туннельных диодов, термоэлектрических генераторов, лазеров, тензометров.

Малая ширина его запрещенной зоны и большая разница между подвижностями электронов и дырок обуславливает в этом материале явления, которые слабо проявляются в других полупроводниках.

**Фосфид галлия (GaP)**, имеющий большую ширину запрещенной зоны (2,25 эВ), широко применяют в серийном производстве светодиодов.

Высокая температура плавления (около  $1500^{\circ}\text{C}$ ) и большое давление паров ( $35\cdot 10^5$  Па) вызывают значительные технологические трудности выращивания монокристаллов фосфида галлия высокой степени чистоты. GaP с электронной электропроводностью, используемый при изготовлении светодиодов, обычно выращивают из расплава по методу Чохральского.

Благодаря большой ширине запрещенной зоны GaP излучательные переходы в этом материале происходят в видимой области спектра. Это позволило создать на основе GaP светодиоды, дающие зеленое и красное свечение.

**Арсенид индия (InAs)**, имеет малую ширину запрещенной зоны (0,36 эВ) и большую подвижность электронов [ $3,3 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ]. Температура плавления InAs равняется  $942^{\circ}\text{C}$ . Арсенид индия в основном используют при изготовлении датчиков Холла, а также фотодиодов и лазеров.

**Фосфид индия (InP)** применяют при изготовлении лазеров. Технологические трудности выращивания монокристаллов фосфида индия связаны с

высоким давлением паров ( $21 \cdot 10^5$  Па) в точке плавления ( $1062^\circ \text{C}$ ). Наиболее чистый InP имеет концентрацию электронов  $1021 \text{ м}^{-3}$ .

В таблице 1.2 приведены значения основных параметров некоторых полупроводниковых материалов и соединений типа  $A^{III}B^V$ .

Таблица 1.2.

Соединение	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta E_{\text{зз}}, \text{эВ}$ при $300^\circ \text{K}$	$\mu_n, \text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при $300^\circ \text{K}$	$\mu_p, \text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при $300^\circ \text{K}$
Ge	937	0,67	0,39	0,19
Si	1417	1,12	0,13	0,048
GaP	1450	2,25	0,011	0,0075
InP	1062	1,29	0,46	0,15
GaAs	1237	1,43	0,85	0,043
InAs	942	0,36	3,3	0,046
InSb	525	0,17	7,7	0,08

### Содержание задания

1. Определить зависимость удельной электропроводности полупроводникового материала от температуры в диапазоне  $20\text{-}150^\circ\text{C}$ .
2. Построить график зависимости  $\ln \gamma = f(1/T)$ .

### Порядок выполнения работы

Порядок выполнения работы и описание установки выдается инженером лаборатории во время проведения занятий.

### Содержание отчета

1. Краткие теоретические сведения.
2. Результаты измерений, сведенные в таблицу.
3. График зависимости  $\ln \gamma = f(1/T)$ .
4. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы.

1. Чем собственный полупроводник отличается от примесного. Объясните зависимость электропроводности собственного полупроводника от температуры.
2. Основные параметры полупроводниковых материалов.
3. Для чего легируются полупроводники и какие материалы используются в качестве примесей?
4. Какие три зоны можно выделить на графике  $\ln \gamma = f(1/T)$  для примесного полупроводника?
5. Какими значениями ограничиваются рабочие температуры полупроводниковых приборов, работающих на р-п переходах?

### ЛИТЕРАТУРА

Материалы микроэлектронной техники / Под ред. В.М. Андреева – М.: «Радио и связь», 1989 г. с. 271-277.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИКОВ.

Цель работы – изучение основных параметров диэлектрических материалов.

Краткие теоретические сведения.

К диэлектрикам относятся вещества, которые вследствие малой концентрации свободных носителей зарядов имеют высокое удельное сопротивление. Диэлектрики применяются во всех компонентах радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), выполняя функции изолирующих слоёв, оснований в коммутационных платах, подложек гибридных интегральных схем (ГИС), корпусов полупроводниковых приборов и микросхем, в МОП-транзисторах и конденсаторах.

Подавляющее большинство диэлектриков – химические соединения, имеющие ионное (стёкла, керамики) или молекулярное (полярные и неполярные полимеры) строение. Строение определяет тип химической связи, основные электрические свойства, а также зависимость параметров от внешних факторов.

Важнейшим свойством диэлектриков является их способность к электрической поляризации, т.е. под влиянием электрического поля происходит направленное смещение заряженных частиц или молекул на ограниченное расстояние.

Под действием электрического поля смещаются заряды, как в полярных, так и неполярных молекулах.

Существует более десятка различных механизмов поляризации. В данной работе рассматриваются некоторые из них.

1. Электронная поляризация – смещение электронного облака атома под воздействием электрического поля напряжённостью  $E$ , в результате чего центры положительных и отрицательных зарядов перестают совпадать. На рис. 2.1 показана схема моделей атомов в отсутствие внешнего электрического поля (а) и при его воздействии (б).

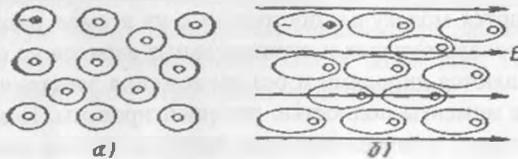


Рис. 4.1.

Специфика этого механизма – смещение на очень малые расстояния чрезвычайно лёгких частиц – обуславливает безинерционность процесса (время установления электронной поляризации составляет  $10^{-15}$  с). Этот вид поляризации имеет место у всех диэлектриков, но эффект чаще всего маскируется проявлениями поляризаций других видов. Единственная группа материалов, обладающих преимущественно электронной поляризацией, – это неполярные линейные полимеры, к которым относятся фторопласт, полистирол, полиэтилен и т. д.

2. Ионная поляризация – смещение упругосвязанных ионов на небольшое по сравнению с параметром решётки расстояние. На рис.2.2 показана идеализированная схема расположения ионов каменной соли:

*a* – в узлах решетки в отсутствие электрического поля ; *b* – смещение из узлов на небольшие расстояния при воздействии поля..

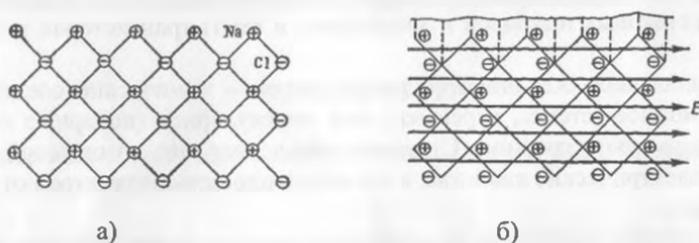


Рис.2.2.

Время протекания ионной поляризации так же, как и электронной, мало ( $\sim 10^{-13}$  с). Наблюдается в ионных веществах с плотной упаковкой ионов, например, в керамике. Поскольку время протекания электронной и ионной поляризаций крайне мало, они не сопровождаются потерями энергии. Для диэлектриков с указанными видами поляризаций потери будут обусловлены только наличием свободных носителей заряда, в основном примесных. Остальные виды поляризаций относятся к замедленным видам, т.е. требующим определённого времени для установления процесса. Это приводит к диэлектрическим потерям.

3. Дипольная (дипольно-релаксационная) поляризация – преимущественная ориентация полярных молекул под действием электрического поля. Полярными являются молекулы, построенные из атомов разных элементов так, что центры положительных и отрицательных зарядов не совпадают. Такие молекулы являются диполями и без приложения электрического поля, а их электрические моменты полностью разориентированы. Поворот под действием электрического поля сравнительно крупных частиц, какими являются молекулы, требует затрат энергии, поэтому дипольная поляризация приводит к потерям энергии и при высокой частоте – нагрев диэлектрика.

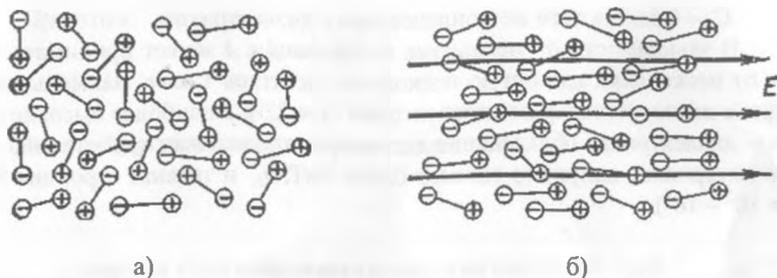


Рис. 2.3.

На рис.2.3 показано примерное расположение дипольных молекул в отсутствие электрического поля (а) и при его действии на диэлектрик (б).

Дипольная поляризация представляет собой инерционный процесс (время установления  $\sim 10^{-6} - 10^{-2}$  с), который характеризуется временем релаксации  $\tau_p$ .

Наиболее сильно этот вид поляризации проявляется в полярных диэлектриках (например, в полихлорвиниле, лавсане и других полярных полимерах).

4. Миграционная (ионно-релаксационная) поляризация – перемещение (миграция) под действием электрического поля слабо связанных примесных ионов на расстояния, превышающие параметр решётки, часто вплоть до границ зёрен поликристалла. Процесс установления миграционной поляризации может продолжаться секунды, минуты и даже часы.

Этот вид поляризации характерен для ионных кристаллов с неплотной упаковкой ионов, т.е. для материалов, имеющих рыхлую структуру, чаще всего сильно загрязнённых.

### Основные параметры диэлектрических материалов

#### 1) $\epsilon$ – диэлектрическая проницаемость;

Диэлектрическая проницаемость – мера способности материала к поляризации; это величина, показывающая во сколько раз сила взаимодействия электрических зарядов в данном материале меньше, чем в вакууме. Внутри диэлектрика возникает поле, направленное противоположно внешнему. Напряженность внешнего поля ослабевает по сравнению с полем тех же зарядов в вакууме в  $\epsilon$  раз, где  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость;

Если вакуум между обкладками конденсатора заменяется на диэлектрик, то в результате поляризации ёмкость возрастает. На этом основано простое определение диэлектрической проницаемости:

$$\epsilon = (C_d / C_0) > 1 \quad (2.1),$$

где:  $C_0$  – ёмкость конденсатора, между обкладками которого – вакуум;

$C_d$  – ёмкость того же конденсатора с диэлектриком.

В зависимости от механизма поляризации,  $\epsilon$  может принимать значения от нескольких единиц до нескольких десятков тысяч. Наименьшие значения  $\epsilon$  имеют неполярные диэлектрики ( $\epsilon < 2,5$ ), а наиболее высокие значения - диэлектрики, обладающие сегнетоэлектрическими свойствами, - ионные материалы, например титанат бария  $BaTiO_3$ , и титанат стронция  $SrTiO_3$  ( $\epsilon > 10^5 - 10^6$ ).

## 2) $\text{tg}\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь;

Диэлектрические потери – потери электрической энергии, обусловленные протеканием токов в диэлектриках. Различают ток сквозной проводимости  $I_{\text{ск. пр}}$ , вызванный наличием в диэлектриках небольшого количества легкоподвижных ионов, и поляризационные токи. При электронной и ионной поляризации поляризационный ток называется током смещения  $I_{\text{см}}$ , он очень кратковременный и не регистрируется приборами. Токи, связанные с замедленными (релаксационными) видами поляризации, называются токами абсорбции  $I_{\text{абс}}$ . В общем случае суммарный ток в диэлектрике определяется как

$$I = I_{\text{абс}} + I_{\text{ск.пр}}, \quad (2.2)$$

После установления поляризации суммарный ток будет равен

$$I = I_{\text{ск.пр}}. \quad (2.3)$$

Если в постоянном поле поляризационные токи возникают в момент включения и выключения напряжения, и суммарный ток определяется в соответствии с уравнением (2.3), то в переменном поле поляризационные токи возникают в момент смены полярности напряжения. Вследствие этого потери в диэлектрике в переменном поле могут быть значительными, особенно если полупериод приложенного напряжения приближается к времени установления поляризации.

На рис. 2.4(а) приведена схема, эквивалентная конденсатору с диэлектриком, находящемуся в цепи переменного напряжения. В этой схеме конденсатор с реальным диэлектриком, который обладает потерями, заменен идеальным конденсатором  $C$  с параллельно включенным активным сопротивлением  $R$ . На рис.2.4(б) приведена векторная диаграмма токов и напряжений для рассматриваемой схемы, где:  $U$  – напряжения в цепи;  $I_{\text{ак}}$  – активный ток;  $I_{\text{р}}$  – реактивный ток, который опережает по фазе на  $90^\circ$  активную составляющую;  $I_{\Sigma}$  – суммарный ток.

При этом:

$$I_a = I_R = U/R \quad (2.4)$$

$$I_p = I_C = \omega C U \quad (2.5)$$

где:  $\omega$  – круговая частота переменного поля.

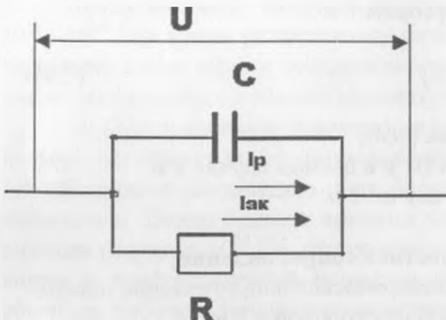


Рис.2.4а

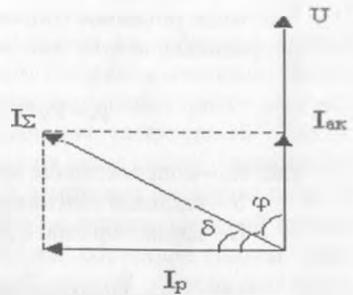


Рис.2.4б

Углом диэлектрических потерь называется угол  $\delta$ , дополняющий до  $90^\circ$  угол сдвига фаз  $\varphi$  между током  $I_\Sigma$  и напряжением  $U$  в ёмкостной цепи.

Потери в диэлектриках в переменном поле характеризуются тангенсом угла диэлектрических потерь.

$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I_p \quad (2.6)$$

Предельные значения тангенса угла диэлектрических потерь для высокочастотных диэлектриков не должны превышать  $0,0001 - 0,0004$ , а для низкочастотных –  $0,01 - 0,02$ .

Зная значения  $\operatorname{tg} \delta$  для диэлектрика можно легко определить мощность, рассеиваемую в диэлектрике.

$$P_a = UI_a = UI_R \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \quad (2.7)$$

### 3) $E_{\text{пр}}$ – электрическая прочность;

Электрической прочностью называется напряженность однородного внешнего электрического поля, приводящая к образованию в диэлектрике канала, обладающего высокой проводимостью (явлению пробоя диэлектрика).

$$E_{пр} = U_{пр} / d \text{ [КВ/мм]}, \quad (2.8)$$

где:  $U_{пр}$  – пробивное напряжение, измеряемое в вольтах или киловольтах;

$d$  – толщина диэлектрика, измеряемая в метрах или миллиметрах.

4)  $\rho_v$  – удельное объёмное сопротивление;

Удельное объёмное сопротивление представляет собой электрическое сопротивление куба материала с ребром 1 м

$$\rho_v = R_v S / L \text{ [Ом}\cdot\text{м]} \quad (2.9)$$

где:  $R_v$  – сопротивление материала (Ом);

$S$  – площадь сечения образца ( $\text{м}^2$ ), в данном случае  $1 \text{ м}^2$

$L$  – длина образца, в данном случае 1 м

5)  $\rho_s$  – удельное поверхностное сопротивление;

Данный параметр характеризует электрическое сопротивление поверхностного слоя диэлектрика в виде квадрата со стороной в 1 м

$$\rho_s = \rho_v / d \text{ [Ом/}\square\text{]} \quad (2.10)$$

где:  $\rho_v$  – удельное объёмное сопротивление;

$d$  – толщина диэлектрика.

Зависимости  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  от температуры и частоты.

Диэлектрические параметры материалов в различной степени зависят от температуры и частоты. Большое количество диэлектрических материалов не позволяет охватить особенности всех зависимостей от указанных факторов. Поэтому на графиках, приведенных на рис. 2.5 – 2.6 изображены общие тенденции, характерные для некоторых основных групп.

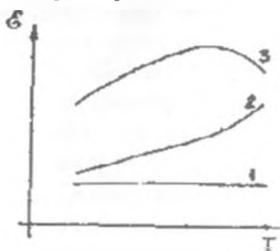


Рис.2.5.

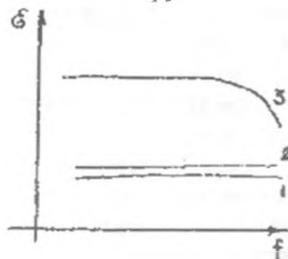


Рис.2.6.

На рис.2.5 приведены типичные зависимости диэлектрической проницаемости от температуры, а на рис.2.6 от частоты, где: 1 – неполярные линейные полимеры (электронная поляризация); 2 – диэлектрики ионного строения (ионная поляризация); 3 – полярные полимеры (дипольная поляризация);

1. С возрастанием температуры объем диэлектрика увеличивается и диэлектрическая проницаемость немного уменьшается. Особенно заметно уменьшение  $\epsilon$  в период размягчения и плавления неполярных диэлектриков, когда их объем существенно возрастает.

Ввиду высокой частоты обращения электронов на орбитах (порядка  $10^{15} - 10^{16}$  Гц) время установления равновесного состояния электронной поляризации очень мало и проницаемость  $\epsilon$  неполярных диэлектриков не зависит от частоты поля в обычно используемом диапазоне частот (до  $10^{12}$  Гц).

2. При повышении температуры ослабевают связи между отдельными ионами, что облегчает их взаимодействие под действием внешнего поля и это приводит к увеличению ионной поляризации и диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ . Ввиду малости времени установления состояния ионной поляризации (порядка  $10^{13}$  Гц, что соответствует собственной частоте колебания ионов в кристаллической решетке) изменение частоты внешнего поля в обычных рабочих диапазонах практически не отражается на величине  $\epsilon$  в ионных материалах.

3. Диэлектрическая проницаемость полярных диэлектриков сильно зависит от их температуры и частоты внешнего поля. С возрастанием температуры увеличивается подвижность частиц и уменьшается энергия взаимодействия между ними, т.е. облегчается их ориентация под действием внешнего поля – возрастает дипольная поляризация и диэлектрическая проницаемость. Однако этот процесс продолжается лишь до определенной температуры. При дальнейшем нагреве кинетическая энергия движения частиц настолько возрастает, что разрушает ориентацию, вызванную внешним полем. При дальнейшем возрастании температуры проницаемость  $\epsilon$  уменьшается.

Т.к. ориентация диполей по направлению поля осуществляется в процессе теплового движения и посредством теплового движения, то установление поляризации требует значительного времени. Это время настолько велико, что в переменных полях высокой частоты диполи не успевают ориентироваться по полю, и проницаемость  $\epsilon$  падает.

### Диэлектрические материалы.

По составу и свойствам все диэлектрические материалы можно разделить на две большие группы:

- 1) органические материалы на основе углерода;
- 2) неорганические материалы на основе оксидов.

Представителями первой группы являются полимеры, которые благодаря высокому удельному сопротивлению, низкой стоимости и технологичности завоёвывают всё более прочные позиции среди диэлектрических материалов.

Небольшое число неполярных линейных полимеров (полистирол, полиэтилен, полипропилен, фторопласт-4) составляют группу сверхвысокочастотных диэлектриков. Среди них наиболее перспективен фторопласт-4 ( $-CF_2-$ )<sub>n</sub>, имеющий очень высокое удельное сопротивление ( $10^{18}$  Ом·м) и низкий  $tg\delta$  ( $2 \cdot 10^{-4}$ ) на частотах до  $10^{10}$  Гц. В отличие от других линейных полимеров фторопласт-4 термо- и хладостоек и сохраняет работоспособность в интервале температур от  $-270$  до  $+300^\circ C$ .

Остальные неполярные материалы СВЧ-техники имеют сравнительно невысокую температуру размягчения и легко получают в виде очень тонкой плёнки высокого качества. Эти свойства позволяют широко применять их при производстве конденсаторов.

Среди композиционных материалов на основе полимеров следует выделить стеклотекстолит, состоящий из стеклоткани, пропитанной смолами. В качестве связующего могут использоваться фенолформальдегидные, эпоксидные и кремнийорганические смолы. Среди слоистых пластиков, к которым также относятся гетинакс и текстолит, стеклотекстолит обладает лучшими механическими и тепловыми свойствами и является основным материалом при изготовлении печатных плат.

Типичным представителем группы неорганических материалов является керамика, получаемая путём спекания порошкообразного сырья при температуре, меньшей температуры плавления. По строению керамика относится к ионным кристаллам, для неё характерна преимущественно ионная поляризация.

В зависимости от состава и технологии изготовления керамика может обладать значениями  $\epsilon$  и  $tg\delta$ , лежащими в очень широком диапазоне, что в свою очередь, расширяет спектр её применения. Лучшие виды керамических материалов применяют в СВЧ технике. Керамика на основе окиси титана  $TiO_2$  и титаната бария  $BaTiO_3$  отличается исключительно высокими значениями  $\epsilon$  и поэтому находит применение в качестве диэлектриков для конденсаторов.

Керамические материалы типа ВК-94-1 (22С) и поликор относятся к высокоглинозёмной керамике (ВК-94-1 содержит 96%  $Al_2O_3$ , а поликор – 99,5%  $Al_2O_3$ ). Эта группа материалов имеет очень низкие диэлектрические потери в диапазоне радиочастот и небольшие значения  $\epsilon$  (несколько единиц). Кроме того, они обладают повышенной нагревостойкостью (до  $1660^\circ C$ ) и хорошей теплопроводностью, что позволяет использовать их в качестве подложек для гибридных ИС

Значения параметров рассматриваемых в работе диэлектриков приведены в таблице 2.1.

Т а б л и ц а 2.1

Материал	Параметры			
	$\epsilon$ при $f = 10^6$ Гц	$\operatorname{tg}\delta$ при $f = 10^6$ Гц	$\rho_v$ , Ом*м	$E_{пр}$ , КВ/мм
Фторопласт-4	1,9 – 2,2	0,0002 – 0,0003	$10^{14} - 10^{16}$	40 – 250
Стеклотекстолит	5,3	0,001 – до 0,05	$10^9 - 10^{11}$	20 - 30
Поликор	10,5	$2 \cdot 10^{-4}$	$10^{12}$	30 – 35
ВК-94-1	10,3	$6 \cdot 10^{-4}$	$10^{11}$	35 - 45

### Содержание задания.

1. Рассчитать диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь исследуемых материалов.
2. Определить какой материал был исследован.

### Порядок выполнения.

Порядок выполнения работы и описание установки выдается инженером лаборатории во время проведения занятий.

### Содержание отчёта.

1. Цель и задачи исследования.
2. Расчётные формулы.
3. Результаты измерений и расчёты диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь исследуемых материалов.
4. Анализ полученных данных, определение вида исследуемого материала и выводы по полученным зависимостям.

### Контрольные вопросы.

1. Что такое поляризация, почему она наблюдается в диэлектриках и не имеет места в металлах?
2. Что такое диэлектрическая проницаемость?
3. Чем отличаются четыре основных механизма поляризации: электронная, ионная, дипольная, миграционная?
4. Какие токи протекают в диэлектрике?
5. Что такое тангенс угла диэлектрических потерь? Привести векторную диаграмму токов.
7. Какими качествами обладают полимеры и керамика, где используются эти материалы?

### Литература.

Материалы микроэлектронной техники /Под ред. В.М.Андреева – М.: «Радио и связь», 1989 г.

## Работа 3

### ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ.

Цель работы - изучение свойств магнитных материалов и методов определения их основных параметров, исследование зависимости магнитной проницаемости от напряженности и частоты электромагнитного поля.

#### Краткие теоретические сведения

Все вещества в природе обладают определенными магнитными свойствами и определенным образом взаимодействуют с внешним магнитным полем. Магнитные свойства вещества зависят от магнитных свойств изолированных элементарных частиц, структуры атомов и молекул, а также их групп.

Элементарными источниками магнетизма в веществе являются спиновые магнитные моменты его электронов, создаваемые движением электронов вокруг собственной оси и направленные вдоль оси вращения электронов. Спиновые моменты большинства электронов в атоме взаимно компенсируются, и магнитные свойства атома, по существу, обусловлены тем небольшим числом электронов, спиновые моменты которых остались нескомпенсированными. Например, у атома железа таких электронов - четыре из двадцати шести, у атома кобальта - три, у никеля - два.

#### Основные параметры, характеризующие магнитные свойства материалов

При наложении внешнего магнитного поля спиновые моменты ориентируются вдоль поля, создавая в веществе дополнительное внутреннее магнитное поле. Таким образом, магнитное поле в веществе является векторной суммой двух магнитных полей: внешнего и внутреннего, и характеризуется вектором магнитной индукции  $B$ , которая определяет степень намагничивания материала во внешнем поле.

Относительной магнитной проницаемостью называется отношение величины индукции  $B$  к соответствующему значению напряженности магнитного поля  $H$

$$\mu = B / \mu_0 H, \quad (3.1)$$

где  $\mu_0$  - магнитная постоянная вакуума, равная  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $H$  - напряженность внешнего магнитного поля. Относительная магнитная проницаемость - величина безразмерная, для вакуума  $\mu = 1$ .

#### Классификация материалов по магнитным свойствам

В зависимости от магнитного состояния вещества разделяются на диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики и ферримагнетики.

**Диамагнетики** - вещества, в атомах которых все электронные оболочки полностью заполнены и все спиновые моменты атомов попарно скомпенсированы. Такие атомы не обладают результирующим магнитным моментом, индуцированный внешним полем момент имеет малую величину и направлен против вызвавшего его поля. Вследствие этого  $\mu$  диамагнетика чуть меньше единицы ( $\mu \sim 0,998$ ) и не зависит от температуры и напряженности поля. К диамагнетикам относятся инертные газы, золото, медь, германий, кремний и другие материалы.

**Парамагнетики** - вещества, атомы которых обладают нескомпенсированными магнитными моментами, с хаотичной ориентацией моментов при отсутствии внешнего поля. При воздействии внешнего магнитного поля происходит слабая ориентация магнитных моментов атомов, поэтому магнитная проницаемость парамагнетика не намного больше единицы ( $\mu \sim 1,03$ ). От напряженности поля при обычных температурах магнитная проницаемость парамагнетиков зависит слабо. К парамагнетикам относятся некоторые металлы, кислород, соли редкоземельных металлов.

Диа- и парамагнетики являются слабомагнитными веществами, магнитные свойства которых не имеют промышленного применения. К применяемым на практике магнитным материалам относятся ферро-и ферримагнетики, высокая магнитная проницаемость которых ( $\sim 10^2 + 10^6$ ) объясняется упорядоченной структурой спиновых моментов соседних атомов.

**Ферромагнетики** - кристаллические вещества, атомы которых так же, как и атомы парамагнетиков, обладают нескомпенсированными магнитными моментами. Разница состоит в том, что в ферромагнетике спины соседних атомов взаимодействуют между собой, ориентируясь параллельно друг другу (обменное взаимодействие). Однако это не означает, что образец в целом однородно намагничен. Энергетически наиболее выгодным является самопроизвольное разделение образца на большое число малых однородно намагнитченных областей, называемых доменами - Объем домена колеблется от  $10^{-6} + 10^{-1}$  см. К ферромагнетикам относятся железо, никель, кобальт и их сплавы.

**Ферримагнетики** - кристаллические вещества, у которых спиновые магнитные моменты атомов в определенной области температур при отсутствии внешнего поля располагаются антипараллельно с частичной компенсацией. Для ферримагнетиков, как и для ферромагнетиков, характерно наличие доменной структуры. Магнитная проницаемость ферримагнетика ниже, чем проницаемость ферромагнетика.

К ферримагнетикам относятся ферриты - соединения окиси железа с оксидом металлов, например соединения  $Me^{2+}O \cdot Fe_2O_3$ , где  $Me^{2+}$  - двухвалентный металл (марганец, цинк, кобальт и др.).

## Параметры, характеризующие ферромагнетики.

Магнитные свойства ферро- и ферримангнетиков обычно характеризуют зависимостями магнитной индукции  $B$  от напряженности внешнего поля  $H$ , которая носит название основной кривой намагничивания. Эта зависимость имеет сложный характер вследствие доменной структуры магнитного материала (рис. 3.1).

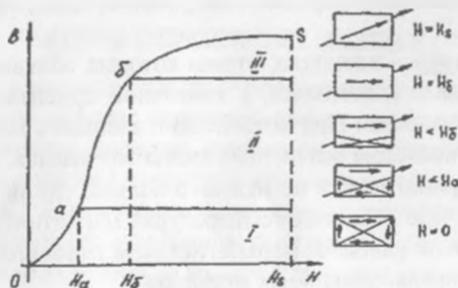


Рис. 3.1.

В зависимости от величины внешнего магнитного поля различают три стадии процесса намагничивания.

1. Смещение границ доменов (участок « $Oa$ » на рис. 3.1). Происходит увеличение объема доменов, вектор намагниченности которых образует наименьший угол с направлением внешнего поля, за счет соответствующего уменьшения неблагоприятно ориентированных доменов. В слабых полях (участок « $Oa$ ») этот процесс носит обратимый характер.

2. В полях средней величины (участок « $ab$ »), происходит необратимое смещение границ доменов и структура становится однодоменной, а образец намагничен в направлении, наиболее благоприятном по отношению к внешнему полю.

3. На участке « $bc$ » происходит вращение вектора намагниченности до совпадения с внешним полем.

4. В точке « $c$ » происходит техническое насыщение образца.

Величина  $\mu$  для ферромагнитных материалов зависит от величины внешнего поля. Эта зависимость приведена на рис.3.2. Магнитная проницаемость в данном случае получается по основной кривой намагничивания как отношение индукции  $B$  к напряженности магнитного поля  $H$  в данной точке кривой намагничивания с учетом магнитной постоянной  $\mu_0$ . Магнитную проницаемость  $\mu_{нач}$  при  $H = 0,1$  А/м называют начальной магнитной проницаемостью. Наибольшее значение магнитной проницаемости носит наименование максимальной магнитной проницаемости и обозначается  $\mu_{макс}$ . При сильных полях в области насыщения магнитная проницаемость  $\mu$  стремится к единице.

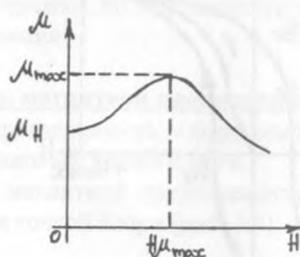


Рис. 3.2.

### Петля гистерезиса.

Процесс вращения вектора намагниченности обратим. При снятии намагничивающего поля вектор намагниченности возвращается к ближайшему направлению легкого намагничивания. Однако ход кривой не повторяется в обратном направлении: При том же значении напряженности внешнего поля значение индукции выше соответствующих значений основной кривой намагничивания, т.е. наблюдается отставание индукции от напряженности поля. Причина этого в том, что энергия, необходимая для размагничивания материала, превышает энергию, необходимую для его намагничивания. При снятии поля в кристалле должны заново создаваться границы доменов. Однако дефекты кристаллов, различные включения, внутренние механические напряжения препятствуют этому процессу. Для их преодоления требуется дополнительная энергия поля, которая и составляет потери на гистерезис.

Поэтому при  $H = 0$  индукция не обращается в нуль, а имеет значение, равное  $B_r$ , и называемое остаточной индукцией. Для того чтобы полностью размагнитить образец, к нему нужно приложить поле обратного направления  $H = H_s$ , называемое коэрцитивной силой.

Явление отставания индукции от напряженности магнитного поля называется гистерезисом, а замкнутую кривую, отражающую изменение индукции за полный цикл изменения напряженности поля (от  $+H_{max}$  до  $-H_{max}$  и обратно) - петлей гистерезиса (рис. 3.3). Петли гистерезиса, в которых максимальная индукция меньше индукции насыщения, называются частными петлями гистерезиса.

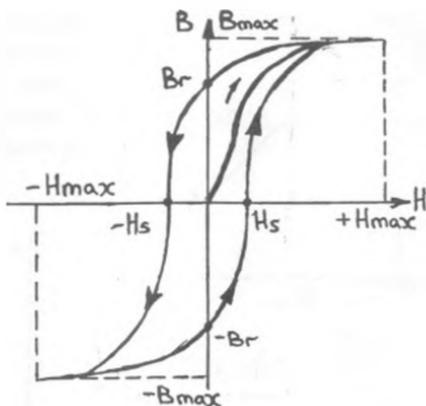


Рис. 3.3

Потери на гистерезис являются следствием структурной неоднородности образца и пропорциональны частоте перемагничивания:

$$P_r = \eta f B_{\max}^n, \quad (3.2)$$

Где:  $\eta$  - коэффициент, зависящий от свойств материала;

$B_{\max}$  - максимальная индукция, достигаемая в течение цикла;

$n$  - показатель степени в пределах от 1,6 до 2;

$f$  - частота изменения внешнего поля.

С увеличением частоты внешнего поля при перемагничивании ферромагнитного материала в нем возникают еще и потери на вихревые токи, которые зависят не только от магнитных, но и от электрических свойств материала и его размеров.

Потери на вихревые токи обратно пропорциональны удельному сопротивлению материала и зависят от квадрата частоты поля:

$$P_f = \xi f^2 B_{\max}^2, \quad (3.3)$$

Где:  $\xi$  - коэффициент, зависящий от свойств материала и его формы (в частности, он пропорционален квадрату толщины материала и обратно пропорционален плотности и удельному сопротивлению материала).

$f$  - частота изменения внешнего поля.

$B_{\max}$  - максимальная индукция, достигаемая в течение цикла;

Потери энергии при перемагничивании материала в переменном магнитном поле можно представить состоящими из потерь на гистерезис  $P_r$  и потерь на вихревые токи  $P_f$ .

$$P_{\Sigma} = P_r + P_f \quad (3.4)$$

Мощность потерь за один цикл перемагничивания определяется площадью петли гистерезиса по предельному циклу, который получается при достижении насыщения.

### Зависимость магнитной проницаемости от температуры и частоты

Магнитная проницаемость  $\mu$  ферромагнетиков зависит от температуры и от частоты внешнего магнитного поля.

Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от температуры характеризуется точкой Кюри (рис. 3.4).

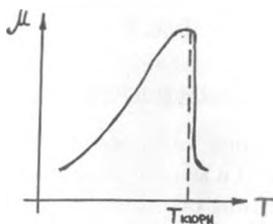


Рис. 3.4

При температурах ниже точки Кюри  $\mu$  растет за счет увеличения подвижности границ доменов магнитного материала. Выше точки Кюри ферромагнетик переходит в парамагнитное состояние в результате значительного теплового движения, разрушающего упорядоченную ориентацию спиновых моментов. Температура Кюри для железа равна  $768^{\circ}\text{C}$ , никеля -  $358^{\circ}\text{C}$ , кобальта  $1130^{\circ}\text{C}$ , ферритов -  $7\div 400^{\circ}\text{C}$ .

Изменение магнитной проницаемости с изменением температуры (температурная нестабильность) характеризуется температурным коэффициентом магнитной проницаемости  $TK_{\mu}$ , который для заданного диапазона температур ( $T_2 - T_1$ ) определяется по формуле

$$TK_{\mu} = (\mu_{T_1} - \mu_{T_2}) / \mu_{T_1} (T_2 - T_1) [1/^{\circ}\text{K}]$$

Из рис. 3.4 видно, что материалы, применяемые до  $T_K$ , имеют положительный  $TK_{\mu}$ , а применяемые при температурах после  $T_K$ , - отрицательный  $TK_{\mu}$ .

Область применения материала ограничена частотой  $f_{кр}$ , после которой  $\mu$  падает (рис. 3.5), что объясняется двумя причинами: инерционностью процесса перемагничивания и вытеснением магнитного потока на поверхность образца.

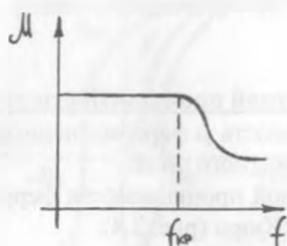


Рис. 3.5

### Магнитомягкие и магнитотвердые материалы

По величине коэрцитивной силы все магнитные материалы делятся на магнитомягкие ( $H_c < 4000$  А/м) и магнитотвердые ( $H_c > 4000$  А/м).

Магнитомягкие материалы обладают высокой магнитной проницаемостью в сочетании с низкими потерями и применяются в качестве магнитопроводов трансформаторов, сердечников катушек индуктивности и т.д.

Основной проблемой, возникающей при использовании магнитомягких материалов на высоких частотах, является резкое возрастание потерь на вихревые токи. По этому параметру магнитные материалы, в свою очередь, делятся на материалы для низких и высоких частот.

К магнитомягкими материалами для низких частот относятся сплавы с низким удельным сопротивлением, такие, как электротехническая сталь, пермаллой, альсифер, параметры которых приведены в табл.3. I.

Сплавы железа с никелем - пермаллой - обладают наиболее высокими значениями магнитной проницаемости при минимальных значениях  $H_c$ . Недостатками пермаллоев являются высокая стоимость и чувствительность к механическим воздействиям.

На высоких частотах используется особая группа неметаллических магнитных материалов с повышенным значением удельного сопротивления - магнитодиэлектрики и магнитомягкие ферриты.

Магнитодиэлектрики получают путем прессования порошка ферромагнетика (карбонильного железа, альсифера, пермаллоя) с органическим или неорганическим связующим (фенолформальдегидными смолами, полистиролом, стеклом и др.). Потери на вихревые токи зависят от величины зерна и качества изоляционного слоя. Магнитная проницаемость магнитодиэлектрика ниже, чем магнитная проницаемость основы. Достоинством магнитодиэлектриков является их высокая температурная стабильность.

Таблица 3.1.

Магнитомягкие материалы			
Наименование	$H_s$ [А/м]	$\mu_{нвч}$	$\rho$ [Ом м]
Карбонильное железо	6,4	3300	$10^{-7}$
Электротехническая сталь	30 - 85	4000	$3 \cdot 10^{-7}$
Пермалой	1 - 30	$10^4$	$5 \cdot 10^{-7}$
Альсифер	2	$10^4$	$8 \cdot 10^{-7}$
Марганец-цинковые ферриты (MnO ZnO) $Fe_2O_3$	4 - 24	$10^3$	$10^{-3}$
Никель-цинковые ферриты (NiO ZnO) $Fe_2O_3$	20 - 40	$10^3$	$10^5$

Ферриты - соединения типа  $MeO(Fe_2O_3)_n$ , где  $n = 1, \dots, 6$ . По величине сопротивления ферриты относятся к полупроводникам ( $\rho_v = 10^{-2} \div 10^{+8}$  Ом\*м), что дает возможность применять их на высоких частотах и в СВЧ-технике. По своим магнитным свойствам ферриты относятся к классу ферримагнетиков, потоому магнитная проницаемость у них ниже, чем у ферромагнитных сплавов ( $\mu_{нвч} \approx 10 \div 1000$ ).

Магнитные свойства ферритов можно регулировать за счет комбинирования различных оксидов. Недостатком ферритов является их низкая температурная стабильность, разброс свойств при производстве и трудность механической обработки.

К магнитотвердым материалам относятся материалы с высокой коэрцитивной силой ( $H_s > 4000$  А/м). Основными показателями свойств магнитотвердых материалов являются максимальная магнитная энергия

$$\hat{W}_{max} = 0,5(BH)_{max} > 10^3 \text{ Дж/м}^3$$

и остаточная индукция

$$(B_r > 0,5 \text{ Т}).$$

От показателя  $\hat{W}_{max}$  зависит объем магнита, необходимого для создания магнитного поля в заданном воздушном зазоре. Чем больше магнитная энергия, тем меньше объем, а следовательно и масса магнита. По этой причине понятие магнитной проницаемости применительно к ним не имеет реального смысла. Магнитотвердые материалы применяются как накопители энергии – постоянные магниты: в магнетронах, магнитоэлектрических измерительных приборах, фокусирующих магнитах, громкоговорителях и т.д. К магнитотвердым материалам относятся: стали, легированные вольфрамом, хромом молибденом, магнитотвердые ферриты, соединения и сплавы редкоземельных магнитотвердых материалов. Некоторые параметры магнитотвердых материалов приведены в таблице 3.2.

Поскольку коэрцитивная сила является структурно-чувствительным свойством, разница между магнитомягкими и магнитотвердыми материалами состоит не в их химическом составе, а в структуре. В магнитомягких материалах движение доменных границ должно быть по возможности облегчено. В магнитотвердых материалах намеренно создаются дефекты, мешающие движению границ доменов, проводится специальная термомагнитная обработка (охлаждение в магнитном поле), способствующая сохранению большой остаточной индукции. Магнитотвердые сплавы системы Al-Ni-Fe, по существу, представляют собой композиции, где мелкие магнитные частицы железа погружены в немагнитную матрицу.

Таблица 3.2.

Магнитотвердые материалы		
Наименование	$iH_s$ [КА/м]	$\bar{W}_{max}$ [КДж/м <sup>3</sup> ]
Литые сплавы Al-Ni-Fe	40	10 - 4
Магниты из порошков Al-Ni-Fe	20 - 40	3 - 3,5
Феррит бария BaO 6 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	95 - 185	2 - 14
Феррит кобальта CoO Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10 - 150	10 - 15

#### Содержание задания

Провести экспериментальное определение значений  $B$ ,  $H$  и  $\mu$  для образцов материалов в требуемом диапазоне частот.

#### Порядок выполнения работы

Порядок выполнения работы и описание установки выдается инженером лаборатории во время проведения занятий.

#### Содержание отчета

1. Цель работы
2. Экспериментальные и расчетные данные, оформленные в виде таблиц.
3. Графики зависимостей  $B = f(H)$ ,  $\mu = f(H)$ ,  $\mu = \varphi(f)$ .
5. Анализ полученных результатов и общие выводы по работе.

#### Контрольные вопросы

1. Какова природа магнитных свойств материалов и классификация материалов по магнитным свойствам?
2. Расскажите о магнитной структуре ферромагнетиков.
3. Приведите основную кривую намагничивания и петлю гистерезиса для ферромагнетика. Объясните их физический смысл.
4. Назовите основные виды потерь в ферромагнитных материалах, поясните их частотную зависимость, способы уменьшения потерь.

5. Как влияет частота и температура на параметры ферромагнетика?
6. Охарактеризуйте состав и свойства магнитомягких материалов для низких частот.
7. Какие требования предъявляются к магнитомягким материалам, работающим на высоких частотах? Приведите конкретные примеры.
8. Какими свойствами характеризуются магнитотвердые материалы?

### Литература

Материалы микроэлектронной техники / Под ред. В.М.Андреева – М.: «Радио и связь», 1989 г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОДЛОЖЕК ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ.

Цель работы: - исследование теплопроводности различных материалов подложек гибридных интегральных схем (ГИС) и приобретение навыков работы с измерительными приборами, применяемыми для этой цели.

### Краткие теоретические сведения.

Подложка ГИС является ее конструктивным основанием, на поверхности которого формируются схемные элементы. Подложки ГИС непосредственно не участвуют в преобразовании и передаче сигналов (исключая СВЧ-схемы). Они изготавливаются из диэлектрических материалов и обеспечивают отвод тепла, выделяемого элементами, и электрическую изоляцию элементов. Гибридные ИС изготавливаются по двум технологиям:

- 1) тонкопленочные ГИС - методом напыления в вакууме тонких (менее микрона) пленок на подложку через трафарет;
- 2) толстопленочные ГИС - методом трафаретной печати с последующим вжиганием при  $t = 600 \dots 1000^\circ\text{C}$  в керамическую подложку композиций со средней толщиной около 25 мкм.

Свойства подложки существенно влияют на свойства нанесенных на нее пленок и на надежность всей ГИС.

К материалу подложки предъявляются следующие требования:

1. Высокие электроизоляционные свойства - высокое удельное сопротивление  $\rho_v > 10^{10}$  Ом·м, малая диэлектрическая проницаемость  $\epsilon < 10$ , обеспечивающие надежную изоляцию, и отсутствие емкостной связи между элементами ИС.

2. Высокая чистота обработки поверхности подложки (12 - 14 класс), которая необходима для обеспечения однородности и воспроизводимости электрических параметров элементов ИС. Несовершенства поверхности подложки передаются в нанесенные на них пленки. На более грубых поверхностях получают пленки с большим сопротивлением и низкой стабильностью. Особенно чувствительны к дефектам подложки диэлектрические пленки. Уменьшение толщины диэлектрической пленки конденсатора на микронеровностях подложки может вызвать пробой. Исходя из этого высота микронеровностей подложки не должна превышать 0,025 мкм для тонкопленочных ИС, тогда как для толстопленочных ИС она может достигать 0,5 мкм.

Кроме того, важно, чтобы на поверхности подложки не было загрязнений: пыли, жировой пленки, влаги и т. п. Поэтому перед напылением поверхность подложки тщательно очищают (но без ухудшения чистоты обработки поверхности).

3. Высокая плоскостность - для обеспечения плотного прилегания маски к подложке в тонкопленочных ГИС  $\pm 1 \text{ мкм/мм}$  и равномерности зазора между трафаретом и подложкой в толстопленочных ГИС  $\pm 0,04 \text{ мм/мм}$ .

4. Низкая пористость - для исключения интенсивного газовыделения, изменяющего параметры элементов ИС.

5. Высокая теплопроводность материала подложки - уменьшает разогрев элементов схемы, позволяет достигнуть более высокой плотности компонентов и повышает допустимую рассеиваемую мощность ГИС.

6. Высокая термостойкость ( $600 \dots 1000^\circ\text{C}$ ), стойкость к термоударам - обеспечивает возможность нагревания подложки при изготовлении ГИС (в процессе вакуумного напыления или высокотемпературного отжига).

7. Невысокая стоимость.

Материалов, которые идеально удовлетворяли бы всем требованиям, очевидно, не существует, поэтому выбор материала подложки производится с учетом области применения. Для подложек используют неорганические диэлектрические материалы, аморфные и поликристаллические - стекло, ситалл, керамику.

Отличительной особенностью подложек микрополосковых СВЧ-схем ( $3 \dots 30 \text{ ГГц}$ ) является то, что диэлектрическая подложка в данном случае служит не только пассивным основанием, но и имеет функциональное назначение. Полосковая линия передачи образуется в толще между нижней металлизированной поверхностью и проводником, нанесенным на верхнюю поверхность, поэтому основным критерием при выборе подложек для схем СВЧ является сочетание высокой диэлектрической проницаемости с малыми диэлектрическими потерями ( $\text{tg} \delta \sim 10^{-4}$ ).

### Сравнительные характеристики материалов, применяемых для подложек ГИС

В качестве подложек для тонкопленочных ГИС используют стекло и ситалл, а для толстопленочных - керамику.

**Подложки из стекла.** Первыми материалами, используемыми для подложек тонкопленочных ГИС, были стекла. Они представляют собой неорганические аморфные термопластичные материалы, получаемые путем переохлаждения жидкого расплава окислов ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  и др.). К достоинствам стеклянных подложек относится возможность получения высокой чистоты поверхности и высокой плоскостности ( $1 \text{ мкм/мм}$ ), отсутствие пор и влагопроницаемости, низкая стоимость. Однако низкая механическая прочность и низкая теплопроводность (см. табл. I) ограничивают их применение.

**Подложки из ситалла.** Основным материалом для подложек тонкопленочных ГИС являются ситаллы. К ситаллам относят материалы, получаемые, подобно стеклу, сплавлением неорганических окислов, но подвергае-

мые затем управляемой кристаллизации. Процент кристаллической фазы у ситаллов составляет 60 - 95% объема.

Микрокристаллическая структура ситаллов обусловлена соответствующим составом стекла. Кроме того, в них еще вводят специальные катализаторы кристаллизации, которыми могут быть благородные металлы (золото, серебро, платина), а также чистая медь. Эти катализаторы, вводимые в очень малых количествах, вызывают кристаллизацию при облучении ультрафиолетовым светом или  $\gamma$ -лучами. Так получают фотоситаллы. Катализаторами могут быть и окислы металлов ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  и др.), хорошо растворимые в стекле. Эти катализаторы вызывают кристаллизацию при ступенчатой термической обработке при температурах  $550^\circ - 1100^\circ$ . Так получают термоситаллы. Благодаря высокой степени кристаллизации ситаллы обладают ценным сочетанием физико-химических свойств: механической прочностью, твердостью, термической и химической стойкостью, а также хорошими электрическими свойствами. Доступность сырья и простая технология обеспечивают невысокую стоимость изделий.

Условное обозначение марок стекла и ситалла состоит из буквенного кода (С - стекло, СТ - ситалл), следующая за ним цифра - значение температурного коэффициента линейного расширения  $\text{ТКЛР} \times 10^7 \text{ } 1/^\circ\text{C}$ , далее следует номер разработки. Например, СТ-50-1, ситалл,  $\text{ТКЛР} = 50 \times 10^{-7} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ , первая разработка. Для подложек ИС применяется ситалл СТ-50-1, СТ-50-2, СТ-32-1 и другие.

**Подложки из керамики.** Керамика - материал, получаемый спеканием массы, состоящей из окислов металлов, нитридов или карбидов. Керамика - материал поликристаллический, прочность и монолитность которого обеспечиваются стекловидной прослойкой между кристаллами, а свойства зависят от химического, фазового составов и технологии изготовления. Для получения керамических подложек с чистотой поверхности 12 класса необходима керамика мелкокристаллической структуры с размерами зерен не более 3 мкм, однофазная с минимальным содержанием стекла. Этим требованиям удовлетворяют чистые окислы. В настоящее время основным материалом для подложек является окись алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; в особых случаях применяется окись бериллия  $\text{BeO}$ .

Марки керамических материалов для подложек:

- 1) 22ХС - 96%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , кристаллическая фаза 89%;
- 2) поликор - 99,7%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , кристаллическая фаза 99%;
- 3) брокерит - 95-98%  $\text{BeO} + (3...5)\% \text{Al}_2\text{O}_3, \text{CaO}, \text{SiO}_2$ .

Особенностью подложек из окиси бериллия является их высокая теплопроводность (210 Вт м./град), превосходящая теплопроводность чистого бериллия и даже алюминия.

Большинство керамических подложек имеет заметную кривизну ( $\sim 0,04$  мм/мм) и шероховатость поверхности, возникающую при отжиге. Для обес-

печения необходимой чистоты поверхности подложку подвергают шлифованию с последующим полированием.

Основные достоинства керамических подложек:

- 1) высокая теплопроводность (на 1—2 порядка выше, чем у ситалловых);
- 2) высокая механическая прочность;
- 3) высокая нагревостойкость (до 2000°C);
- 4) малый тангенс угла диэлектрических потерь.

Однако керамические подложки уступают стеклянным и ситалловым по чистоте поверхности и плоскостности, а также имеют более высокую стоимость, особенно подложки из брокерита. Подложки из брокерита в сто раз дороже подложек из стекла, что объясняется высокой стоимостью сырья и сложностью производства. Полировка керамических подложек увеличивает их стоимость в три раза.

Керамические подложки применяют для изготовления толстопленочных ИС. Основные параметры материалов для подложек гибридных ИС приведены в табл. 1.

Таблица 1

Материал подложки	Стекло С- 41- 1	Ситалл СТ- 50-1	Керамика		
			22ХС	Поликор	Брокерит
Класс чистоты	14	13-14	12	12... 14	14
$\epsilon$ при $f = 1$ МГц	~7.5	8,5	10,3	10,5	6,3
$\text{tg}\delta$ при $f = 1$ МГц	$2 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$
Удельное сопротивление $\rho_v$ , Ом м	$10^{10}$	$10^{11}$	$10^{12}$	$10^{12}$	$10^{13}$
Коэффициент теплопроводности, Вт/м °С	1,2	1,4	21	32	210
Температура размягчения, °С	620	930	1650	1650	-
ТКЛР 1/°С	$41 \cdot 10^{-7}$	$50 \cdot 10^{-7}$	$64 \cdot 10^{-7}$	$75 \cdot 10^{-7}$	$61 \cdot 10^{-7}$
Предел прочности при изгибе, МПа	5	80	460	280	150

#### Теплопроводность материалов для подложек.

Наиболее важным тепловым параметром материалов для подложек ИС является теплопроводность. Теплопроводность определяется коэффициентом теплопроводности  $\sigma_m$ , который представляет собой отношение количества тепла  $Q$ , переданного в единицу времени  $t$  через единицу площади  $S$ , к градиенту распределения температуры по длине образца ( $dt/dl$ ):

$$\sigma_T = Q \cdot dt / S \cdot dl \cdot \tau \quad (4.1)$$

В твердых диэлектриках передача тепла осуществляется за счет колебания ионов или молекул в узлах кристаллической решетки (теплопроводность за счет фононов). Единицы измерения коэффициента теплопроводности:  $1 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C} = 2,39\cdot 10^{-3} \text{ кал/см}\cdot\text{с}\cdot\text{°C} = 0,86 \text{ Ккал/м}\cdot\text{ч}\cdot\text{°C}$ .

[Из определения теплопроводности следует, что разность температур двух поверхностей подложки толщиной  $\Delta l$  обратно пропорциональна теплопроводности образца]

$$\Delta t = Q \cdot \Delta l / \sigma_T \cdot S \cdot \tau \quad (4.2)$$

Непосредственное определение коэффициента теплопроводности является сложной физико-химической задачей. В данной работе оценка теплопроводности подложки производится качественно на основании измерения разности температур между двумя поверхностями подложки, одна из которых является теплонагруженной.

### Порядок выполнения работы

Порядок выполнения работы и описание установки выдается инженером лаборатории во время проведения занятий.

### Содержание отчета

1. Цели и задачи исследования.
2. Результаты измерений.
3. Графики зависимости  $\Delta t = f(\tau)$  для различных материалов.
4. Анализ полученных зависимостей и общие выводы по работе.

### Контрольные вопросы.

1. Требования, предъявляемые к материалам подложек ИС.
2. Свойства подложек из стекла.
3. Свойства и технология получения ситалловых подложек.
4. Подложки из керамики, состав, свойства, применение.
5. Теплопроводность подложек, способы ее определения и влияние теплопроводности на область применения

### Литература

Материалы микроэлектронной техники / Под ред. В.М. Андреева – М.: «Радио и связь», 1989 г.



## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Работа № 1. Исследование свойств полупроводниковых материалов.....	4
Работа № 2. Исследование параметров диэлектриков .....	13
Работа № 3. Изучение свойств магнитных материалов .....	22
Работа № 4. Исследование тепловых свойств материалов для подложек интегральных схем .....	32