

2.3. Диэлектрические материалы

Диэлектрическими свойствами обладают как правило, материалы с широкой запрещенной зоной большим электросопротивлением, что наблюдается чаще в материалах в высокой степени ионности связи (свыше 50 %). Такие материалы обладают при наличии соответствующих дефектов в решетке (например, кислородных вакансий) проводимостью II-ого рода и характеризуются проявлением различных поляризационных явлений.

Среди диэлектриков можно выделить следующие группы:

1) *пассивные*:

- электроизоляционные материалы (органические и неорганические);
- конденсаторные материалы (низко- и высокочастотные).

2) *активные*:

- пьезоэлектрики (моно- и поликристаллические);
- пироэлектрики ;
- сегнетоэлектрики (ионные и дипольные);
- диэлектрики специального назначения (материалы для твердотельных лазеров, жидкие кристаллы и другие).

Лекция № 10

Пассивные диэлектрические материалы

Пассивные диэлектрики разделяются на *электроизоляционные материалы*, которые должны обладать высоким электросопротивлением $\rho \uparrow$ и пониженной диэлектрической проницаемостью $\epsilon \downarrow$, и *конденсаторные материалы*, главные требования к которым – высокая диэлектрическая проницаемость $\epsilon \uparrow$ и пониженные диэлектрические потери $\text{tg}\delta \downarrow$.

Органические электроизоляционные диэлектрики

Среди этих диэлектриков можно выделить *полимеры, эластомеры, лаки, компаунды, композиционные пластмассы, в том числе волокнистые или слоистые материалы*. Полимерные органические изоляторы в зависимости от особенностей структуры делятся на линейные (или термопластичные) и пространственные (терморезистивные). Линейные полимеры характеризуются пониженной температурой плавления и хорошей растворимостью в ряде растворителей с образованием пленкообразующих композиций. Пространственные диэлектрики плавятся чаще с разложением и плохо растворяются в растворителях. Поэтому более широкое применение находит изоляция на основе линейных полимерных материалов. В зависимости от наличия дипольного момента в мономерных фрагментах соединений среди линейных полимеров выделяют полярные и неполярные материалы (табл. 2.6). С практической точки зрения более универсальными являются неполярные изоляторы, которые могут применяться как на низких, так и на высоких частотах. Наиболее доступным из этих материалов является *полиэтилен*, который в зависимости от условий получения содержит до 90 % кристаллической фазы. Полиэтилен обладает хорошей химической

стойкостью, экологически не опасен. Его механическую прочность повышают с помощью облучения потоком ускоренных электронов. Инженерам-технологам хорошо знаком термо- и химически стойкий *фторопласт*, который широко используется для изготовления технологической оснастки и емкостей.

Таблица 1

Сравнительная характеристика линейных полимерных органических изоляторов

<i>полярные</i>	<i>неполярные</i>
<i>Доминирующий механизм поляризации</i>	
дипольно-ориентационный	электронный
<i>Электрические свойства</i>	
tgδ ↑, ρ ↓	tgδ ↓, ρ ↑
<i>Особенности применения</i>	
низкочастотные устройства	низко- и высокочастотные устройства
<i>Примеры материалов</i>	
1) поливинилхлорид (ПВХ) $(-\text{CH}_2-\text{CHCl}-)_n$ (химическая стойкость, повышенная механическая прочность, но пониженные диэлектрические свойства) 2) лавсан (полиэтилентерефталат)	1) полиэтилен $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$ (хорошие диэлектрические свойства, химическая стойкость, пластичность, дешевизна, но повышенная хрупкость) 2) политетрафторэтилен (фторопласт) $(-\text{CF}_2-\text{CF}_2-)_n$ (относительно высокая термостойкость до 300 °С и высокая химическая стойкость)

Лаки и компаунды используются в качестве пленкообразующих диэлектрических материалов. Особенно широкое применение находят *компаунды* в качестве защитных покрытий для герметизации электронных приборов. При этом использование непрозрачных компаундов позволяет, кроме герметизации, скрыть визуальные особенности структуры приборов. Вместе с тем, прозрачные компаунды находят применение в оптоэлектронных интегральных схемах в качестве оптических сред. Применяют 3 основных вида компаундов:

- на основе эпоксидных смол (высокая механическая прочность, отверждение при 60-100 °С);
- силиконовые или кремнийорганические составы (высокая термо- и влагостойкость при высокой стоимости, отверждение при комнатной температуре);
- полимерные (невысокая стоимость, отверждение при ИК- или УФ-обработке).

Композиционные пластмассы благодаря пластичности и технологичности широко используются для изготовления корпусов,

клавиатур, элементов внешних панелей, разъемов, ручек и других элементов электронных различного цвета. Эти материалы включают следующие основные составляющие: связка, диэлектрический наполнитель, краситель, а также пластификатор и стабилизатор. В качестве связки чаще используются искусственные смолы (например, фенолформальдегидные (темные), анилинформальдегидные (цветные), кремнийорганические (термостойкие)), а в качестве наполнителя – дешевые неорганические диэлектрики (песок, бумага, стекловолокно и другие).

Разновидностью композиционных пластмасс являются *слоистые пластики*, в которых в качестве наполнителя используются не порошковые, а волокнистые материалы. Эти материалы в виде подложек, фольгированных медью, широко используют в производстве негибких печатных плат. Среди них можно выделить *гетинакс*, спрессованная бумага, пропитанная фенолформальдегидной или другой смолой, *текстолит*, спрессованная хлопчатобумажная ткань, пропитанная фенолформальдегидной или другой смолой, и *стеклотекстолит*, спрессованная бесщелочная стеклянная ткань, пропитанная фенолформальдегидной или другой смолой. Наиболее высокой устойчивостью, стабильностью, изолирующей способностью характеризуется стеклотекстолит, который используется как качественная основа печатных плат. Гетинакс имеет низкую стоимость, хорошие диэлектрические свойства, пониженные механические свойства в сравнении с текстолитом.

Неорганические пассивные диэлектрики

Среди многочисленных неорганических пассивных диэлектриков можно выделить:

1. монокристаллические подложки;
2. изоляционная керамика;
3. ситаллы;
4. стекла.

Использование подложек из *монокристаллических* диэлектриков связано с большими материальными затратами. Однако такие подложки находят применение при формировании сложных структур электронных приборов на основе монокристаллических функциональных слоев. Химическая природа подложки определяется структурными особенностями функциональных материалов для конкретных приборов. Так, в настоящее время для производства светодиодов синего цвета свечения используются гетероструктуры на основе монокристаллических нитридов галлия, индия, алюминия. В отсутствие возможности получения монокристаллических слитков нитридных полупроводников ввиду высокой летучести азота весьма удачной подложкой оказался *сапфир* (Al_2O_3). Эти подложки имеют диаметр до 150 мм, достаточно высокое структурное совершенство и хорошие изолирующие свойства. Кроме того, в качестве монокристаллических подложек возможно использование других материалов, чаще оксидной природы, например, MgO, а также сложные оксиды.

Наиболее распространенный вид неорганических изоляторов – керамические материалы, которые получают по керамической технологии (измельчение, прессование, отжиг) и которые находятся в поликристаллическом структурном состоянии. Основными компонентами *изоляционной керамики* являются диэлектрические оксиды SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , TiO_2 , ZrO_2 , BeO .

Исторически первыми керамическими изоляторами были фарфоры электротехнического назначения, основной фазой которых является муллит $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. Другим примером диэлектрической керамики является *высокоглиноземистая* или *алюмооксидная* керамика, основным компонентом которой является Al_2O_3 (70-90 %). Эта керамика благодаря высокой термо- и химической стойкости, механической прочности, невысокой стоимости широко используется в качестве подложек при производстве гибридных интегральных схем. При этом высокочастотные миниатюрные устройства создают на подложках с содержанием Al_2O_3 свыше 90 %. Для снижения температуры спекания керамических заготовок с 2000 до 1600 °С в состав добавляют SiO_2 , MgO , CaO и другие оксиды. Наиболее высокое содержание Al_2O_3 в *поликоре* (до 99%), основной фазой которого является кристаллический корунд ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$). Этот материал обладает высокой плотностью и обеспечивает высокий класс подготовки поверхности подложки. Кроме того, поликор в отличие от других керамических материалов является прозрачным благодаря мелкозернистой (длина волны падающего света должна быть равна размеру кристаллита) и беспористой структур. Прозрачность позволяет использовать поликор для подложек оптоэлектронных интегральных схем. В целом, недостатками высокоглиноземистой керамики являются абразивность, высокая температура спекания и пониженная пластичность.

Среди керамических диэлектриков наиболее высокой теплопроводностью (около 240 Вт/м·К) и наиболее низкой диэлектрической проницаемостью (около 7) обладает бериллиевая керамика и, в частности, *брокерит*, содержащий 93 % BeO , 7 % $\text{SiO}_2 + \text{CaO}$. Такая керамика характеризуется также высокой стойкостью к термоударам, пониженной плотностью используется в качестве подложек для мощных электронных СВЧ-приборов. Наиболее существенным недостатком бериллиевой керамики является токсичность и хрупкость.

Примером недорогих изолирующих материалов является группа материалов, так называемой магнезиальной керамики, которая в качестве основных компонентов содержит MgO и SiO_2 . Она имеет неплохие диэлектрические свойства и применяется, например, в вакуумных электронных приборах (табл. 2.7). В последнее время все шире применяется алюминитридная керамика на основе AlN .

Сравнительная характеристика разновидностей магнезиальной керамики

<i>стеатитовая</i>	<i>форстеритовая</i>
<i>Основная кристаллическая фаза</i>	
Стеатит $MgO \cdot SiO_2$	Форстерит Mg_2SiO_4
<i>Достоинства</i>	
пластичность	$\uparrow dl/dT$
\downarrow коэффициент усадки	
<i>Недостатки</i>	
узкий интервал спекания	узкая область применения
<i>Применение</i>	
корпуса электронных приборов высокочастотные изоляторы	вакуумплотная изоляция для контактов с материалами, имеющими $\uparrow dl/dT$ (Cu)

Ситаллы

Ситаллы – группа недорогих стеклокристаллических материалов, получаемых путем стимулированной кристаллизации стекол специального состава. В зависимости от природы стимулирующего воздействия выделяют термоситаллы (каталитическая кристаллизация) и фотоситаллы (фотокристаллизация). Состав ситаллов обычно сложен. Он определяется требованиями конкретных приборов и может содержать целый ряд из вышеуказанных оксидов, используемых в электроизоляционной керамике, а также оксиды бора, щелочных и других металлов (V, Cr, Sn). По кристаллической структуре ситаллы занимают промежуточное состояние между аморфным стеклом и поликристаллическими керамическими материалами. Содержание кристаллической фазы в ситаллах составляет 25÷95 %. Она характеризуется малым значением размера кристаллитов (0,05÷1 мкм) и низкой пористостью. Благодаря этим особенностям ситаллы при хороших диэлектрических параметрах имеют высокую механическую прочность, износостойкость и теплопроводность. Варьирование состава позволяет в широком диапазоне изменять температурный коэффициент линейного расширения.

Среди недостатков ситаллов можно отметить пониженную химическую стойкость, обусловленную присутствием щелочных металлов.

Ситаллы находят применение в качестве подложек для гибридных интегральных схем, резисторов, конденсаторов, а также используются как конструкционные материалы.

Стекла

Стекла – это диэлектрические материалы, которые находятся в аморфном структурном состоянии. Их получают на основе материалов, склонных к затвердению в неупорядоченном стеклоподобном состоянии. Наиболее распространенной основой стеклянных материалов является SiO_2 , кроме которого стекла могут содержать B_2O_3 ; Al_2O_3 ; P_2O_5 и другие оксиды. В целом, достоинствами стекол являются низкая пористость; высокое удельное

сопротивление; пониженная стоимость; прозрачность и возможность управления цветом; повышенная химическая стойкость. Наиболее существенные недостатки - хрупкость и склонность к кристаллизации, что приводит к изменению свойств материала.

Силикатные стекла по составу можно разделить на 3 группы:

1. Щелочные стекла без тяжелых металлов;
2. Щелочные стекла с тяжелыми металлами (PbO, BaO);
3. Кварцевые безщелочные стекла.

Удельное электросопротивление стекол увеличивается от 10^8 Ом·см для щелочных стекол до 10^{18} Ом·см для кварцевых стекол.

В зависимости от области применения выделяют электровакуумные стекла (с определенным значением температурного коэффициента линейного расширения); изоляторные стекла (должны обеспечивать хорошую адгезию к металлам в структуре полупроводниковых и других приборов); лазерные стекла (служат рабочей средой твердотельных лазеров); световоды для оптоволоконной электроники.

Конденсаторные диэлектрики

Группу конденсаторных диэлектриков образуют диэлектрики с повышенной диэлектрической проницаемостью, которые используются для производства конденсаторов, то есть устройств с номинальной электрической емкостью. В зависимости от частоты сигнала в эксплуатационной цепи конденсаторные диэлектрики разделяют на низко- и высокочастотные (свыше 1 МГц) материалы. Основой конденсаторных материалов является TiO_2 и смешанные оксиды со структурой перовскита (табл. 2.8).

Таблица 3

Сравнительная характеристика конденсаторных диэлектриков

<i>Низкочастотные</i>	<i>Высокочастотные</i>
<i>Требования к свойствам</i>	
$\downarrow \epsilon, \downarrow tg \delta$	$\uparrow \epsilon, \uparrow tg \delta$
<i>Состав</i>	
BaTiO ₃ (сегнетокерамика)	Тиконды на основе TiO ₂ или CaTiO ₃ Термокомпенсированные диэлектрики на основе твердых растворов CaTi _{1-x} Zr _x O ₃ Станатная керамика CaTi _{1-x-y} Zr _x Sn _y O ₃

Достоинствами этих материалов являются невысокая стоимость; технологичность; возможность гибкого управления свойствами; надежность; работоспособность в жестких условиях. Недостатки связаны с пористостью, а также заметной температурной зависимостью диэлектрической проницаемости.