

### *Лекция № 3*

#### *Механические и электрические свойства*

При использовании материалов в конкретных изделиях бывает трудно разделить физические и химические свойства материалов, поскольку любые особенности его участия в физических и химических процессах в значительной мере определяются химическим составом. Однако для студентов специализации «Химическая технология квантовой и твердотельной электроники» важно понимать, что при разработке структуры прибора в большей мере учитываются физические свойства, а при разработке технологии производства этого прибора зачастую на первый план выступают химические свойства.

Среди основных физических свойств твердотельных материалов можно выделить *механические, электрические, магнитные, тепловые, оптические свойства*. В отдельных случаях выделяют комбинированные свойства, например, *фотоэлектрические, термоэлектрические, электромеханические* и т.д.

Для любых материалов важное значение имеют механические свойства такие, как

- *прочность* (способность оказывать сопротивление внешним механическим воздействиям без разрушения);
- *твёрдость* (способность оказывать сопротивление проникновению более твёрдого тела);
- *пластичность* (способность необратимо деформироваться без разрушения при внешнем механическом воздействии);
- *хрупкость* (обратная вязкости неспособность оказывать сопротивление ударным нагрузкам);
- *износостойкость* (сопротивление изнашиванию вследствие трения).

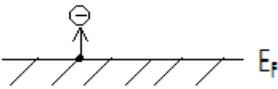
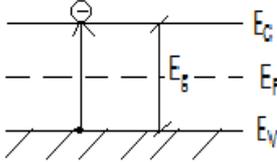
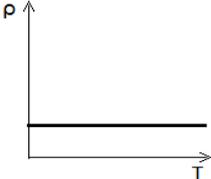
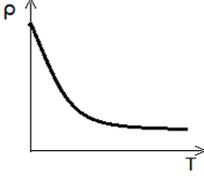
Для изучения механических свойств проводят испытания материала на растяжение, кручение, изгиб, сжатие, прочность, износ и другие.

Для материалов электронной техники в большинстве случаев наиболее важными являются электрические свойства. Эти свойства определяются механизмами участия материалов в двух ключевых процессах, происходящих в материале при наложении электрического поля: *электроперенос* (возникновение электрического *тока* в виде направленного переноса заряда подвижными носителями) и *поляризация* (возникновение *дипольных моментов* за счет обратимого смещения центров тяжести связанных зарядов). Величина удельной электропроводности определяет разделение всех материала на три группы: *проводники, полупроводники и диэлектрики*, хотя собственно абсолютное значение  $\sigma$  или  $\rho$  не отражает фундаментальных отличий между указанными группами веществ.

Электротранспортные свойства наиболее важны для проводников и полупроводников (табл. 1.3) и подробно обсуждаются в рамках дисциплины «Физическая электроника и электронные приборы».

Таблица 1.3

**Сравнительная характеристика электрических свойств проводников и полупроводников**

<b>Проводники (металл)</b>	<b>Полупроводники (собственный полупроводник)</b>
<b>1) энергетическая диаграмма</b>	
	
<b>2) характер активации проводимости</b>	
металлический (безактивационный)	полупроводниковый (активационный)
<b>3) температурная зависимость электропроводности</b>	
близкая к линейной $d\sigma/dT < 0$	экспоненциальная $d\sigma/dT > 0$
	
$\rho = 1/\sigma = \rho_0 (1 + \alpha(T - T_0))$	$\sigma = \sigma_0 [\exp(-\Delta E/kT) + \exp(-E_g/kT)]$
<b>4) влияние примесей на электропроводность</b>	
незначительное уменьшение	значительное увеличение (для электроактивной примеси)

Под *электропроводностью* понимают способность вещества (материала) проводить электрический ток за счет наличия подвижных заряженных частиц (носителей заряда).

$$\sigma = en\mu \quad (\text{для электронного проводника}), \quad (1.1)$$

где  $q$  (или  $e$ ) – заряд носителя ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл или кратное этому значению число);  $n$  – концентрация носителей заряда (шт/см<sup>3</sup>, или см<sup>-3</sup>);  $\mu$  – подвижность носителей (см<sup>2</sup>/В·с).

Различают **2** типа электропроводности в зависимости от *вида носителей заряда*: I рода – *электронная* проводимость, которая включает электронную, дырочную и биполярную; II рода – *ионная* проводимость, которая включает катионную, анионную и смешанную.

Удельная электропроводность  $\sigma$  (и обратно пропорциональное ей удельное электросопротивление  $\rho$ ) – количественная мера свойства электропроводности, которая характеризует наклон вольт-амперной характеристики проводящего образца.

Реальные твердотельные материалы чаще являются проводниками I рода. Вместе с тем известен целый ряд твердотельных ионных проводников (II рода), в качестве которых выступают вещества с широкой запрещенной зоной (низкой концентрацией электронов и дырок) и кристаллической структурой, обеспечивающей ионный перенос по материалу (например, наличие вакансий по кислороду в решетке). Ионный перенос сопровождается переносом вещества (массопереносом) в объекте. В реальных материалах сложного состава (например, нестехиометричных оксидных материалах) в воздушной среде при повышенных температурах наблюдается смешанная проводимость, включающая электронную и ионную составляющие.

В зависимости от *характера активации проводимости* в материале различают *металлическую* (безактивационную) и *полупроводниковую* (активационную) проводимость. В первом случае проводящее состояние материала является невозбужденным, т. е. для перехода в это состояние (фактически для генерации носителей заряда) не требуется энергии активации (точнее сказать, не требуется дополнительной энергии сверх имеющейся тепловой энергии частиц при данной температуре твердого тела). Во втором случае для образования носителей заряда необходима некоторая энергия активации, которая может потребляться или за счет тепловой энергии, или при поглощении фотона (то есть кванта света), или за счет других энергетических источников. *Металлический и полупроводниковый характер проводимости* материала можно распознать по виду температурной зависимости электропроводности (или электросопротивления) объекта. Вообще говоря, наличие и характер зависимости электропроводности твердого тела от температуры в соответствии с выражением (1.1) обусловлен влиянием температуры на две величины: концентрацию носителей заряда  $n$  и их подвижность  $\mu$ . Зависимость  $\mu = f(T)$  определяется механизмом рассеяния носителей заряда в решетке. Она аналогично проявляется в металлах и полупроводниках при достаточно высоких (выше комнатной) температурах. Поэтому отличие температурной зависимости  $\rho = f(T)$  или  $\sigma = f(T)$  для металлов и полупроводников обусловлено тем, какая именно зависимость  $\mu = f(T)$  или  $n = f(T)$  доминирует, то есть является более сильной для данного материала.

Для *металлов* при нагревании образца происходит *уменьшение* электропроводности по закону, близкому к *линейному*.

$$\rho = 1/\sigma = \rho_0 (1 + \alpha(T - T_0)), \quad (1.2)$$

где  $\rho_0$  – удельное электросопротивление материала при некоторой начальной температуре  $T_0$ ;  $\alpha$  – температурный коэффициент электросопротивления, равный относительному изменению удельного электросопротивления при изменении температуры на 1 градус (в данном температурном интервале),  $K^{-1}$ ;  $T$  – температура, K.

Зависимость  $\rho = f(T)$  для металлов является достаточно слабой (например, при увеличении температуры алюминия от 20 до 100°C его электросопротивление увеличивается примерно лишь на 40%). Возрастающая зависимость  $\rho = f(T)$  обусловлена доминированием температурной зависимости подвижности  $\mu = f(T)$ , т. к. концентрация носителей заряда в металлах с увеличением температуры почти не изменяется и составляет величину порядка атомной плотности материала ( $n \approx f(T) \approx 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ).

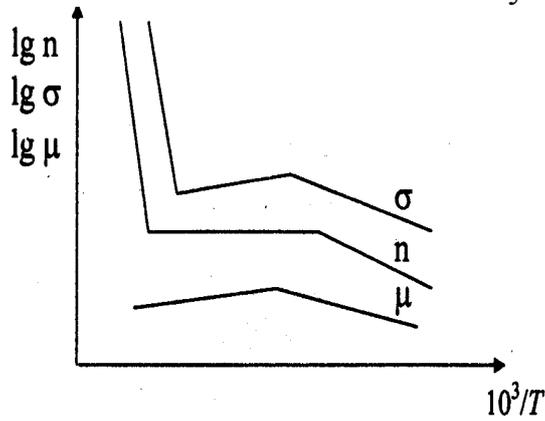


Рис. 1.4 Температурные зависимости концентрации  $n$ , подвижности носителей заряда  $\mu$  и электропроводности  $\sigma$  для примесного полупроводника

В общем случае подвижность носителей заряда с ростом температуры изменяется немонотонно (рис. 1.4). Она *уменьшается*, если рассеяние носителей заряда в основном происходит на *электронейтральных* дефектах решетки (это характерно для повышенных температур), и *увеличивается*, если рассеяние в основном происходит на *заряженных* дефектах (это характерно для пониженных температур). Самым

многочисленным незаряженным дефектом в кристаллической решетке при достаточно высоких температурах является колеблющийся атом (или в металлах – скомпенсированный своими электронами ион). Квант такого теплового колебания называют фононом. В реальных материалах при температурах выше комнатной доминирует именно фононное рассеяние, поскольку концентрация фононов, совпадающая с атомной плотностью материала, значительно больше концентрации примесных и собственных дефектов.

В *полупроводниках* (точнее, невырожденных полупроводниках) с увеличением температуры электропроводность *повышается* по *экспоненциальному* закону (рис. 1.4) в соответствии с выражением

$$\sigma = \sigma_0 [\exp(-\Delta E/kT) + \exp(-E_g/kT)], \quad (1.3)$$

где  $\sigma_0$  – электропроводность материала при низких температурах;  $\Delta E$  и  $E_g$  – энергия ионизации (или глубина залегания) примеси и ширина запрещенной зоны соответственно, Дж (или чаще эВ);  $k$  – постоянная Больцмана, равная  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К (или  $1,38 \cdot 10^{-23} / 1,6 \times 10^{-19}$  эВ/К).

Сильный экспоненциальный характер зависимости  $\sigma = f(T)$  в полупроводниках объясняется значительным увеличением концентрации носителей заряда за счет их тепловой генерации. Такая генерация наиболее интенсивно происходит в определенных температурных интервалах, когда электрон обладает тепловой энергией, достаточной для соответствующих переходов. Так, электропроводность InSb при нагревании от 20 до 100°C

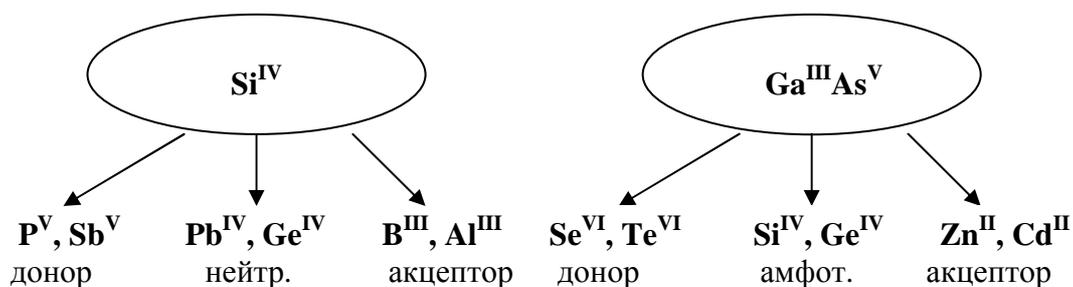
увеличивается примерно в 5 раз, то есть на 400%, а электропроводность Si в этих же условиях уменьшается на несколько десятков процентов за счет уменьшения подвижности носителей заряда при отсутствии их генерации.

Металлы и полупроводники отличаются не только величиной и характером температурной зависимости электропроводности, но и *влиянием примесей*, неизбежно присутствующих в любом реальном материале, на величину удельной электропроводности.

В *металлах* наличие примесей приводит к уменьшению их электропроводности. Это связано с уменьшением подвижности носителей заряда за счет их рассеяния на дефектах решетки при сохранении постоянной концентрации этих носителей. Степень такого уменьшения зависит от природы и содержания примесей. Так, введение в медь 1% серебра увеличивает ее удельное сопротивление приблизительно на 10%, а введение 1% мышьяка – на 300%.

Характер и степень влияния примеси на электропроводность *полупроводника* зависит от типа примеси, которые с этой точки зрения разделяются на *электроактивные*, сильно увеличивающие проводимость, и *электронейтральные*, несильно уменьшающие проводимость (рис.1.5). *Электроактивные* примеси в зависимости типа генерируемого носителя заряда делятся на: *донорные*, *акцепторные* и *амфотерные* (характерны только для сложных полупроводников).

*Донорные* примеси – это примеси, за счет которых в зоне проводимости полупроводника появляются электроны проводимости. Эти примеси обуславливают проводимость *n*-типа (основные носители – отрицательные электроны) в полупроводнике. *Донорными* являются примеси, *валентность* которых *больше*, чем валентность атома полупроводника, замещаемого этой примесью. Примесный электронный *уровень неионизованного донора* заполнен. *Акцепторные* примеси – это примеси, за счет которых в валентной зоне полупроводника появляются дырки. Эти примеси обуславливают проводимость *p*-типа (основные носители – положительные дырки) в полупроводнике. *Акцепторными* являются примеси, *валентность* которых *меньше*, чем валентность атома полупроводника, замещаемого этой примесью. Примесный электронный *уровень неионизованного акцептора* свободен.



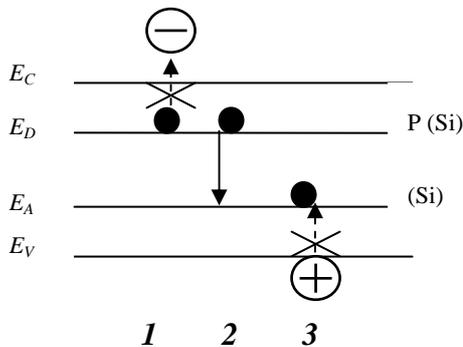
А  
мфо  
терн  
ые  
прим  
еси  
харак  
териз  
уютс  
я

Рис. 1.5. Примеры примесей в простых и сложных полупроводниках

промежуточными значениями электроотрицательности (валентности) и геометрических размеров между атомами, образующими полупроводниковое соединение. Они могут встраиваться в разные положения кристаллической решетки и, соответственно, выполнять разную электронную функцию в полупроводнике (донорную или акцепторную).

Электронейтральными в простых и сложных полупроводниках являются примеси, замещающие атомы совпадающей валентности. Эти примеси уменьшают подвижность носителей заряда аналогично тому, как это происходит в металлах. В результате электросопротивление полупроводника незначительно увеличивается.

В реальных материалах, даже таких высокочистых, как полупроводники для микроэлектронных устройств, присутствуют значительные количества (на уровне  $10^{-5}$  ат. %) целого ряда примесей. Одновременное присутствие донорных и акцепторных примесей приводит к процессу *компенсации* этих примесей в материале. В таком случае вместо генерации носителей (процессы 1 и 3 на рис. 1.6) происходит электронный



1, 3 – генерация носителей;  
2 – компенсация примесей

Рис. 1.6. Схема компенсации донорной и акцепторной примесей в полупроводнике

переход 2 с понижением энергии, в результате которого электрон из одного локализованного состояния ( $E_D$ ) переходит в другое локализованное состояние ( $E_A$ ), т. е. носитель заряда (делокализованная заряженная частица) не образуется.

В зависимости от глубины залегания (энергии ионизации) примеси делятся на *мелкие* и *глубокие* (рис. 1.7). Глубина залегания донорной примеси  $\Delta E_D$  отсчитывается от дна зоны проводимости  $E_C$ , акцепторной примеси  $\Delta E_A$  – от потолка валентной зоны  $E_V$ . Мелкими являются примеси, энергия ионизации которых

меньше либо равна средней тепловой энергии частицы ( $3/2 \cdot 0,025$  эВ при  $T = 300$  К). При комнатной температуре *мелкие примеси ионизованы* в результате перехода 2 (рис. 1.7), а *глубокие – не ионизованы*, то переход 1 не происходит без дополнительного повышения температуры.

Для диэлектриков, обладающих широкой запрещенной зоной и низкой концентрацией носителей заряда, доминирующее значение имеют

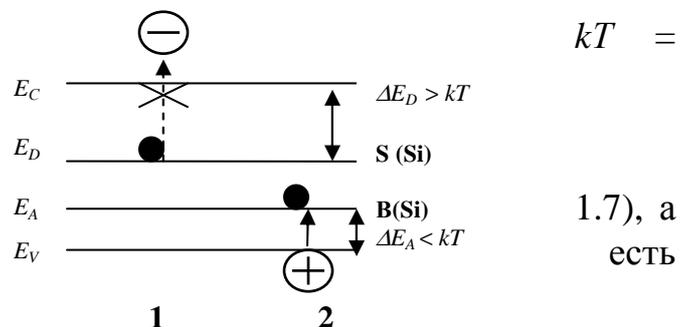


Рис. 1.7. Зонная диаграмма полупроводника, содержащего глубокую донорную и мелкую акцепторную примесь

*поляризационные явления*, которые достаточно подробно изучаются в рамках дисциплины «Физическая химия твердого состояния». Напомним здесь, что различают поляризацию,

1) индуцированную электрическим полем (микроскопическую (электронную, ионную и дипольную) и макроскопическую или миграционную);

2) вызванную неэлектрическим воздействием (*пьезо-, пиро- и фотополяризацию*);

3) существующую без внешних воздействий (*спонтанную и остаточную*).

Основные характеристики диэлектриков количественно характеризуют особенности реализации в данном материале явлений *поляризации, электропроводности, пробоя и диэлектрических потерь*. В соответствии с этим в качестве основных характеристик диэлектрика можно выделить следующие показатели:

– *относительная диэлектрическая проницаемость*  $\epsilon$  (до 15 000), которая количественно характеризует уменьшение силы взаимодействия электрических зарядов в материале по сравнению с вакуумом;

– *удельное электросопротивление* (более  $10^6$  Ом·м);

– *электрическая прочность*, равная отношению напряжения пробоя к толщине диэлектрика (до 1000 МВ/м);

– *тангенс угла диэлектрических потерь*  $\operatorname{tg}\alpha$  (до  $10^{-5}$ ), равный отношению активной и реактивной составляющих полного тока, *добротность*  $Q$ , величина обратная  $\operatorname{tg}\alpha$ , и собственно диэлектрические потери  $P$  (Вт), которые могут быть рассчитаны по выражению:

$$P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg}\alpha, \quad (1.4)$$

где  $U$  – напряжение, приложенное к образцу, В;  $\omega$  – частота переменного электрического сигнала, Гц;  $C$  – электрическая емкость, Ф.

Кроме указанных основных характеристик для специфических эффектов в диэлектрике (например, пьезо- или пироэлектрические эффекты) существуют специальные характеристики, которые обсуждаются в разделах, посвященных соответствующим материалам.