

Лекция № 7

Общая характеристика полупроводников.

Простые полупроводники

Полупроводники – это материалы, электропроводность которых сильно изменяется под действием внешних факторов (температуры, давления, облучения, легирования и других) и имеет активационный характер. С функциональной точки зрения основными характеристиками полупроводника являются:

– особенности и параметры зонной структуры (ширина запрещенной зоны E_g , дрейфовая подвижности носителей заряда μ , глубина залегания примесных уровней ΔE и их тип);

– оптические свойства (коэффициент поглощения, показатель преломления, спектральные характеристики).

В целом *ширина запрещенной зоны* практически используемых полупроводников имеет значения от 0,2 эВ (InSb) до 3,39 эВ (GaN). Она определяет максимальную *рабочую температуру* и максимальное *обратное напряжение* микроэлектронных приборов, а также рабочий *спектральный диапазон* оптоэлектронных приборов. *Подвижность носителей заряда* в полупроводниках на несколько порядков больше, чем в металлах. Она варьируется от 190 см²/В·с (GaP) до 80 000 см²/В·с (InSb) и определяет *быстродействие*, а следовательно допустимую частоту рабочего электрического сигнала.

Общим свойством полупроводников является их высокая *хрупкость*, низкая пластичность и средняя прочность, что приводит к значительным потерям на бой при производстве приборов. А низкая *теплопроводность* этих материалов создает проблемы с отводом тепла при эксплуатации электронных устройств, особенно при больших токовых нагрузках. Температура плавления полупроводников варьируется от 525 °С (InSb) до 1700 °С (GaP). Она во многом определяет технологические особенности получения и обработки материалов. Интенсивное поглощение и испускание фотонов за счет межуровневых электронных переходов позволяет создавать на полупроводниках (особенно на прямозонных) целый ряд оптоэлектронных приборов. Показатель преломления этих материалов составляет величину 2÷3.

Для полупроводников характерна ковалентная или ионно-ковалентная связь с невысокой долей ионности до 30 % и валентность, равная 4. Эти материалы обладают достаточно высокой химической и термической стойкостью, что вызывает необходимость использования агрессивных растворов и высоких температур при их обработке.

Переходя к характеристике простых неорганических полупроводников (см. классификацию рис. 2.1.), можно отметить, что из всех простых веществ 12 проявляют полупроводниковые свойства при определенных условиях.

период	группа	III	IV	V	VI	VII
--------	--------	-----	----	---	----	-----

2	B	C		
3		Si	P	S
4		Ge	As	Se
5		Sn	Sb	Te
				I

Рис. 2.3. Фрагмент периодической таблицы элементов Д.И.Менделеева

П
рактич
еское

применение полупроводников началось с германия, который ввиду пониженной температуры плавления оказался более технологичным материалом для решения задачи получения монокристаллов высокого качества для полупроводниковых приборов. Сравнение свойств кремния и германия (табл. 2.3.) позволяет отметить, что эти материалы являются *изоструктурными* и образуют в двойной системе непрерывный ряд твердых растворов, что используется в современных приборах на гетеропереходах. Важно, что кремний имеет более низкие (в 2 раза) плотность и коэффициент термического расширения, а также более высокую теплопроводность, чем германий.

Таблица 2.3

Сравнительная характеристика кремния, германия и арсенида галлия

Название характеристик	Ge	Si	GaAs
1	2	3	4
1. Структурные особенности			
Сингония	кубическая	кубическая	кубическая
Тип структуры	алмаз	алмаз	сфалерит
Период решетки, нм	0,5657	0,5430	0,5653
Атомная плотность, см ⁻³	4,42·10 ²²	5·10 ²²	4,43·10 ²²
Плотность, г/см ³			
кристалла	5,33	2,33	5,32
расплава	5,62	2,53	5,71
2. Физические свойства			
Температура плавления, °С	937	1417±4	1238±2
Теплоемкость, Дж/моль·К	22,8	19,5	22,9
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	58	109	54
Температурный коэффициент линейного расширения, К ⁻¹	5,75·10 ⁻⁶	2,33·10⁻⁶	6,4·10 ⁻⁶
Давление паров в точке плавления, Па	13,3	0,665	1,01·10 ⁵ (As)
Структура энергетических зон	непрямозонный	непрямозонный	прямозонный
Ширина запрещенной зоны, эВ (T = 300 К)	0,66	1,1	1,43
Подвижность носителей заряда, см ² /В·с			
электронов	3900	1450	10 500
дырок	1900	480	430

Относительная диэлектрическая проницаемость	16,0	12,5	13,1
Показатель преломления	4,00	3,44	3,65
Работа выхода электрона, эВ	4,78	4,8	4,69
3. Химические свойства			
Характер связи	ковалентная	ковалентная	Ионно-ковалентная (степень ионности 12 %)
Валентность	4 ковал.	4 ковал.	4 (3 ковал. + 1 дон.-акц.)
Химическая растворимость	NaOH, HF+HNO ₃	NaOH, HF+HNO ₃	HCl+HNO ₃ , H ₂ O ₂ +H ₃ PO ₄

Окончание таблицы 2.3

1	2	3	4
Температура начала окисления, °С	500 (дефектная смесь GeO+GeO ₂)	600 (качественный оксид SiO ₂)	450 (дефектный оксид Ga _x As _y O _z)
Применение			
Виды полупроводниковых приборов	дискретные диоды, транзисторы, интегральные схемы, работающие на низких и средних частотах, фотодиоды, фотоэлементы.	туннельные и СВЧ-диоды, приборы на гетероструктурах Ge/Si, датчики Холла, оптика ИК-диапазона.	СВЧ-диоды, транзисторы и интегральные схемы, лазеры, светодиоды, фотоэлементы, фотодиоды
Примеры промышленных марок			
Обозначение	ГЭ 1463 ¹	КДБ-10-1в (111) ²	АГЧТ-1-50А-1 ³
Активные примеси доноры акцепторы	Sb Ga	P, Sb B	Sn, Te Zn

¹Г – германий; Э – электронный; 14 – номинал электросопротивления, Ом·см; б - группа по разбросу сопротивления между торцами ±20 %; 3 – подгруппа по плотности дислокаций 2·10⁴шт/см².

²К – кремний; Д – дырочный; Б – легированный бором; 10 – номинал электросопротивления, Ом·см; 1 - группа по разбросу сопротивления между торцами ±25 %; в - подгруппа по диаметру слитка 100 мм; (111) – кристаллографическая ориентация торцевого среза.

³АГ – арсенид галлия; Ч – выращенный методом Чохральского; Т – легированный теллуром; 1 – марка по концентрации и подвижности носителей заряда 5·10¹⁶±8·10¹⁸ см⁻³ и 2000±4000 см²/В·с; 50 – номинальный диаметр, мм; А - подгруппа по плотности дислокаций <3·10⁴шт/см²; 1 – индекс отклонения концентрации носителей от номинального значения 80 %.

Достоинством исторически первого промышленного полупроводника германия остается пониженная температура плавления и повышенная подвижности носителей заряда. Однако в настоящее время доминирующим материалом микроэлектроники является более тугоплавкий кремний, важнейшими достоинствами которого являются его широкозонность ($E_g = 1,1$ эВ), доступность сырья (в виде кварцевого песка), хорошее качество и технологичность как монокристаллического кремния, так и его собственного диэлектрического оксида SiO_2 , химическая и термическая стойкость. Кроме того освоение технологии выращивания кристаллов диаметром 200 и 300 мм с использованием метода Чохральского (вытягивание из собственных расплавов) позволило значительно повысить рентабельность технологии производства микроэлектронных приборов и интегральных схем. Следует отметить, что кремний используется не только в виде монокристаллических объектов, но и в виде поликристаллических (затворы МОП-транзисторов) и аморфных (фотоэлементы) пленок, что значительно упрощает технологию получения полупроводника.