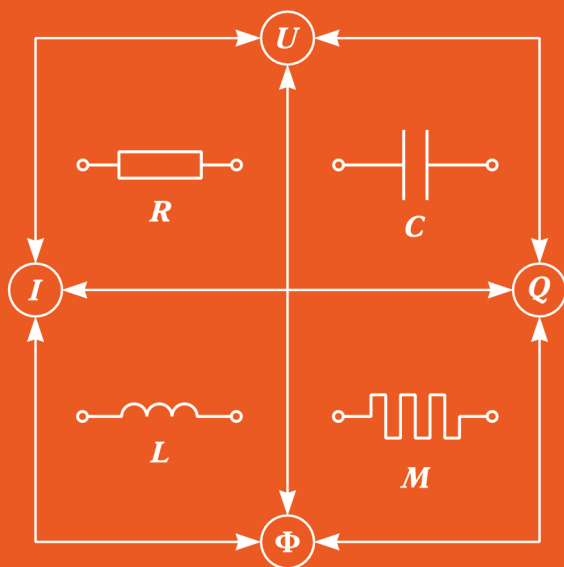


ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТОВ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР



ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТОВ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР

Рекомендовано

*Учебно-методическим объединением
по естественно-научному образованию
в качестве пособия для студентов
учреждений высшего образования,
обучающихся по специальностям
«компьютерная физика», «прикладная физика»,
«фундаментальная физика», «ядерная физика»*

УДК 537.311.322(075.8)
ББК 22.379я73-1
Ф50

Авторы:
Н. А. Поклонский,
С. А. Вырко,
Н. Н. Хиеу (N. N. Hieu),
Н. И. Горбачук

Рецензенты:
доктор физико-математических наук *А. П. Сайко*;
доктор физико-математических наук, профессор *В. Н. Кушнир*

Ф50 **Физика** элементов приборных структур : пособие / Н. А. Поклонский и [др.]. – Минск : БГУ, 2024. – 215 с. : ил.
ISBN 978-985-881-591-2.

Дано краткое описание равновесных свойств квазичастиц в трехмерных, двумерных и одномерных системах в конденсированном состоянии. Приводится статистика заполнения электронами и дырками уровней энергии в одиночных и консолидированных полупроводниковых системах различной размерности и их упорядоченности. Рассмотрены элементарные электромагнитные процессы в диэлектриках, полупроводниках, нормальных металлах и сверхпроводниках, а также в элементах приборных структур на их основе.

Предназначено для студентов учреждений высшего образования, обучающихся по специальностям «компьютерная физика», «прикладная физика», «фундаментальная физика», «ядерная физика и технологии».

УДК 537.311.322(075.8)
ББК 22.379я73-1

ISBN 978-985-881-591-2

© БГУ, 2024

Содержание

Фундаментальные физические постоянные	5
Предисловие	6
Тема 1. Конденсированные неупорядоченные системы: физика и применение	7
Тема 2. Делокализация электронов и дырок в легированных полупроводниках. Электропроводность на постоянном токе	16
Тема 3. Взаимодействие электронов и атомов примесей в кристаллических материалах	24
Тема 4. Электрическая проводимость полупроводников на переменном токе	30
Тема 5. Поглощение электромагнитного излучения электронами и дырками в 3D кристаллических полупроводниках	39
Тема 6. Прыжковая миграция электронов по неподвижным примесям в полупроводниках	53
Тема 7. Термоэлектронная эмиссия. Электрический ток, ограниченный объемным зарядом, в вакуумном диоде	60
Тема 8. Токи, ограниченные инжектированным зарядом электронов, в кристаллических полупроводниках	71
Тема 9. Точечные дефекты в приборных барьерных структурах. Дислокации в кристаллах. Поверхностные таммовские состояния	79
Тема 10. Одноэлектронные состояния в квантоворазмерных кристаллических пленках и нитях	90
Тема 11. Полупроводниковые сверхрешетки и одиночные квантовые ямы	102
Тема 12. Туннелирование электромагнитных волн и электронов сквозь барьеры	109
Тема 13. Сканирующий вакуумный туннельный микроскоп	119
Тема 14. Эффекты Холла	124
Тема 15. Сверхпроводимость твердых тел	136
Тема 16. Плотность сверхпроводящего тока: лондоновское приближение	145
Тема 17. Эффекты Джозефсона	154
Приложение 1. Некоторые аспекты равновесной термодинамики	159
Приложение 2. Спиновые явления	163

Приложение 3. Элементарная квантовая механика системы из двух водородоподобных доноров в кристаллической матрице	170
Приложение 4. Уровни энергии поперечного движения электрона в несимметричной 2D-яме конечной глубины	176
Приложение 5. Элементы теории очередей	179
Приложение 6. Поляризация и намагничивание материалов	182
Приложение 7. Электрические и магнитные цепи	185
Заключение	196
Глоссарий	199
Список литературы	213

Фундаментальные физические постоянные

$1 \text{ а.е.м.} = 1,661 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ — атомная единица массы
 $a_H = 5,292 \cdot 10^{-2} \text{ нм}$ — боровский радиус
 $c = 299\,792\,458 \text{ м/с}$ — скорость света в вакууме
 $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ — элементарный электрический заряд
 $g_L = 2,0023$ — g -фактор Ланде электрона в вакууме
 $\hbar = h/2\pi = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$ — приведенная постоянная Планка
 $h/e^2 = 25\,812,8 \text{ Ом}$ — постоянная в квантовом эффекте Холла
 $k_B = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ — постоянная Больцмана
 $k_B/e \approx 86 \text{ мВ/К}$; $k_B T \approx 25,85 \text{ мэВ}$ при температуре $T = 300 \text{ К}$
 $m_0 = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ — масса электрона в вакууме
 $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ — постоянная Авогадро
 $\mu_0 = 1,257 \text{ мкГн/м}$ — магнитная постоянная
 $\mu_B = 9,274 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$ — магнетон Бора
 $\epsilon_0 = 8,854 \text{ пФ/м}$ — электрическая постоянная
 $2e/h = 4,836 \cdot 10^{14} \text{ Гц/В}$ — постоянная в эффекте Джозефсона

Соотношения между единицами физических величин

Длина волны в вакууме:

$\lambda_{ph} (\text{мкм}) = 1,239/E_{ph} (\text{эВ})$ для фотона с энергией E_{ph} ,

$\lambda_e (\text{нм}) = 1,226/\sqrt{E_e (\text{эВ})}$ для электрона с энергией E_e ,

$\lambda_n (\text{нм}) = 0,9/\sqrt{E_n (\text{эВ})}$ для нейтрона с энергией E_n .

Энергия $E = 1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ соответствует:

температуре $T = E/k_B \approx 1,160 \cdot 10^4 \text{ К}$,

угловой частоте $\omega = E/\hbar \approx 1,519 \cdot 10^{15} \text{ рад/с}$,

частоте колебаний $\omega/2\pi \approx 2,418 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$.

$1 \text{ эВ/частица} = 96,49 \text{ кДж/моль} = 23,06 \text{ ккал/моль}$.

Символы

$\%$ = ps = 10^{-2} ; pm = 10^{-3} ; ppm = 10^{-6} ; ppb = 10^{-9}

$\approx$ — приближенно равно

$\sim$ — оценка по порядку величины; сопоставление величин одного порядка и размерности

$\propto$ — пропорционально

$\bar{X}$, $\langle X \rangle$ — среднее значение случайной величины X

? — универсальный ключ к любой проблеме

Предисловие

Цели предлагаемого пособия следующие:

1) дать необходимый минимум сведений по теории трехмерных (3D) материалов и низкоразмерных — двумерных (2D) и одномерных (1D) — конденсированных систем для самостоятельной работы в области исследований функциональных элементов приборных структур электроники и/или в промышленности;

2) научить пользоваться полученными знаниями для проведения конкретных расчетов наблюдаемых величин с использованием модельных представлений об атомно-молекулярном строении веществ.

В пособии рассматриваются равновесные свойства квазичастиц (электроны, дырки, фононы и фотоны) в 3D-, 2D- и 1D-образцах, а также вопросы миграции квазичастиц, важные для расчета параметров полупроводниковых приборов.

В конце издания приведены глоссарий и список литературы для углубления знаний в области конденсированных систем и приборов на их основе. Дополнительный материал представлен в приложениях 1–7.

Замечания начинаются знаком #, заканчиваются знаком ☒. Обозначения физических величин согласованы с обозначениями, используемыми в литературе по физике и технике полупроводников.

Представленный в пособии материал основан на лекциях, которые читались Н. А. Поклонским в течение одного семестра на кафедре физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета Белорусского государственного университета.

Деятельное участие С. А. Вырко, Н. Н. Хиеу (Nguyen Ngoc Hieu) и Н. И. Горбачука при написании учебного издания улучшило как его содержание, так и форму подачи материала.

*член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси,
профессор Н. А. Поклонский*

ТЕМА 1. КОНДЕНСИРОВАННЫЕ НЕУПОРЯДОЧЕННЫЕ СИСТЕМЫ: ФИЗИКА И ПРИМЕНЕНИЕ

Свойства веществ в конденсированном состоянии определяются типом составляющих их атомов, расположением атомов в пространстве и химическими связями между ними.

Для изготовления активных (функциональных) элементов опто- и микроэлектроники применяют поликристаллические и аморфные материалы. Существенным достоинством аморфных полупроводников является их относительная простота изготовления (формирования, синтеза), возможность микроминиатюризации. К тому же они обладают высокой радиационной стойкостью по сравнению с кристаллами того же химического состава.

1.1. Классификация материалов в неупорядоченном состоянии

Схематическое изображение электронного терма показано на рис. 1.1. В бистабильных системах переход из точки A в точку C требует преодоления энергетического барьера $\mathcal{E}_*$ и является термически и/или оптически активационным процессом. В свеженапыленных халькогенидных пленках может образоваться значительное число дефектов (точка B). В результате термообработки происходит переход из B в A (рис. 1.1, a). Кристаллизация аморфного кремния (переход из точки A в точку C) представлена на рис. 1.1, b . Нестабильное аморфное состояние селена представлено на рис. 1.1, $в$.

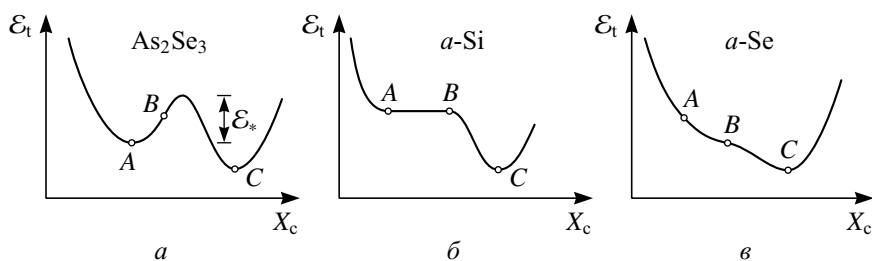


Рис. 1.1. Зависимость полной энергии $\mathcal{E}_t$ конденсированной системы от конфигурационной координаты X_c : a — бистабильное (стеклообразное) состояние материала; b — квазистабильное (аморфное); $в$ — нестабильное аморфное

Метод конфигурационных кривых: задача о движении N частиц рассматривается как задача о движении одной частицы вдоль траектории (по условной «координате» X_c) в $3N$ -мерном пространстве — пространстве конфигураций. Для локального дефекта структуры материала число N равно числу частиц «медленной» подсистемы дефекта, т. е. числу ионных остовов, или ядер атомов. Размерность конфигурационного пространства в отсутствие поступательных и вращательных степеней свободы дефекта как целого равна $3N - 6$.

Увеличение энтропии веществ при переходе их от упорядоченного расположения атомов (кристалл) к разупорядоченному расположению атомов (газ) схематично представлено на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Увеличение энтропии вещества при увеличении степени (меры) разупорядочения в расположении атомов

1.2. Стеклообразные материалы

Стекло принято отождествлять с аморфным твердым телом, которое получено в виде массивного (объемного) образца в процессе быстрого охлаждения расплава до некоторой температуры стеклования T_g , меньшей температуры кристаллизации T_c (обычно $T_g \approx 2T_c/3$). Поскольку при $T < T_c$ кристалл термодинамически стабилен, стекло, существующее при $T < T_g$, является неравновесной метастабильной конденсированной системой, время жизни которой, однако, макроскопически велико. В огромном разнообразии стекол выделяют три основных класса по энергетической ширине $\mathcal{E}_{\text{opt}}$ их оптической щели

(полоса пропускания света): 1) диэлектрические стекла, в том числе оксидные (α - SiO_2) с более или менее значительной долей ионной связи и очень большими $\mathcal{E}_{\text{opt}} \approx 5\text{--}10$ эВ; 2) стеклообразные полупроводники, в том числе халькогенидные, с преимущественно ковалентной связью и умеренными $\mathcal{E}_{\text{opt}} \approx 1\text{--}3$ эВ; 3) металлические стекла (оптическая щель отсутствует).

Спиновые стекла — разновидность неупорядоченных материалов, в которых энергия обменного взаимодействия спиновых магнитных моментов электронов пары соседних атомов меняет случайно в пространстве и во времени не только величину, но и знак. Энергия обменного взаимодействия электронов — дополнительный вклад в кулоновскую энергию взаимодействия электронов, обусловленный их неразличимостью. Спиновым стеклом является, например, металлический сплав $\text{Au}_{1-\delta}\text{Fe}_\delta$, где $\delta \approx 0,1$ — доля магнитных атомов железа в немагнитной матрице золота. В зависимости от расстояния между двумя атомами Fe обменное взаимодействие их электронов может быть как ферромагнитным ($\uparrow\uparrow$), так и антиферромагнитным ($\downarrow\uparrow$) (направление стрелки обозначает направление магнитного момента (спина) электрона). В таких сплавах с конкурирующими ($\uparrow\uparrow$) и ($\downarrow\uparrow$) обменными взаимодействиями в отличие от ферромагнитных металлов (Fe, Co и Ni) при охлаждении не возникает дальнего магнитного порядка. При этом, однако, не происходит и «замораживания» ориентации спинов электронов. Так как энергия обменного взаимодействия в спиновом стекле зависит от доли магнитных и немагнитных атомов и их расположения, то возникают связи между спинами неоптимальные по энергии. Эти несогласованные связи не могут одновременно удовлетворять условию минимума энергии всей неупорядоченной совокупности спиновых магнитных моментов электронов. Из-за этого спиновое стекло является системой с большим числом близких по энергии метастабильных квантовых состояний.

1.3. Типы беспорядка в кристаллах и материалах в неупорядоченном состоянии

Схематично атомный беспорядок в различных конденсированных системах (материалах) показан на рис. 1.3.

Ближний порядок в размещении атомов во многом определяет (согласно А. Иоффе; 1951 г.) электрическую проводимость полупроводниковых материалов на постоянном токе. Зависимости плотности од-

ноэлектронных состояний $g(\mathcal{E})$ от энергии электрона $\mathcal{E}$ в кристаллах (*а*) и аморфных твердых телах (*б*, *в*) представлены на рис. 1.4. На рис. 1.4, *б* изображена модель с размытыми краями зон разрешенных энергий, на рис. 1.4, *в* — модель для *a*-Si, которая включает акцептороподобные $|a\rangle$ и донороподобные $|d\rangle$ локализованные состояния в щели подвижности, равной $\mathcal{E}_\mu^{(c)} - \mathcal{E}_\mu^{(v)} > 0$, т. е. разности уровней протекания (или порогов подвижности) для электронов *c*-зоны ($\mathcal{E}_\mu^{(c)}$) и дырок *v*-зоны ($\mathcal{E}_\mu^{(v)}$).

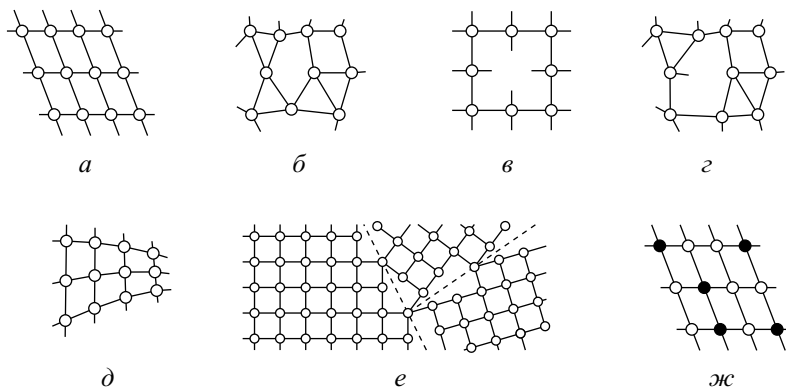


Рис. 1.3. Типы беспорядка в кристаллических и неупорядоченных материалах: *а* — дальний порядок; *б* — отсутствие дальнего порядка (сохраняется длина химических связей и число ближайших соседей); *в* — вакансии в *c*-Si; *г* — одиночная «болтающаяся» связь в *a*-Si; *д* — топологически упорядоченная структура без дальнего порядка; *е* — кластерный беспорядок, поликристалл; *жс* — композиционный беспорядок; случайные вариации химического состава в кристаллических соединениях

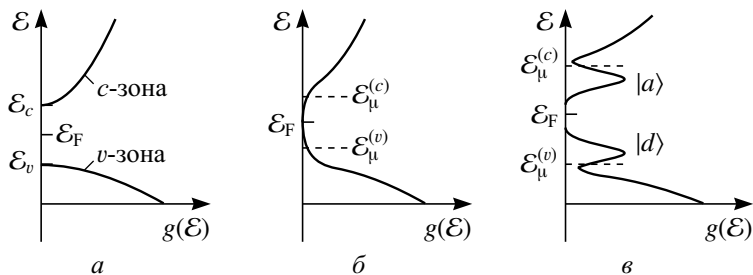


Рис. 1.4. Энергетические зонные диаграммы кристаллических (*а*) и аморфных (*б*, *в*) материалов: $\mathcal{E}_F$ — уровень Ферми; $\mathcal{E}_c$ — дно *c*-зоны; $\mathcal{E}_v$ — потолок *v*-зоны

Приведем примеры сравнения кинетической энергии атомов или молекул вещества с энергией их взаимодействия для определения его агрегатного состояния. Дело в том, что и плавление, и кипение определяются термодинамическим потенциалом Гиббса $G = H - TS$, где $H = E + PV$ — энтальпия, E — внутренняя энергия, P — давление, V — объем системы, T — абсолютная температура, S — энтропия. Следовательно, энтропийное слагаемое играет определяющую роль, наряду с энергией (прил. 1). Например, в бинарных сплавах именно энтропийный фактор приводит к существенному понижению температуры плавления сплава по сравнению с температурами плавления его компонент.

Рассмотрим железо — атомарное вещество. Его температура плавления $T_m = 1811 \text{ K} = 1538^\circ\text{C}$, что соответствует кинетической энергии $\approx 3k_B T_m/2 = 0,23 \text{ эВ/атом}$, где k_B — постоянная Больцмана. Его температура кипения $T_b = 3145 \text{ K} = 2872^\circ\text{C}$, что соответствует кинетической энергии $\approx 0,41 \text{ эВ/атом}$. Так как энтальпия сублимации железа составляет 350 кДж/моль , что равно $3,6 \text{ эВ/атом}$, а эта величина и говорит об энергии взаимодействия атомов железа в твердом агрегатном состоянии, то при температуре плавления и кипения кинетическая энергия атома много меньше энергии взаимодействия. Таким образом, и в твердом состоянии (до плавления), и в жидком состоянии (до кипения) кинетическая энергия атомов много меньше энергии их взаимодействия. Ионизация атомов происходит, если их средняя кинетическая энергия сопоставима с энергией ионизации, а не с энергией взаимодействия. Энергия ионизации одиночного атома железа (его потенциал ионизации) равна $7,87 \text{ эВ}$. Расчеты и эксперимент показывают, что существенная ионизация имеет место, если средняя кинетическая энергия составляет около 10–15 % от энергии ионизации, т. е. имеем плазму. Если средняя кинетическая энергия атомов Fe больше первого потенциала ионизации, но меньше второго, то нейтральных атомов Fe не будет, а будут только ионы в зарядовом состоянии (+1) в единицах элементарного заряда e и некоторое количество ионов в зарядовом состоянии (+2). Заключаем, что непосредственно сравнивать среднюю кинетическую энергию молекул вещества с энергией их взаимодействия для построения критериев твердого, жидкого и газообразного агрегатных состояний, а также плазмы некорректно.

Рассмотрим молекулярный кристалл йода, состоящий из молекул I_2 . Его температура плавления составляет $T_m = 386,8 \text{ K} = 113,6^\circ\text{C}$, что соответствует кинетической энергии $\approx 3k_B T/2 = 0,05 \text{ эВ/молекула}$. Тем-

температура кипения йода $T_b = 184,35^\circ\text{C} = 457,5\text{ K}$, что соответствует кинетической энергии $\approx 0,06\text{ эВ/молекула}$. Энтальпия сублимации молекулярного кристалла йода $H = 41,8\text{ кДж/моль}$, что равно $0,43\text{ эВ/молекула}$. Эта величина и говорит об энергии взаимодействия молекул йода в твердом агрегатном состоянии. Заключаем, что при температуре плавления и кипения кинетическая энергия атома в семь-восемь раз меньше энергии взаимодействия. В итоге и в твердом состоянии (до плавления), и в жидком состоянии (до кипения) кинетическая энергия молекул I_2 много меньше энергии взаимодействия молекул I_2 .

1.4. Приборы на аморфных полупроводниках

Непериодические, или аморфные, твердые тела образуют класс материалов с большим разнообразием физических и химических свойств, чем кристаллы того же химического состава. Более того, их изготовление (синтез, формирование) обычно не требует тщательно контролируемых методов выращивания, что во многих случаях дает существенное экономическое преимущество. Обычно аморфные твердые тела формируют (приготавливают) в виде стекол путем быстрого охлаждения вещества, находящегося в жидком агрегатном состоянии. Еще больший диапазон составов может быть получен в виде тонких пленок путем осаждения паров на холодную подложку (инженерную поверхность). Аморфные твердые тела могут быть диэлектриками, полупроводниками и металлами, а в некоторых случаях, при очень низких температурах, и сверхпроводниками.

1.4.1. Электрофотография

Электрофотография, или ксерография («сухое письмо»), — процесс, в котором используются фотопроводящие свойства селенового стекла ($a\text{-Se}$); изобретен Ч. Карлсоном (1938 г.).

Схема ксерографического процесса представлена на рис. 1.5, где свет, отраженный от документа, генерирует электронно-дырочные пары в селеновом стекле:

а) коронирующий электрод (положительный потенциал $\approx 3\text{ кВ}$ относительно заземленной подложки), движущийся в воздухе параллельно поверхности слоя аморфного селена ($a\text{-Se}$), заряжает поверхность последнего положительно (+). При этом на металлической подложке с нанесенным селеновым стеклом образуется отрицательный заряд (–);

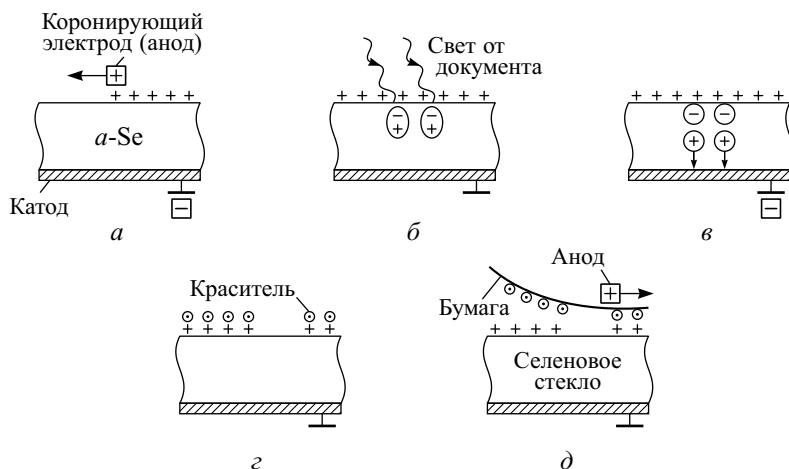


Рис. 1.5. Схема реализации ксерографического процесса получения бумажных копий документа

б) на слой a -Se проецируется изображение копируемого документа. Фотоны, отраженные от светлых областей оригинала, поглощаются стеклом. Энергия фотонов должна быть такой, чтобы электронно-дырочные пары создавались только вблизи верхней поверхности селенового стекла;

в) под действием достаточно сильного электрического поля внутри селенового стекла дырки (электронные вакансии, $\oplus$) дрейфуют по направлению к металлической подложке, а электроны ($\ominus$) — в противоположном направлении и нейтрализуют положительный заряд, созданный на поверхности a -Se. В результате верхняя поверхность стекла становится электронейтральной там, где на оригинале была светлая область, и остается положительно заряженной там, где на оригинале была буква (темная область);

г) на слой a -Se наносятся электрически нейтральные частицы красителя (сажа, диспергированная в легкоплавкой смоле), которые поляризуются и прилипают к положительно заряженным участкам поверхности слоя;

д) с помощью второго коронного разряда краситель переполаризуется и переносится с поверхности слоя a -Se на положительно заряженный лист бумаги. Затем бумагу убирают и полученное на ней изображение закрепляют с помощью нагревания. После получения нескольких копий остаточные заряды нейтрализуют.

1.4.2. Переключатели Овшинского

В простейшем варианте пороговые электрические переключатели состоят из осажденной пленки халькогенидного стекла (As_2Se_3) толщиной ≈ 1 мкм с электродами из молибдена или графита с обеих сторон. Переключение в высокопроводящее состояние происходит при увеличении приложенного к пленке напряжения (разности электрических потенциалов), и обратно — когда ток, проходящий через нее, падает ниже критического значения (рис. 1.6, *а*).

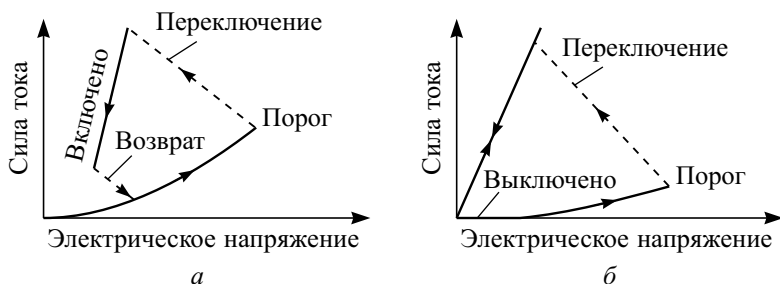


Рис. 1.6. Типичные вольт-амперные характеристики электрических переключателей Овшинского двух типов:

а — без запоминания электропроводящего состояния;

б — с запоминанием проводящего состояния

В переключателе проводящее состояние достигается только тогда, когда все присутствующие в стекле положительно и отрицательно заряженные ловушки заполнятся возбужденными (инжектированными) приложенным электрическим полем электронами и/или дырками. Заполнение ловушек приводит к резкому увеличению времени жизни инжектированных носителей тока (заряда). Если раньше оно было много меньше времени, за которое носители заряда успевают пересечь всю толщину пленки, то после заполнения ловушек оно становится много больше этого времени. Вольт-амперная диаграмма переключателя, в котором проводящее состояние сохраняется даже после снятия порогового электрического напряжения, показана на рис. 1.6, *б*. Непроводящее состояние может быть восстановлено только пропусканием большого импульса тока. Стеклообразные полупроводниковые материалы, используемые для создания переключателей с запоминанием, обладают свойством под действием внешнего порогового электрического поля формировать внутри себя нити и/или кластеры с металлическим типом электрической проводимости (на постоянном токе).

#1.1. Условная схема классификации упорядоченных, частично разупорядоченных и неупорядоченных конденсированных систем в твердом и жидком агрегатных состояниях в зависимости от видов нарушений их структуры (строения) приведена на диаграмме (рис. 1.7).

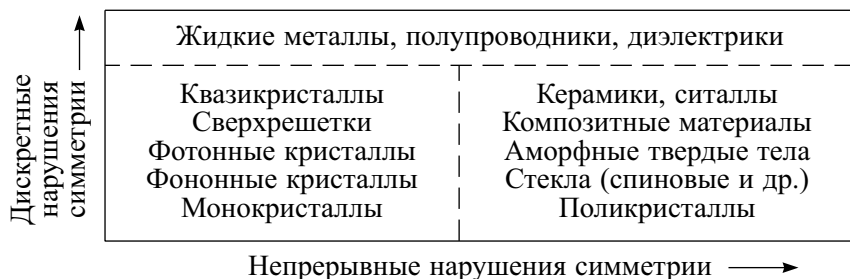


Рис. 1.7. Классификация конденсированных систем в различных агрегатных состояниях по типам нарушений их симметрии

Именно нарушения симметрии, строения, структуры, обуславливают пригодность материала для термоэлектрического преобразования энергии при сочетании зонной (по состояниям c - и v -зон) и прыжковой миграции электронов между дефектами структуры как в однородно разупорядоченных полупроводниках, так и в элементах приборных структур на их основе. ☒

#1.2. *Квазикристаллы* наблюдались (Д. Шехтман; 1984 г.) в опытах по дифракции медленных электронов на быстроохлажденном сплаве алюминия с магнием. Картина дифракции содержала типичные для трехмерных кристаллов резкие (брэгговские) пики, но в целом имела точечную симметрию икосаэдра, невозможную в трехмерной кристаллической структуре. Эксперимент изначально объяснялся дифракцией на множественных кристаллических двойниках, сросшихся в зерна с икосаэдрической симметрией. Однако вскоре было доказано, что эта симметрия присутствует на всех масштабах, вплоть до молекулярного. Известны также *аперидические кристаллы*, например кристалл дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК), в котором последовательность пар оснований нерегулярна, так же как нерегулярна последовательность букв в осмысленном предложении (Э. Шрёдингер; 1944 г.). ДНК состоит из четырех нуклеотидов: А (аденин), Т (тимин), Г (гуанин) и Ц (цитозин). В нитях ДНК эти нуклеотиды соединены в длинные цепочки, и закодированная генетическая информация выглядит примерно так: ААТГЦГТААГЦЦ... и т. д. ☒