

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»

Ю.А. Брусенцов, А.М. Минаев, И.С. Филатов

МАТЕРИАЛЫ ТВЁРДОТЕЛЬНОЙ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

*Рекомендовано Учебно-методическим советом в качестве
учебного пособия для магистрантов, обучающихся по направлению
210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств»*



Тамбов
Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
2012

УДК 621.38:620.22-022.532(075.8)
ББК Ж601я73
Б892

Рецензенты:

Доктор физико-математических наук,
профессор ФГБОУ ВПО «ТГУ им. Г.Р. Державина»
В.А. Фёдоров

Кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
А.М. Савельев

Брусенцов, Ю.А.

Б892 Материалы твёрдотельной микро- и наноэлектроники : учебное пособие / Ю.А. Брусенцов, А.М. Минаев, И.С. Филатов. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-1087-2.

Учебное пособие посвящено материалам, применяемым в микро- и наноэлектронике. Рассмотрены типы химической связи, структура и свойства полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$ и $A_2^VB_3^VI$. Представлены типы основных магнитных оксидных материалов, применяемых в микро- и наноэлектронике, основы теории перехода материалов в жидкокристаллическое состояние, используемое для создания цифровых и буквенных индикаторов.

Предназначено для магистрантов и аспирантов, специализирующихся в области радиотехники, автоматики и телемеханики.

УДК 621.38:620.22-022.532(075.8)
ББК Ж601я73

ISBN 978-5-8265-1087-2

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2012

ВВЕДЕНИЕ

Твёрдотельная микро- и нанoeлектроника – наука об электронных процессах в твёрдых телах, практическим применением которой являются устройства, управляющие электронными потоками – полупроводниковые приборы и микросхемы. Электронные потоки в полупроводниковых устройствах являются материальными носителями информации и энергии.

Эти устройства можно разделить на информационные и силовые. Назначение информационных устройств – преобразование и хранение информации. Поэтому во время работы они должны прежде всего исключать потери информации. Основное назначение силовой электроники – преобразование энергетических потоков, поэтому при проектировании и применении таких устройств стремятся снизить энергетические потери.

Однако, несмотря на значительные различия в подходах при создании изделий этих двух классов, для управления ими используются одни и те же принципы, реализованные в базовых полупроводниковых приборах (элементах).

В настоящее время число наименований материалов, применяемых в электронной технике для различных целей, составляет несколько тысяч.

Использование материалов предполагает определённый выбор, а для этого необходимо знать свойства материалов или определять их экспериментально.

Как правило, при решении инженерных задач требуется искать компромиссное решение, используя весь комплекс свойств материалов.

Наибольшую долю во всей массе материалов, применяемых в твёрдотельной микро- и нанoeлектронике, составляют материалы на основе чистых металлов и сплавов, а также простые и сложные полупроводниковые соединения.

Особая роль в создании материалов микро- и нанoeлектроники принадлежит технологии получения новых наноструктурированных полупроводниковых изделий (нанодиоды, нанотранзисторы и др.)

1. ФЕРРИТЫ

1.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И КЛАССИФИКАЦИЯ ФЕРРИТОВ

Ферриты являются неметаллическими магнитными материалами. Их состав в общем случае может быть выражен формулой $(M_2^{k+} O_k^{2-})_{m/2} (Fe_2^{3+} O_3^{2-})_n$, где М – характеризующий металл; k – валентность; m и n – целые числа.

Название феррита определяется характеризующим ионом металла. Так, если М – ион никеля, то феррит называется никелевым, если марганца – марганцевым и т.д. По количеству входящих в состав ферритов характеризующих окислов различают моноферриты, биферриты и полиферриты.

Из моноферритов только цинковый и кадмиевый ($ZnO \cdot Fe_2O_3$ и $CdO \cdot Fe_2O_3$) являются немагнитными, остальные – магнитны. Они имеют невысокие магнитные свойства и редко применяются в технике. Наибольшее распространение в радиоэлектронике нашли биферриты и полиферриты.

По электрическим свойствам большинство ферритов относятся к полупроводникам. Высокое значение удельного электросопротивления позволяет использовать ферриты для работы на частотах до сотен килогерц и даже мегагерц практически без потерь на вихревые токи. Кроме этого ферриты имеют ряд других преимуществ перед ферромагнетиками. Так, они почти в два раза легче металлов. На их свойства мало влияет радиация. Технология изготовления ферритов позволяет получать изделия самой сложной формы.

Однако ферриты имеют ряд недостатков. Так, по сравнению с металлическими магнитными материалами ферриты имеют меньшие значения магнитной проницаемости, индукции насыщения, а также низкую температурную стабильность. При механических воздействиях магнитные свойства ферритов ухудшаются из-за их высокой хрупкости.

1.2. ПРИРОДА МАГНЕТИЗМА ФЕРРИТОВ

Электрон (заряженная частица), двигаясь вокруг ядра, создаёт (приобретает) орбитальный момент импульса (момент количества движения) ℓ ; $\sum \ell = L$ – результирующий момент импульса.

Электрон обладает собственным моментом количества движения – спином (S).

Полный момент импульса $J = L \pm S$.

Выясним, какие значения принимают векторы S (спиновый) и L (орбитальный-механический) и каким образом создаётся полный момент J .

Квантовая механика не только ограничивает задание момента количества движения двумя величинами (L и L_z) вместо 3-х (для классического вектора – три проекции), но и формулирует строгие ограничения на эти величины.

Проекция момента количества движения на ось Z (других осей нет) может принимать лишь значения

$$L_z = m\hbar, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \ell,$$

а длина вектора момента количества движения

$$L = \hbar\sqrt{\ell(\ell+1)} > \hbar\ell, \ell = 0, 1, 2, \dots, \ell,$$

т.е. момент количества движения квантуется (\hbar обычно опускают, а под моментом количества движения понимают ℓ) (...частица может обладать нулевым моментом количества движения; это есть следствие отсутствия траектории!)

Проекция спинового момента количества движения также квантуется $S_z = m_s \hbar$, но здесь m_s может быть равным $\pm \frac{1}{2}$.

Выражение для спинового момента аналогично выражению для орбитального момента:

$$S^2 = S(S+1) \cdot \hbar^2; S = \sqrt{S(S+1)} \cdot \hbar = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar;$$

$$S = +\frac{1}{2} \text{ (только одно значение);}$$

$$S_z = m_s \hbar, m_s = \pm \frac{1}{2} \text{ (тоже квантовое число).}$$

1.3. УСЛОВИЯ ЗАПОЛНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ОБОЛОЧЕК

Спины S_i распределяются таким образом, чтобы обеспечить возможно большую величину результирующего спинового момента в пределах, допускаемых принципом Паули. Это объясняется тем, что электроны имеют тенденцию занимать по возможности разные орбиты, поскольку энергия кулоновского взаимодействия увеличивается, если на одну и ту же орбиту попадут два электрона со спинами «+» и

«–», кроме того спин-спиновое взаимодействие внутри атома стремится ориентировать спины параллельно друг другу ($\uparrow\uparrow$ или $\downarrow\downarrow$).

Рассмотрим в качестве примера оболочку 4f, в которой может разместиться 14 электронов.

Пусть в ней находится пять электронов, т.е. оболочка заполнена меньше чем на половину. Все электроны расположатся на разных орбитах со спином «+» (\uparrow).

Для 4f-оболочки число m может принимать 7 значений: $m = 3; 2; 1; 0; -1; -2; -3$. Заполнение идёт так, чтобы обеспечить максимальное значение L . Это объясняется тем, что электроны предпочитают вращаться по возможности в одном направлении, т.е. заполнение, например, в случае 5 электронов идёт в следующем порядке: $m = 3, 2, 1, 0, -1$ и $L_z = 3 + 2 + 1 + 0 - 1 = 5$, а $S_z = 5/2$.

В случае, когда в оболочке 4f находится 9 электронов, т.е. больше половины, то заполнение идёт следующим образом: сначала 7 из 9 электронов заполняют разные орбиты: $+3; +2; +1; 0; -1; -2; -3$, а затем оставшиеся попадают на орбиты $m = +3; +2$, но с обратным спином. Суммарный орбитальный момент для 9 электронов будет $L_z = 0 + 5 = 5$; суммарный спиновый момент $S_z = 7/2 - 2/2 = 5/2$.

Правило сложения L и S . Если электронов в оболочке меньше половины максимально возможного числа её заполнения, то $J = L - S$, а если их больше половины, то $J = L + S$.

Так в случае 5 электронов на 4f-оболочке

$$J = L - S = 5 - 5/2 = 5/2,$$

а при 9 электронах $J = L + S = 5 + 5/2 = 15/2$.

При 10 электронах $L_z = 3 + 2 + 1 + 0 - 1 - 2 - 3 + 3 + 2 + 1 = 6$; $S_z = 7/2 - 3/2 = 4/2 = 2$; $J = 6 + 2 = 8$.

Ещё один пример. Когда на 4f-оболочке 6 электронов, то заполнение будет таким:

$$m = 3, 2, 1, 0, -1, -2; L = 3 + 2 + 1 + 0 - 1 - 2 = 3; \\ S = 6/2 = 3; J = L - S = 3 - 3 = 0.$$

Почему в одних случаях (на 4f-оболочке меньше половины) $J = L - S$, а в других (при заполнении 4f больше половины) $J = L + S$? Простого объяснения этому не существует.

Такие способы сложения моментов S и L основаны на спин-орбитальном взаимодействии между s и ℓ отдельного электрона, движущегося вокруг ядра.

При движении электрона вокруг ядра, последнее также совершает вращение. Возникает магнитное поле H . Электрон испытывает на себе действие этого поля и спиновый момент располагается по полю. Так

как магнитный и орбитальный моменты противоположны по направлению, то и S направлены в противоположные стороны. Поэтому, если 4f-оболочка заполнена меньше половины, то орбитальный и спиновый моменты ориентированы антипараллельно. Если больше половины, то 7 электронов дадут $L = 0$, а для остальных электронов орбитальный ℓ и спиновый моменты расположатся параллельно.

Орбитальный магнитный момент

$$M_L = -\mu_B L.$$

Спиновый магнитный момент

$$M_S = -2\mu_B S.$$

Результирующий магнитный момент

$$M_R = M_L + M_S = -\mu_B (L + 2S).$$

Зависимость энергии (E) свободного электрона от волнового вектора (k) и электрона в кристаллической решетке имеют разный вид (рис. 1).

При приближении k к значению $\pm \frac{\pi}{a}$ начинает проявляться влияние электрических зарядов решётки и плотность электронов в её узлах возрастает, вследствие чего энергия E всё более понижается относительно значений свободного электрона и при $k = \pm \frac{\pi}{a}$ кривая становится горизонтальной. При $k > \frac{\pi}{a}$ энергия скачком возрастает на ΔE и при дальнейшем росте k кривая вновь по форме приближается к параболе. Скачок энергии на ΔE объясняется переходом стоячей волны типа $\cos kx$ к волне типа $\sin kx$ при изменении фазы на 90° .

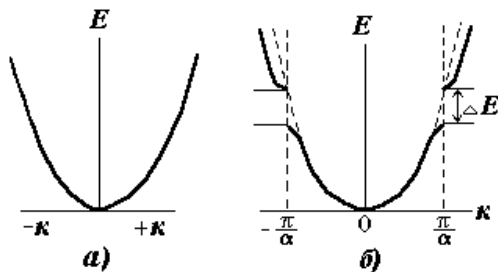


Рис. 1. Зависимость энергии свободного электрона (а) и электрона в кристалле (б) от волнового вектора k

В результате изменения формы кривой $E(k)$ изменяется также плотность состояний $g(E)$, она приобретает вид нескольких изолированных зон (рис. 2).

Изобразим положения зон плотности состояний для «+» и «-»-спинов («+» и «-» – одинаковое количество) (рис. 3).

Приложим магнитное поле H в направлении «+»-спинов. В связи с этим полем энергия электронов со спинами «-» по сравнению с энергией электронов со спином «+» повысится на величину $E_H = 2\mu_B H^*$, (рис. 4).

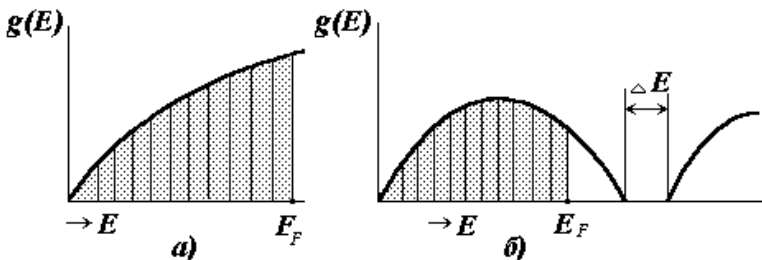


Рис. 2. Плотность состояний $g(E)$ (схема) для свободного электрона (а) и электронов в кристалле (б)

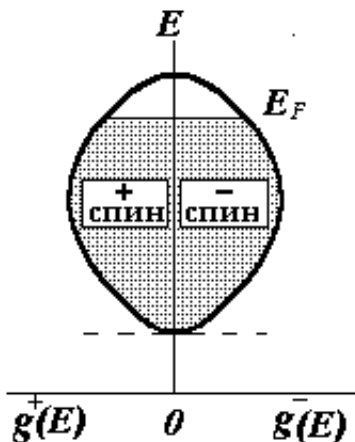


Рис. 3. Положение зон для «+» и «-»-спинов

* Энергия электронов с «+»-спинами понизится на величину $\mu_B H$, а энергия электронов с «-»-спинами повысится на $\mu_B H$ по сравнению с положением без поля H .

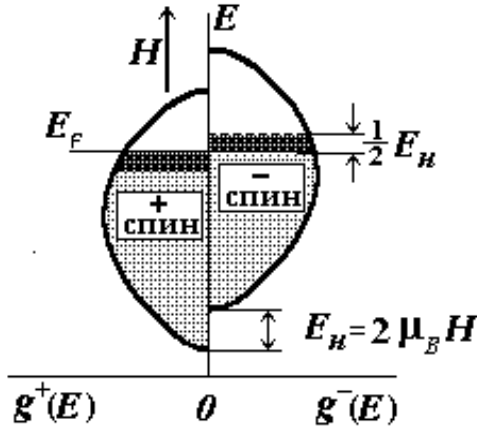


Рис. 4. Механизм образования намагниченности за счёт поляризации зон

Поэтому электроны, занимающие верхнюю часть зоны с отрицательными спинами, перейдут с «переворотом» своих спинов в соседнюю зону и тем самым выровняют уровни Ферми в обеих зонах.

Обозначим число переместившихся электронов через Δn ; оно будет равно площади (заштрихованной косыми линиями), лежащей между прежним и новым уровнями Ферми:

$$\Delta n = g(E_F) \frac{E_H}{2} = g(E_F) \mu_B H .$$

Откуда для прироста намагниченности получим:

$$\Delta J \mu_B = 2 \mu_B \Delta n = 2 g(E_F) \mu_B^2 H$$

и магнитная восприимчивость будет иметь вид

$$\chi_p = 2 g(E_F) \mu_B^2$$

(это есть парамагнетизм Паули).

Зная плотность состояний в зонах «+» и «-», можно сказать, будет ли металл (сплав) ферромагнетиком или нет. Спонтанная намагниченность возникает из-за разности концентраций электронов в зонах с отрицательными и положительными спинами ниже уровня Ферми. На рис. 5 приведена схема (расчётная) плотности состояний для зон с положительными и отрицательными спинами для железа.

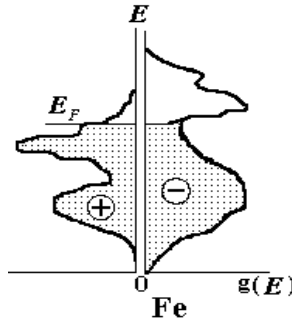


Рис. 5. Плотность состояний $g(E)$ для железа

Из рисунка 5 видно, что ниже энергии Ферми E_F для отрицательных спинов плотность состояний электронов выше, чем для электронов с положительными спинами.

Возникающее расщепление 3d-зон обязано, в основном, электростатическому полю кристаллической решётки (из-за обменного взаимодействия), поэтому такое расщепление зон называют обменным расщеплением.

Обменное расщепление и связанная с этим поляризация зон приводит к ферромагнетизму и намагничённость будет определяться разностью концентраций электронов:

$$J = H_B(N_+ - N_-),$$

где N_+ и N_- – концентрация электронов в зонах.

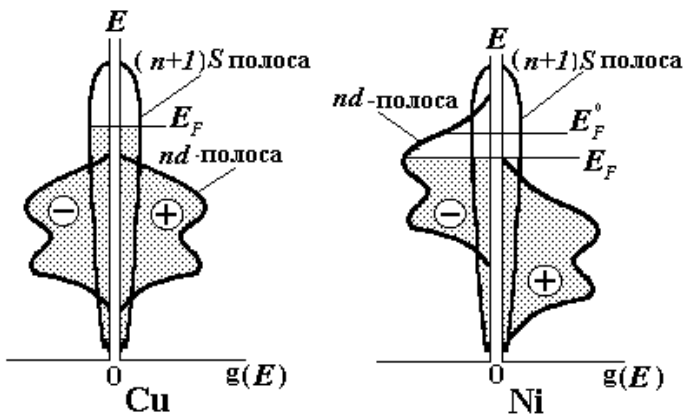


Рис. 6. Кривые плотности состояний электронов в Cu (а) и Ni (б)

На рисунке 6 схематически изображены кривые плотности состояний для Cu (а) и Ni (б).

Из схемы видно, что энергия E_F в меди расположена выше всех пяти полностью заполненных 3d-зон, и структура зон $(n + 1)S$ похожа на зоны для свободных электронов с очень низкой плотностью состояний (1 электрон на элементарную ячейку).

У никеля распределение электронов в зонах таково, что энергия Ферми попадает в 3d-зону и концентрация электронов ниже уровня Ферми сильно возрастает. Из-за обменного взаимодействия происходит расщепление pd-зоны на 2-е, одновременно снижается уровень Ферми. Образовавшаяся разность концентраций электронов (N_+ и N_-) ниже уровня Ферми приводит к ферромагнетизму.

1.4. АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ, ФЕРРИМАГНЕТИКИ

Примером антиферромагнетика является MnO. В кристалле MnO катионы Mn^{2+} образуют гранецентрированную решётку, в которой кислород занимает промежуточное положение между катионами Mn^{2+} (рис. 7).

В этой структуре на пути прямого обмена между магнитными полями расположены немагнитные ионы кислорода. Обменное взаимодействие поэтому будет слабее. Обменное взаимодействие через промежуточный ион O^{2-} носит название косвенного.

Главным в этой структуре является то, что орбита p-электрона (в ионе O^{2-}) вытянута к находящимся по обе стороны ионам Mn_1 и Mn_2 (рис. 8); O^{2-} имеет конфигурацию $1s^2; 2s^2; 2p^6$.

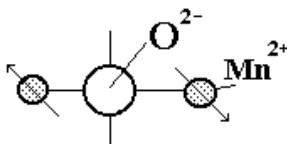


Рис. 7. Схема расположения атомов в кристалле MnO

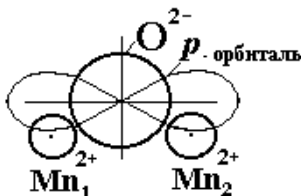


Рис. 8. Конфигурация p-орбиталей в кристалле MnO

Один из электронов р-орбиты при возбуждении может перейти на соседний магнитный катион (например, на Mn_1) и попасть на недостающую 3d-орбиту. При этом необходимо, чтобы расположение спинов удовлетворяло правилу Хунда. Поэтому, когда число электронов 3d-оболочки больше 5 (т.е. больше половины возможного числа для этой орбиты), спин перешедшего электрона должен быть антипараллелен полному спину иона.

В то же время спин оставшегося на р-орбите неспаренного электрона в силу принципа Паули будет противоположен спину перешедшего электрона. Этот оставшийся электрон при переходе на 3d-электронную оболочку другого катиона (Mn_2) ориентирует его спин в противоположном Mn_1 направлении. Если же в 3d-электронной оболочке меньше половины возможного числа электронов, взаимодействие должно быть положительным и обуславливать параллельную ориентацию моментов Mn_1 и Mn_2 .

Знак обменного взаимодействия определяется следующими правилами:

1. Связь антиферромагнитная, если р-орбита аниона перекрывает полузаполненные d-орбиты катионов.

2. Если р-орбита аниона своими лепестками – орбитами перекрывает две пустые d-орбиты противоположных катионов, то связь магнитных моментов должна быть также антиферромагнитна.

3. Когда р-орбита промежуточного иона одним своим лепестком перекрывает полузаполненную d-орбиту катиона, а вторым лепестком – пустую d-орбиту другого катиона, то магнитные моменты будут связаны ферромагнитно (с параллельным расположением моментов).

Свойства ферритов в значительной степени определяются их структурой. Различают несколько типов структур ферритов. Наибольшее применение в технике нашли:

1. Феррошпинели – ферриты со структурой природного минерала шпинели $MgAl_2O_4$;

2. Феррогранаты – ферриты со структурой минерала граната $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$.

3. Гексаферриты – ферриты с гексагональной структурой, изоморфной структуре минерала магнетоплюмбита $PbFe_{7,5}Mn_{3,5}Al_{0,5}Ti_{0,5}O_{19}$.

4. Ортоферриты – ферриты с ромбически искажённой структурой минерала перовскита $CaTiO_3$.

1.5. ФЕРРИТЫ СО СТРУКТУРОЙ ШПИНЕЛИ

Ферриты со структурой шпинели – ферримагнетики. Ферримагнетики аналогичны антиферромагнетикам, так как отрицательное обменное взаимодействие приводит к антипараллельной ориентации подрешёток. Причём магнитные моменты подрешёток различны по

величине, поэтому результирующий магнитный момент в такой структуре отличен от нуля. Ферримагнетик можно считать нескомпенсированным антиферромагнетиком.

Химическая формула простых феррит-шпинелей может быть представлена в виде MFe_2O_4 , где M – катион двухвалентного металла (исключение составляет феррит одновалентного лития – $Li_2O \cdot 5Fe_2O_3$).

Структура феррошпинели представляет собой плотнейшую кубическую гранецентрированную упаковку анионов O^{2-} с замещением катионами M^{2+} и Fe^{3+} 1/8 всех тетраэдрических и 1/2 октаэдрических пустот. При плотной упаковке анионов O^{2-} в элементарной ячейке шпинели образуется 64 тетраэдрических и 32 октаэдрических пустоты. Элементарную ячейку феррошпинели можно условно разбить на 8 отдельных октантов с рёбрами, равными половине параметра ячейки (рис. 9).

Элементарная ячейка содержит восемь формульных единиц MFe_2O_4 , т.е. 8 катионов M^{2+} , 16 катионов Fe^{3+} и 32 аниона кислорода O^{2-} .

В тетраэдрических и октаэдрических пустотах находятся 16 катионов трёхвалентного железа и 8 катионов двухвалентных металлов, т.е. всего в решётке феррошпинели занято 8 тетраэдрических пустот (A -узлы) и 16 октаэдрических пустот (B -узлы).

Неель предположил, что кристаллическая решётка шпинели состоит из двух подрешёток. Одна образована ионами металла в тетраэдрических пустотах (подрешётка A), другая – ионами металла в октаэдрических пустотах (подрешётка B). Между магнитными ионами подрешёток A и B существует сильное отрицательное взаимодействие, в результате чего их магнитные моменты направлены навстречу друг другу. Если магнитные моменты подрешёток одинаковые по величине, то феррит – антиферромагнетик, если различны, то феррит – ферримагнетик.

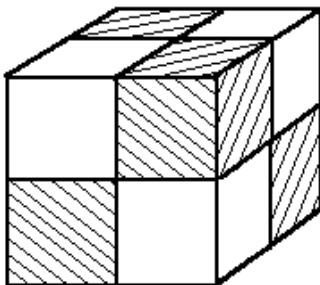


Рис. 9. Схематическое изображение элементарной ячейки шпинельной структуры

Взаимодействие ионов подрешёток *A* и *B* происходит через ионы кислорода, электронные оболочки которых принимают участие в «сверхобмене».

В зависимости от расположения ионов M^{2+} и M^{3+} в *A*- и *B*- узлах различают нормальную, обратную и смешанную феррошпинели.

Ионы Zn^{2+} и Cd^{2+} , находящиеся в *A*-подрешётке, не обладают собственными магнитными моментами. *B*-подрешётка разбивается на две подрешётки с одинаковым количеством ионов Fe^{3+} в каждой и антипараллельным расположением магнитных моментов в подрешётках.

Ферриты – обратные шпинели, например, $Fe^{3+} [Fe^{3+}Fe^{2+}] O_4^{2-}$ – ферромагнитны.

Структуру обратной шпинели имеют ферриты Mg, Fe, Co, Ni, Cu. В обратных шпинелях 8 ионов Fe^{3+} занимают *A*-узлы, остальные 8 ионов Fe^{3+} и 8 ионов M^{2+} находятся в *B*-узлах, располагаясь в них статистически беспорядочно. Структурная формула обратной шпинели $Fe^{3+} [M^{2+}Fe^{3+}] O_4^{2-}$. Результирующий магнитный момент в этом феррите будет определяться магнитным моментом катиона M^{2+} . В структуре обратной шпинели кристаллизуются ферриты Fe, Ni, Co, Li, Cu. Все они являются ферромагнетиками.

Нормальная и обратная шпинели представляют предельные случаи. В большинстве же случаев широкое применение на практике находят смешанные шпинели.

1.6. ГЕКСАФЕРРИТЫ

К ферритам с гексагональной структурой относятся соединения с формулой $MO \cdot 6Fe_2O_3(MFe_{12}O_{19})$, где *M* – ион Ba^{2+} , Ca^{2+} , Pb^{2+} или Sr^{2+} . Ферриты этого класса имеют структуру природного минерала магнетоплюмбита $Pb \cdot Fe_{7,5} \cdot Mn_{3,5} \cdot Al_{0,5} \cdot Ti_{0,5}O_{19}$ или немного отличаются от неё.

Гексаферриты образуются в системе $M'O - M''O - Fe_2O_3$, где *M'* – элементы (Ba^{2+} , Ca^{2+} , Pb^{2+} , Sr^{2+}) с атомным радиусом (1,06 – 1,43 Å), близким к атомному радиусу иона кислорода (~1,32 Å).

В структуре гексаферрита 3 типа катионных позиций: тетраэдрические, октаэдрические и гексаэдрические. Тетра- и октапозиции расположены в *S* (S^*)-слоях, а гексапозиции – в *H* (H^*)-слоях.

Наибольшее применение в технике нашли гексаферриты бария и стронция в качестве постоянных магнитов, а также активных элементов в резонансных устройствах СВЧ-диапазона. Эти ферриты имеют гексагональную структуру. Элементарная ячейка содержит две формульные единицы $MO \cdot 6Fe_2O_3$, т.е. 38 анионов кислорода, 24 катиона Fe^{3+} и 2 характеризующих катиона M^{2+} .

Для описания кристаллографических структур гексагональных ферритов проводят условное разделение структур по гексагональной оси на отдельные блоки.

Блок *S* состоит из двух слоёв кислорода: всего в него входят 8 ионов O^{2-} и 6 ионов Fe^{3+} . Блок *H* состоит из трёх слоёв кислорода: в него входят 11 ионов O^{2-} , 6 ионов Fe^{3+} и один ион Ba^{2+} . В блок *T* входит четыре слоя ионов O^{2-} ; в нём ионы Ba^{2+} замещают некоторые ионы кислорода в двух средних слоях.

В структуре гексаферритов ионы O^{2-} и Ba^{2+} , имеющие примерно одинаковые размеры, образуют плотнейшую упаковку, а ионы Fe^{3+} и M^{2+} размещаются в пустотах: тетраэдрических, октаэдрических и бипирамидальных. Последние типы пустот обусловлены пятью ионами O^{2-} , образующими две треугольные пирамиды, совмещённые в плоскости оснований. Ион Fe^{3+} занимает место в этой плоскости между тремя ионами кислорода.

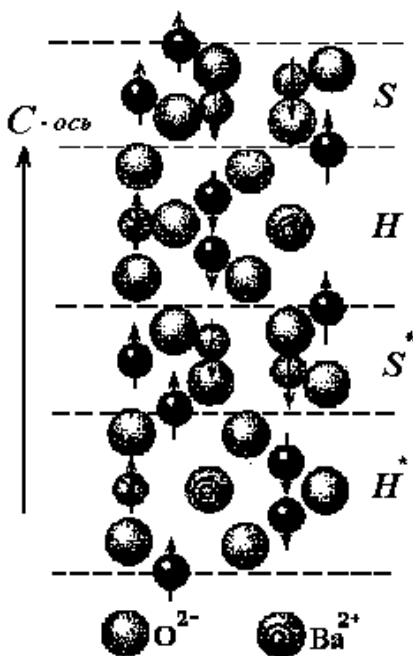


Рис. 10. Разбиение элементарной ячейки гексаферрита $BaFe_{12}O_{19}$ на блоки

В элементарной ячейке гексаферрита бария $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ (структура типа M) 18 ионов Fe^{3+} расположены в октаэдрических пустотах, 4 – в тетраэдрических и 2 – в бипирамидальных.

Структуру гексаферрита бария можно построить из блоков S и H . Она выглядит следующим образом: SHS^*H^* , где S^* и H^* – блоки S и H , повернутые на 180° вокруг оси C (рис. 10).

Из блоков S , H и T , а также S^* , H^* и T^* можно различными комбинациями получить решётки всех гексагональных ферритов.

Соединения группы Y ($2\text{BaO} \cdot 2\text{MO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$) имеют плоскость легкого намагничивания, проходящую перпендикулярно к гексагональной оси, и получили название феррокспланов. Они являются единственными материалами, у которых резонансная частота сдвинута настолько далеко, что они обладают значительной начальной проницаемостью в широком диапазоне частот от 50 до 800 МГц.

В ферроксдюре (группа M) имеется не плоскость, а ось лёгкого намагничивания, так как он состоит из блоков H и S , а в блоке H направление магнитных моментов катионов совпадает с направлением оси C .

Материалы группы W и Z являются, в основном, одноосными с лёгкой осью, совпадающей с гексагональной осью.

В настоящее время разработаны методы получения столь сложных комбинаций шпинельных (S) и гексагональных блоков (H), что длина элементарной ячейки может достигать нескольких тысяч ангстрем, т.е. размера биологических молекул.

1.7. ОРТОФЕРРИТЫ

Ферриты, имеющие химическую формулу $\text{M}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, называются ортоферритами, так как они имеют орторомбическую кристаллическую решётку. Элементарная ячейка состоит из 4 формульных единиц MFeO_3 в виде моноклинных ячеек типа перовскита – CaTiO_3 (рис. 11).

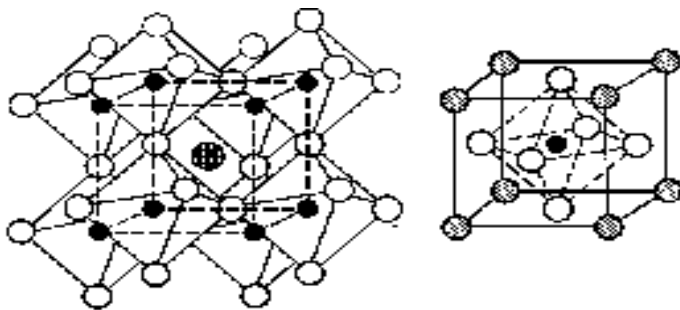


Рис. 11. Элементарная ячейка минерала перовскита

Искажённая структура перовскита представляет собой кубическую структуру с расположением ионов железа в узлах кубической ячейки, ионов кислорода – на гранях куба и ионов редкоземельных элементов (РЗЭ) – в центре этой ячейки.

Искажение кубической структуры связано с нарушением размерных соотношений ионов и особенностями их электронной конфигурации. При этом кубическая ячейка превращается в моноклинную и выделяется как псевдоячейка ортоферрита.

Ортоферриты образуются на основе соединений, в которых ионные радиусы металлов находятся в определённом соотношении.

Некоторые ортоферриты, например ортоферрит гадолиния, обладают ферромагнитными свойствами. Ось лёгкого намагничивания при комнатной температуре для ортоферритов является ось *C*. Эта группа ферритов находит широкое применение в вычислительной технике.

1.8. СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ФЕРРИТОВ

Основными контролируемыми параметрами ферритов являются: начальная и максимальная магнитные проницаемости, намагничённость насыщения и остаточная индукция, коэрцитивная сила и петля гистерезиса. По магнитным свойствам и области применения ферриты можно разделить на следующие группы:

- магнитно-мягкие;
- магнитно-твёрдые;
- ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ);
- ферриты для СВЧ-техники.

Феррошпинели, феррогранаты и ферриты со структурой перовскита являются магнитно-мягкими материалами, а гексоферриты – магнитно-твёрдыми.

Ферриты, являясь полупроводниками, имеют удельное электрическое сопротивление в миллионы и более раз превосходящее сопротивление ферромагнетиков на основе металлов. В связи с этим в ферритах практически не возникают вихревые токи при работе в переменных магнитных полях. Поэтому ферриты могут работать в диапазоне частот до сотен мегагерц и в этом отношении превосходят металлические материалы, которые используются в полях до десятков килогерц.

В настоящее время простые ферриты применяются очень редко, а в основном используются смешанные ферриты. Особенно широко применяются магнитно-мягкие, магнитно-твёрдые ферриты, ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса, ферриты для устройств СВЧ, ферриты с большой константой магнитострикции.

Из магнитно-мягких ферритов изготавливают сердечники различных трансформаторов, катушек индуктивности, фильтров, контуров,

магнитных антенн, статоров и роторов, деталей отклоняющих систем и т.д., т.е. они применяются в высокочастотной и импульсной технике. В постоянных полях и полях промышленной частоты магнитно-мягкие ферриты не нашли применения.

Наибольшее распространение получили марганец-цинковые $ZnO \cdot (Fe, Mn)_2O_3$ и никель-цинковые $ZnO \cdot (Fe, Ni)_2O_3$ ферриты.

Марганец-цинковые ферриты выпускаются с начальной магнитной проницаемостью μ_n от 700 до 6000 (марки 700НМ...6000НМ). Электросопротивление этих ферритов изменяется от 0,1 Ом · м (для 6000НМ) до 20,0 Ом · м (для 700НМ). Марганец-цинковые ферриты 6000НМ...1000НМ находят применение в изделиях, работающих при частотах до нескольких сотен килогерц как в слабых, так и в сильных магнитных полях. Однако стабильные электрические свойства ферритов этой системы получить очень трудно.

Ферриты марок 2000НМ...700НМ предназначены для изделий, которые используются для работы в слабых и средних полях в диапазоне частот до 3 МГц. Они имеют малый температурный коэффициент магнитной проницаемости ТК μ в широком интервале температур.

Никель-цинковые ферриты (2000НН...100НН) работают при частотах до нескольких мегагерц и в слабых полях. Для работы в диапазоне частот до 100 МГц в слабых полях используются ферриты 150ВЧ...20ВЧ.

Особую группу материалов представляют ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ). В отличие от металлических материалов, в которых получение прямоугольной петли гистерезиса связано с сложной термомагнитной обработкой, в ферритах этого класса прямоугольность петли гистерезиса получается спонтанно. Наибольшее распространение из ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса нашли системы Mg (Fe, Mn)O₃, а также ферриты, содержащие литий.

Для работы в СВЧ-устройствах (частоты 100 – 10³ МГц) наибольшее применение нашли магниевые ферриты (например 3СЧ6, 3СЧ9) и иттриевые феррит-гранаты (например, 10СЧ6). Кроме иттриевых феррит-гранатов в СВЧ-диапазоне широко применяются иттрий-гадолиниевые феррит-гранаты (например, 30СЧ6 и 40СЧ4), отличающиеся высокой термостабильностью.

В качестве магнитно-твёрдых материалов из оксидных композиций наибольшее применение нашли феррит бария BaO · Fe₂O₃ и феррит кобальта CoO · Fe₂O₃, которые имеют гексагональную кристаллическую решетку с одноосной анизотропией. Наибольшее распространение получили ферриты на основе гексаферрита бария. Именно на его основе впервые были разработаны магнитно-твёрдые ферриты под названием «ферроксдюры».

В последнее время возрос интерес к ферритам на основе оксидов стронция и свинца. Так, соединения на основе оксидов стронция позволяют получать более высокие магнитные характеристики. Гексаферриты при небольшой остаточной индукции ($B_r \sim 0,2...0,4$ Т) имеют очень высокую коэрцитивную силу, достигающую 240 кА/м, что значительно выше коэрцитивной силы лучших магнитно-твёрдых металлических сплавов. Так, бариевый феррит 2БА1 (анизотропный) имеет свойства: $B_r = 0,28...0,33$ Т, $H_c = 192...240$ кА/м, $W_{\max} = (16...23,2) \cdot 10^3$ Т·А/м, $\rho = 10^3$ Ом · м (табл. 7).

1. Состав и свойства магнитно-мягких ферритов

Марка	Состав				Свойства			
	Fe ₂ O ₃	NiO	ZnO	MnO	μ_n	M_{\max}	B_r , Т	H_c , А/м
6000НМ	52,5	–	23,0	24,5	5500	10 000	0,13	6,4
4000НМ	52,75	–	21,15	26,1	5000	7000	0,15	7
2000НН	50,0	16,0	34,0	–	2100	7000	0,12	8

2. Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса

Марка	Состав	H_c , А/м	B_r , Т	T_c , °С
1,5ВТ	Mg – Mn	120	0,22	250
3ВТ	Li – Mg – Mn	240	0,23	550
5ВТ	Li – Mg – Mn	400	0,23	560

3. Свойства некоторых магнитно-твёрдых ферритов

Марка феррита	Состав феррита	B_r , Т	H_c , кА/м	$W_{\max} \times 10^3$ Т·А/м	ρ , Ом · м
1БИ	BaO · 5,6 Fe ₂ O ₃	0,19...0,22	128...144	0,64...8,8	10^5
2БА	BaO · 5,6 Fe ₂ O ₃	0,3...0,35	184...232	16...23,2	10^5
2,6СА	SrO · 5 Fe ₂ O ₃	0,34...0,37	240...280	20,8...24	10^5
1,5ФК	CoO · Fe ₂ O ₃	0,24...0,27	128...152	13,6...14,4	10^4

Примечание: БИ – изотропные ферриты, БА – анизотропные.

К недостаткам гексаферритов следует отнести очень высокую чувствительность к изменению параметров микроструктуры (размеров зёрен, пористости, характеру межзёренных границ и др.). В свою очередь эти параметры определяются особенностями технологии. Так, например, для увеличения коэрцитивной силы ферритов необходимо получить мелкозернистую структуру (желательно с размером зерна менее 1 мкм), т.е. чтобы каждое из них не превышало величины 1 домена. В этом случае в однофазной структуре процессы перемагничивания путём перемещения стенок доменов будут затруднены, что приведёт к повышению коэрцитивной силы.

Отсюда вытекают особые требования к выбору специальных примесей, позволяющих получить необходимую микроструктуру. Чаще всего в качестве добавки используют каолин (почти чистый минерал – каолинит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Присутствие в составе каолина диоксида кремния позволяет проводить спекание в жидкой фазе, так как Fe_2O_3 и SiO_2 образуют легкоплавкую эвтектику с температурой плавления ниже температуры спекания. Однако в настоящее время нет общепринятых положений по выбору примесей для каждого конкретного случая. Наибольший эффект увеличения магнитных характеристик ферритов даёт прессование порошков в магнитном поле.

2. ПОЗИСТОРЫ (ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТВЁРДЫЕ РАСТВОРЫ НА ОСНОВЕ ТИТАНАТА БАРИЯ)

Рассмотренные ранее оксидные полупроводники имеют очень широкий интервал сопротивлений. По величине проводимости они обеспечивают практически весь диапазон, необходимый для практического использования. Серьёзным недостатком этих полупроводников является их невысокий ТКС, составляющий всего несколько процентов на 1 °С.

Во многих электронных схемах требуются датчики температуры и термосопротивления с положительным ТКС. Для этих целей стали разрабатываться и использоваться материалы, в которых наблюдается аномальное изменение электросопротивления при фазовом переходе с положительным ТКС до 50 % на 1 °С. Такие полупроводники получили название **позисторов**.

Материалы этого класса могут использоваться в качестве датчиков, преобразующих механические колебания в электрические и наоборот.

Такие полупроводниковые материалы используются в качестве излучателей ультразвуковых колебаний в дефектоскопии, а также пьезоэлектрических резонаторов, применяемых вместо колебательных контуров и др.

Материалами пьезоэлементов служат как природные пьезоэлектрические материалы (кварц, сегнетова соль), так и искусственная пьезокерамика на основе титаната бария (ТБ-1), цирконата-титаната свинца и др.

Технология этих материалов отличается рядом особенностей, характерных для изготовления керамики. Наиболее широкое применение в радиоэлектронике нашла пьезокерамика на основе твёрдых растворов $\text{PbZrO}_3 - \text{PbTiO}_3$ (ЦТС). При соотношении 53 – 54 % мол. PbZrO_3 и 47 – 46 % мол. PbTiO_3 керамика имеет наиболее высокие пьезоэлектрические характеристики. Для увеличения диэлектрической проницаемости и расширения интервала рабочих температур в керамику ЦТС вводят добавки бария или стронция.

Для получения сегнетомягкого материала керамику легируют оксидами трех- и пентивалентных металлов (La_2O_3 , Ta_2O_3 , Sb_2O_3 и др.). При этом на несколько порядков возрастает удельное сопротивление и уменьшается коэрцитивная сила пьезокерамики. Сегнетотвёрдый материал получают добавкой Fe_2O_3 , который увеличивает коэрцитивную силу и затрудняет поляризацию.

Формование заготовок проводят прессованием. В результате неравномерного распределения давления формируются зоны неодинаковой плотности заготовки, что приводит к ухудшению свойств (расщеплению резонансной частоты). Поэтому после прессования эти зоны должны стачиваться. Затем заготовка поступает на обжиг при температуре 1200 – 1300 °С.

Характерной особенностью этого процесса является то, что при температуре свыше 1100 °С происходит интенсивное испарение оксида свинца из заготовки, что приводит к изменению химического состава керамики. Поэтому для предотвращения этого обжиг проводят в атмосфере, контролируемой по давлению РbО. С этой целью между заготовками помещают источники паров РbО (например, цирконат свинца), спрессованные при давлениях, значительно меньших, чем заготовки пьезокерамики. Такие же результаты можно получить при горячем прессовании, так как температура отжига снижается до 800 °С. Отличительной чертой технологии изготовления пьезокерамики является необходимость поляризации её сильным постоянным электрическим полем. Для предотвращения поверхностного перекрытия поляризацию проводят в изолирующей среде – трансформаторном масле или кремний-органической жидкости в течение 1–2 часов.

3. СОЕДИНЕНИЯ ТИПА $A^{III}B^V$

Системы типа $A^{III}B^V$ находят широкое применение в твёрдотельной электронике. Чтобы прогнозировать свойства полупроводников этого класса и их применение, необходимо познакомиться со свойствами компонентов и условиями образования химических соединений.

Первичной характеристикой полупроводника можно считать тип химической связи. Из характера валентных связей в кристаллической (или аморфной) структуре вытекают физические и химические свойства полупроводника, а также такие параметры, как ширина запрещённой зоны, форма энергетических уровней, эффективные массы и подвижность носителей, теплопроводность, электропроводность и фотопроводность.

В элементарных полупроводниках и химических соединениях преимущественным видом связи является ковалентная (гомеополярная) связь.

Экспериментально показано, что в кристаллах с ковалентными связями электронная плотность валентных электронов неравномерно распределена в пространстве.

В направлениях, являющихся кратчайшими для двух соседних атомов, электронная плотность (вероятность пребывания электронов) выше, чем в других направлениях. Это означает, что валентные электроны как бы локализованы в пространстве и образуют «электронные мостики». Связь имеет резко выраженный направленный характер, что и является важнейшей отличительной особенностью ковалентной связи. Осуществляется связь парами валентных электронов, находящихся на общей для двух соседних атомов связывающей орбите. При этом в случае элементарных веществ каждый из атомов данной пары «отдаёт» на связь по одному валентному электрону. Таким образом, для образования ковалентной связи необходимо наличие двух неспаренных электронов, с противоположной ориентацией спинов.

При образовании ковалентной связи каждый атом достраивает свою валентную оболочку до 8 электронов. Структура ковалентных кристаллов химических элементов, относящихся к разным группам периодической системы, удовлетворяет правилу

$$Z_K = 8 - N,$$

где Z_K – координационное число, N – номер группы, в которой расположен данный элемент (N адекватно валентности элемента).

Наряду с ковалентной связью в кристаллах может наблюдаться ионный тип (гетерополярный) связи. Ионная связь обеспечивается силами электростатического взаимодействия (притяжения), возникающего

между разноимённо заряженными ионами. При этом ионы достраивают свою внешнюю электронную оболочку до устойчивой конфигурации (ближайшего в периодической системе инертного газа) присоединением недостающих электронов (анионы) или отдачей электронов (катионы).

Следует подчеркнуть, что полное разделение зарядов, т.е. идеальная ионная связь никогда не достигается. Из-за волновых свойств электронов вероятность нахождения валентных электронов вблизи ядра катиона мала, но никогда не бывает равна нулю.

Межатомные (межионные) расстояния в ионных кристаллах определяются уравниванием сил притяжения между анионами и катионами и сил отталкивания их электронных оболочек. Важной особенностью ионных связей, часто накладывающихся на ковалентные в полупроводниковых соединениях, является поляризуемость ионов. Это связано с тем, что центры тяжести отрицательного и положительного заряда иона не совпадают.

На рисунке 12 показана упрощённая картина непрерывного перехода от чисто ковалентных к чисто ионным кристаллам. На рисунке 12 изображена схема чисто ковалентного кристалла (германия). Здесь четыре электрона на ячейку одинаково распределены вокруг ионных остатков Ge^{4+} . Электронная плотность в области между узлами велика вдоль определённых направлений.

Из рисунка 13 видно, что в арсениде галлия плотность электронов в междоузлиях несколько уменьшилась и появилась тенденция к тому, чтобы электронное облако вокруг каждого из ионных остатков As^{5+} было немного больше, а электронное облако вокруг ионных остатков Ge^{3+} было немного меньше, чем это необходимо для компенсации положительного заряда. Из этого следует, что соединение типа $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ служит хорошим примером веществ, которые являются отчасти ионными и отчасти ковалентными.

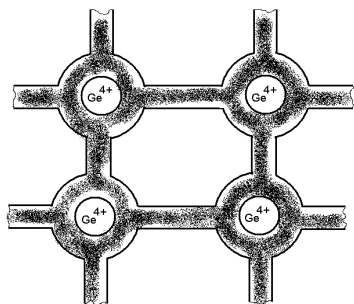


Рис. 12. Ковалентная связь в германии

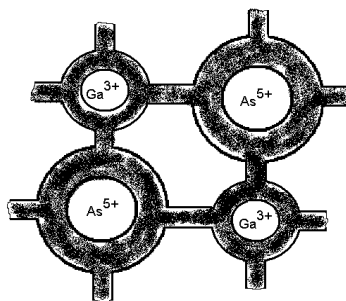


Рис. 13. Чисто ковалентный кристалл: арсенид галлия

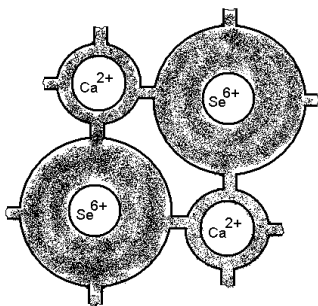


Рис. 14. Ионный кристалл селенида кальция

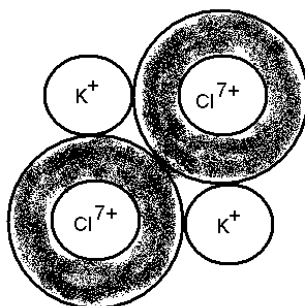


Рис. 15. Чисто ионный кристалл (хлорид калия)

На рисунке 14 представлен кристалл селенида кальция.

Ион Ca^{2+} почти полностью освободился от валентных электронов, и в электронном облаке вокруг ионного остова Se^{6+} содержится почти восемь электронов, требующихся для получения иона Se^{-} . Кристалл слабо ковалентен, поскольку ион Ca^{2+} слегка экранирован электронами, находящимися непосредственно вблизи него, а электронов у ионного остова Se^{6+} недостаточно, чтобы целиком заполнить все восемь внешних оболочек и образовать ион Se^{-} . Ковалентный характер проявляется также в наличии в распределении заряда слабых «перемычек» вдоль линий между ближайшими соседями.

Из рисунка видно, что ион K^{+} свободен от избыточных электронов, и все восемь электронов группируются вокруг ионного остатка Cl^{7+} , образуя ион Cl^{-} . (Обычно вообще не изображают электронов, а рисуют сразу ион хлора Cl^{-}).

Ковалентные кристаллы – не столь хорошие диэлектрики как ионные кристаллы – это согласуется с тем, что в ковалентной связи заряд оказывается делокализованным.

3.1. ДВОЙНЫЕ И ТРОЙНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ФАЗЫ

Общепринятой классификации двойных полупроводниковых соединений нет.

Примем наиболее распространённую и наиболее рациональную классификацию, основанную на объединении в один класс соединений, имеющих одинаковую стехиометрическую формулу и образованных из элементов, расположенных в одинаковых группах периодической системы. При этом элементы, расположенные в периодической системе в группах с меньшими порядковыми номерами, обозначаются буквой А, а в группах с большими порядковыми номерами – В. На-

пример, соединения класса $A^{III}B^V$ образованы элементами, расположенными в группах III и V периодической системы, входящими в соединения в эквивалентных соотношениях (GaAs, GaP, InSb), а соединения класса $A_2^V B_3^{VI}$ (Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3) образуются элементами, расположенными в V и VI группах периодической системы в соотношении 2:3. Таким образом, формула класса является обобщённой стехиометрической формулой соединений, входящих в данный класс.

3.2. ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ ДВОЙНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФАЗ

К двойным полупроводниковым фазам относятся двойные полупроводниковые соединения и твёрдые растворы на их основе. Химические связи в этих фазах, смешанные с преобладанием ковалентной – чаще это ковалентно-ионная – металлические связи, реже ковалентно-ионные. Ионная составляющая обусловлена тем, что двойные фазы построены из разноимённых атомов, она характеризует вероятность принадлежности электронов связи одному из двух атомов, образующих связь; если эта вероятность равна $\frac{1}{2}$, ионная составляющая равна нулю. Металлическая составляющая характеризует степень размытия облака

Подобно тому, как в случае элементарных полупроводников обобщённой качественной характеристикой химической связи в подгруппе является порядковый номер элемента, в случае двойных соединений обобщённой качественной характеристикой связи в общем классе является средний атомный номер соединения.

Например, средний атомный номер арсенида галлия равен 32 ($Z_{\text{ср. GaAs}} = \frac{31+33}{2}$), а средний атомный номер полуторного теллурида

индия равен 50,8 ($Z_{\text{ср. In}_2\text{Te}_3} = \frac{2 \cdot 49 + 3 \cdot 52}{5}$).

Двойные полупроводниковые фазы образуются в основном при возникновении гибридных связей sp , sp^2 , sp^3 , dsp^2 , d^2sp^3 и т.д.

3.3. ДВОЙНЫЕ АЛМАЗОПОДОБНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ФАЗЫ

Алмазоподобные полупроводниковые фазы возникают при образовании sp^3 – гибридных химических связей и для них характерно тетраэдрическое расположение атомов в первой координационной сфере.

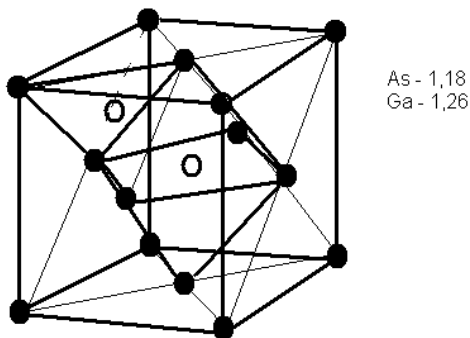


Рис. 16. Схема расположения атомов в кристаллической решётке соединения типа $A^{III}B^V$

Для алмазоподобных фаз выполняется основное правило: в этих фазах на каждый атом в среднем приходится четыре валентных электрона.

В первой координационной сфере этих фаз, подобно элементарным полупроводникам, кристаллизующимся в структуре алмаза, находятся четыре атома, однако в отличие от элементарных фаз в двойных фазах атом данного сорта окружён четырьмя атомами другого сорта. Алмазоподобные фазы кристаллизуются в структуру сфалерита или вюрита (рис. 16). Координационное число сфалерита равно 4.

4. СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФАЗ. ИХ СПОСОБНОСТЬ К РАСТВОРИМОСТИ

В качестве примера в табл. 4 приведены сведения о характере взаимодействия арсенида галлия с другими алмазоподобными соединениями типа $A^{III}B^V$.

Из таблицы следует, что геометрический фактор начинает сказываться на протяжённости области твёрдых растворов тогда, когда величина $\Delta\alpha/\alpha_{GaAs} > 15...17\%$. Это положение является общим для квазибинарных систем $A^{III}B^V - A^{III}B^V$. Можно предположить, что различия в степени поляризованности связей влияет на протяжённость области твёрдых растворов тогда, когда Δe^* превышает $\sim 0,1e$. Однако к настоящему времени экспериментальные данные по этому вопросу отсутствуют.

4. Взаимодействие арсенида галлия с соединениями типа $A^{III}B^V$ в квазибинарных системах $GaAs - A^{III}B^V$

Система	Геометрический фактор		$\Delta e^* = e_{GaAs}^* - e_{A^{III}B^V}^*$	Характер взаимодействия
	$\Delta\alpha = \alpha_{GaAs} - \alpha_{A^{III}B^V}, \%$	$\Delta\alpha/\alpha_{GaAs}, \%$		
GaAs – GaP	0,202	3,6	0,01	Непрерывный ряд твёрдых растворов
GaAs – InP	0,216	3,9	0,03	То же
GaAs – GaSb	0,343	6,1	0,03	То же
GaAs – InSb	0,405	7,2	0,03	То же
GaAs – InSb	0,825	14,6	0	Твёрдые растворы на основе обеих фаз, слагающих систем. Протяжённость областей твёрдых растворов $\sim 15\%$ (мол.) с обеих сторон

Примечание. Δe^* – разность эффективных зарядов ионов.

На рисунке 17 показано расположение областей твёрдых растворов в четвертных системах, построенных на основе некоторых соединений типа $A^{III}B^V$ (не все системы являются квазичетвертными).

В твёрдых растворах на основе соединений $A^{III}B^V$, как и в чистых соединениях, осуществляются смешанные ковалентно-металлические sp^3 -гибридные связи.

По-видимому, в ряде твёрдых растворов соединений типа $A^{III}B^V$ наблюдается упорядочение по подрешёткам аниона и катиона. Отклонение свойств этих твёрдых растворов от аддитивных свидетельствует о правильности предположения.

Свойства твёрдых растворов закономерно изменяются с изменением состава раствора, однако не обязательно аддитивно.

Система GaSb – InSb. В ней образуется непрерывный ряд твёрдых растворов. При температуре 300 К ширина запрещённой зоны изменяется монотонно с изменением состава (рис. 18, 19).

Система GaSb – AlSb. Данные о зависимости периода решётки от состава в этой системе не известны (периоды решётки GaSb и AlSb не сильно отличаются: 6,09592 Å – GaSb, 6,1355 Å – AlSb), поэтому трудно оценить изменение периода решётки от состава экспериментально. Зависимость ширины запрещённой зоны от состава не монотонна: на кривой имеется точка перегиба вблизи состава 10% GaSb (рис. 19).

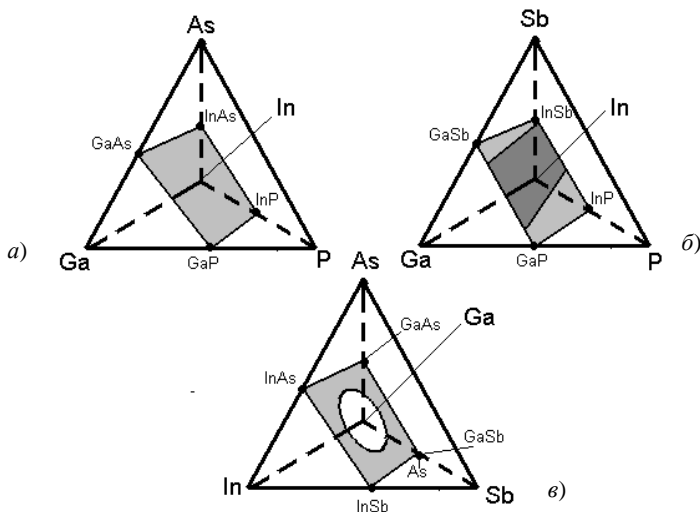


Рис. 17. Расположение областей твёрдых растворов (заштрихованные области) в некоторых четвертных системах типа $A^{III} - A^{III} - B^V - B^V$:

a – Ga – In – P – As; *б* – Ga – In – P – Sb; *в* – Ga – In – As – Sb

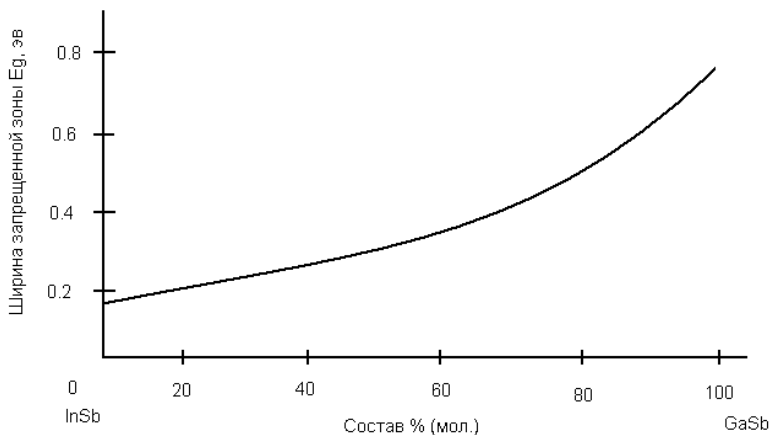


Рис. 18. Изменение ширины запрещённой зоны в зависимости от состава твёрдого раствора в системе GaSb – InSb (300 К)

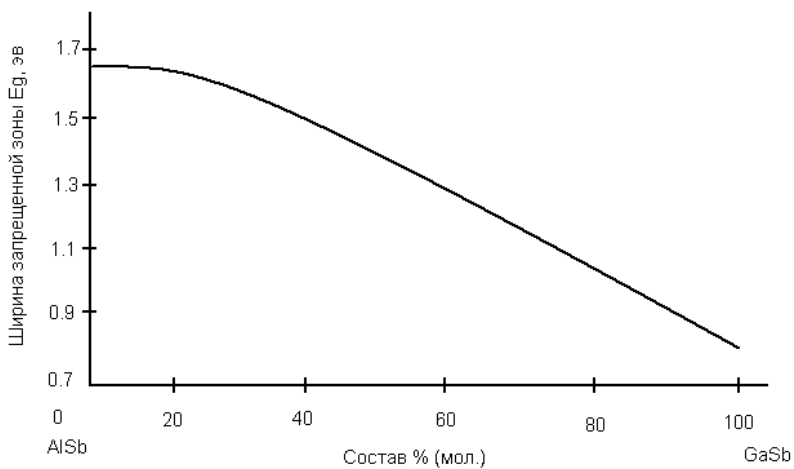


Рис. 19. Изменение ширины запрещённой зоны в зависимости от состава твёрдого раствора в системе AlSb – GaSb

Это связано с тем, что минимум зоны проводимости в GaSb лежит в точке Γ [$k = (000)$], а в AlSb – в точке X $\left[k = \frac{2\pi}{a}(200) \right]$

При изменении состава твёрдых растворов, например от AlSb к GaSb, величина ΔE сначала определяется энергетическим зарядом между максимумом валентной зоны (точка Γ) и минимумом зоны проводимости, расположенным в точке X , а при возрастании концентрации GaSb – зазором между максимумом валентной зоны (точка Γ) и минимумом зоны проводимости, расположенным в точке X . Характер зависимости от состава, положения минимумов зоны проводимости, расположенных в точках Γ и X , различен. Точка на кривой зависимости ΔE от состава твёрдого раствора отвечает равному зазору между минимумами зон проводимости, расположенных в точках Γ и X , и потолком валентной зоны.

Здесь необходимо привести сведения о зонной структуре химических соединений, зависимости энергии электрона (E) от волнового вектора (k) в разных направлениях от центра зоны Бриллюэна.

На рисунке 20 изображена первая зона Бриллюэна для ГЦК кристаллов (усечённый октаэдр) и направления построения энергетических зон.

Точка Γ лежит в центре зоны. Для указания точек высокой симметрии на границе зоны принято использовать обозначения K , L , W и X .

На рисунке 21 показана зонная структура GaSb. За начало отсчёта взята точка Γ_{15} максимума валентной зоны.

Энергетическая структура зон позволяет характеризовать электрофизические свойства полупроводниковых материалов. Например, характер и тип междузонных переходов.

Покажем это на примере GaAs. Изобразим упрощённую схему зон арсенида галлия (рис. 22).

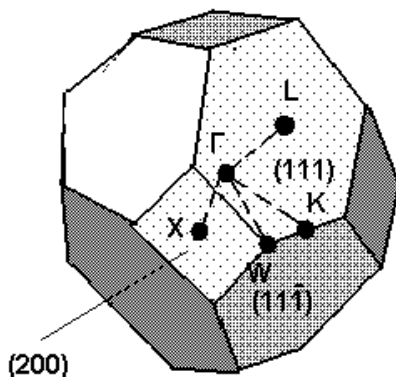


Рис. 20. Первая зона Бриллюэна для ГЦК кристаллов

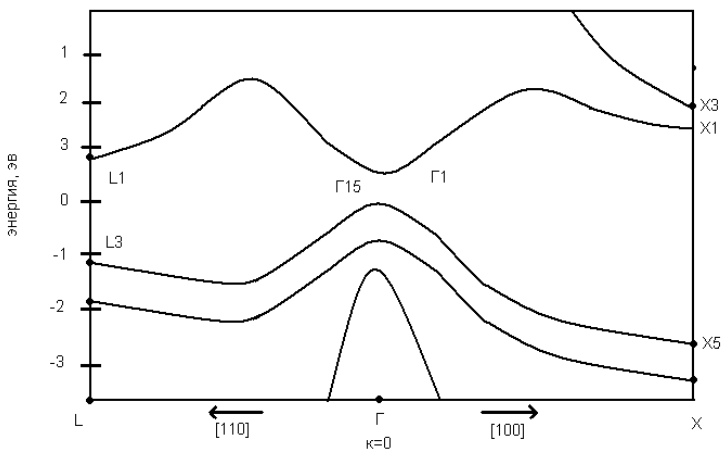


Рис. 21. Зонная структура GaSb.

Приближённые значения энергетических зазоров:

$\Gamma_1 - \Gamma_{15}$ (ширина запрещённой зоны ΔE) = 0,81 эВ (4 К);

$L_1 - \Gamma_1$ = 0,08 эВ (300 К); $X_1 - \Gamma_1$ = 0,4 эВ (300 К);

$L_1 - L_3$ = 2 эВ (300 К); $X_1 - X_5$ = 4,2 эВ (300 К)

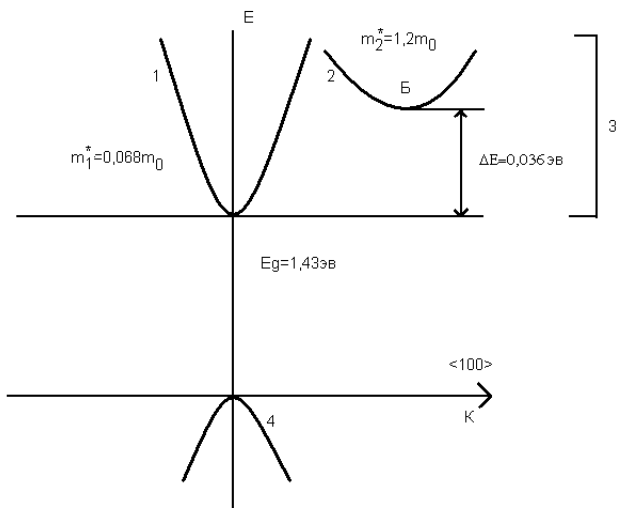


Рис. 22. Схема структуры зон арсенида галлия (*n*-типа) в направлении $\langle 100 \rangle$:

1 – нижний минимум (А); 2 – верхний минимум (Б); 3 – зона проводимости;

4 – валентная зона; m^* – эффективная масса электрона;

m_0 – масса покоя электрона

Из рисунка видно, что в области низшей долины А – электроны лёгкие: $m_1^* = 0,068m_0$ и поэтому имеют высокую подвижность ($\mu \approx 4000...8000 \text{ см}^3/(\text{В} \cdot \text{с})$). В высокой долине Б – электроны тяжелее: $m_2^* = 1,2m_0$ и обладают низкой подвижностью ($\mu \approx 100 \text{ см}^3/(\text{В} \cdot \text{с})$).

При низких температурах и слабом внешнем электрическом поле энергия электронов E значительно меньше энергетического заряда ($k_bT = E$), т.е. $E \ll \Delta E$, поэтому электроны будут занимать энергетические уровни в низшей долине зоны проводимости, где они имеют высокую подвижность и малую эффективную массу (рис. 23, а).

При изменении напряжённости электрического поля возможны важные переходы электронов и связанные с этим изменения вольт-амперных характеристик полупроводниковых сплавов. Покажем это на рис. 23, а, б.

В этом случае плотность тока определяется концентрацией электронов в нижней долине $n_1 = n_0$ (в верхней долине $n_2 = 0$), их подвижностью μ_1 и будет линейно возрастать с ростом напряжённости поля до некоторого критического значения E_a (рис. 24):

$$J = en_0\mu_1 E .$$

При $E > \Delta E$ – переход электронов в верхнюю долину Б (рис. 22, 23), где они будут иметь низкую подвижность, большую эффективную массу и высокую плотность состояний (широкий максимум), а суммарная концентрация электронов $n_0 = n_1 + n_2$.

Таким образом, с ростом напряжённости поля (от E_a до E_6 , рис. 20) будет иметь место уменьшение подвижности электронов, уменьшение плотности тока, а на вольт-амперной характеристике появится падающий участок.

Наличие «падающего» участка может приводить к возникновению колебаний тока с частотой $\sim 10^{10}$ Гц. Это явление – генератор Ганна, впервые наблюдалось в GaAs.

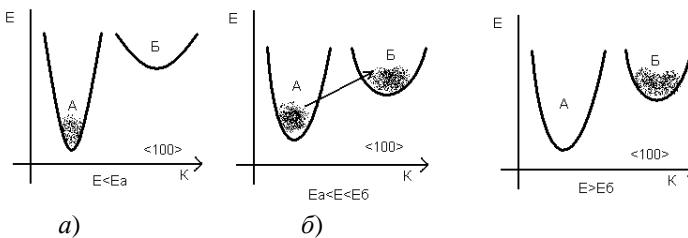


Рис. 23. Распределение электронов при различных значениях напряжённости электрического поля (E)

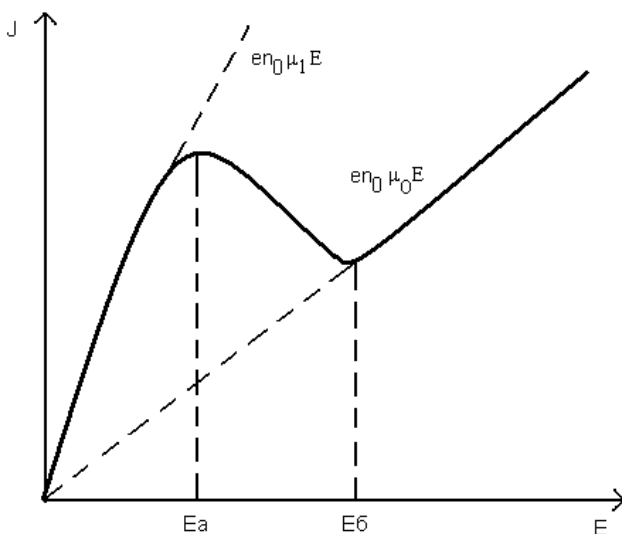


Рис. 24. Зависимость плотности тока (J) от напряжённости электрического поля для двухдолинного (GaAs) полупроводника

В заключение этого раздела по анализу свойств соединений типа $A^{III}B^V$ и твёрдых растворов на их основе следует отметить, что эти соединения (особенно арсенид галлия, актимонид индия, фосфид галлия, арсенид индия) находят всё более широкое применение в приборах, преимущественно в фотоэлектрических и фотолюминесцентных (фотодиоды, фотосопротивления, лазеры, светодиоды). Реализация прямых оптических переходов во многих из рассматриваемых материалов обуславливает использование их для создания источников когерентных излучений (лазеров); первый полупроводниковый лазер был создан на основе арсенида галлия.

Примечание. Доля переброшенных через энергетическую щель электронов при температуре T равна $\approx e^{-E_g/2k_bT}$.

При ширине щели $E_g = 4$ эВ эта величина при комнатной температуре ($k_bT \approx 0,025$ эВ) составляет $\sim e^{-80} \approx 10^{-35}$, т.е. по сути переброса электронов нет (и ток бесконечно мал). Но если $E_g = 0,25$ эВ, то доля переброшенных электронов при комнатной температуре $\sim e^{-5} \approx 10^{-2}$ и будет наблюдаться заметная проводимость.

5. ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ

5.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

Жидкий кристалл – состояние вещества, промежуточное между жидким и твёрдым состояниями. В жидкости молекулы могут свободно вращаться и перемещаться в любых направлениях. В кристаллическом твёрдом теле они расположены по узлам правильной геометрической сетки, называемой кристаллической решёткой, и могут лишь вращаться в своих фиксированных позициях. В жидком кристалле имеется некоторая степень геометрической упорядоченности в расположении молекул, но допускается и некоторая свобода перемещения.

Считается, что состояние жидкого кристалла открыл в 1888 г. австрийский ботаник Ф. Рейнитцер. Он изучал поведение органического твёрдого вещества, называемого холестерилбензоатом. При нагревании это соединение переходило из твёрдого в мутное на вид состояние, ныне называемое жидкокристаллическим, а затем в прозрачную жидкость; при охлаждении последовательность превращений повторялась в обратном порядке. Рейнитцер отметил также, что при нагревании изменяется цвет жидкого кристалла – от красного к синему, с повторением в обратном порядке при охлаждении. Почти все жидкие кристаллы, обнаруженные на сегодняшний день, представляют собой органические соединения; примерно 50% всех известных органических соединений при нагревании образуют жидкие кристаллы. В литературе описаны также жидкие кристаллы некоторых гидроксидов (например, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$).

Консистенция жидких кристаллов может быть разной – от легкотекучей жидкой до пастообразной. Жидкие кристаллы имеют необычные оптические свойства, что используется в технике.

5.2. ТИПЫ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

Есть два способа получить жидкий кристалл. Один из них был описан выше, когда говорилось о холестерилбензоате.

При нагревании некоторых твёрдых органических соединений их кристаллическая решётка разваливается и образуется жидкий кристалл. Если температуру повышать и далее, то жидкий кристалл переходит в настоящую жидкость. Жидкие кристаллы, образующиеся при нагревании, называются термотропными. В конце 1960-х годов были получены органические соединения, являющиеся жидкокристаллическими при комнатной температуре.

Существуют два класса термотропных жидких кристаллов:

1. Нематические (нитевидные).
2. Сметические (сальные или слизистые).

Нематические жидкие кристаллы можно разделить на две категории: обычные и холестерически нематические (скрученные нематики).

Второй способ получения жидких кристаллов – обработка некоторых соединений контролируемым количеством воды или другого полярного растворителя. (Полярным называется растворитель, состоящий из молекул-диполей, на одном конце которых находится положительный электрический заряд, а на другом – отрицательный.) Жидкие кристаллы, состоящие из двух и более компонентов, называются лиотропными. Их можно получать, смешивая с водой такие материалы, как мыла, детергенты, полипептиды, жирные кислоты, соли жирных кислот и фосфолипиды.

5.3. СТРУКТУРА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

Жидкокристаллическим (мезоморфным) состоянием вещества называется такое состояние, свойства которого являются промежуточными между свойствами твёрдого кристалла и жидкости. Согласно законам термодинамики, агрегатные состояния веществ подразделяются на три вида: твёрдое, жидкое и газообразное, однако такое разделение не отражает внутреннее строение вещества, степень упорядоченности его частиц. Некоторые вещества (стёкла, смолы) обладают свойствами, характерными и для твёрдых, и для очень вязких переохлажденных жидкостей. В частности, некоторые органические материалы переходят из твёрдого состояния в жидкое, испытывая ряд переходов, включающих образование новой фазы, которую называют жидкокристаллическим состоянием (жидким кристаллом).

Впервые образование новой, необычной фазы было замечено австрийским ботаником Рейнитцером в 1888 г., когда он определял свойства полученного им нового органического вещества – холестерилбензоата. Это вещество плавится в две стадии: сначала образуется мутный расплав, а дальнейшее повышение температуры превращает этот расплав в прозрачную жидкость. При исследовании оптических свойств этого вещества было обнаружено, что при нагревании оно переходит из кристаллической фазы в жидкую через промежуточную форму с анизотропными оптическими свойствами. Интервал этого перехода достаточно велик и составляет 34 °С.

Однако холестерилбензоат – не уникальное вещество. Было найдено ещё много таких же веществ и было предложено дать им название «жидкие кристаллы» (ЖК), а саму анизотропную фазу назвать мезофазой (от греческого слова мезос – промежуточный).

Долгое время жидкие кристаллы оставались экзотическими объектами исследований физиков и химиков, но в 1963 г. в США был запатентован метод регистрации ИК (инфракрасного) и СВЧ (сверхвысокочастотного) излучений с помощью тонкой плёнки жидкого кристалла, который изменял цвет с нагреванием. Этот метод позволил создать производство надёжных и экономичных цифровых и буквенных индикаторов, основанных на том, что тонкий слой жидкого кристалла помещается в соответствующую плоскую ячейку с прозрачными электродами. Под влиянием электрического поля, подаваемого на электроды, ЖК изменяет свой цвет и тем самым вызывает индикацию. С этих пор ЖК находят все новые и зачастую неожиданные практические применения. В последнее время установлено, что ЖК имеют большое значение также и для решения фундаментальных проблем в биологии и медицине.

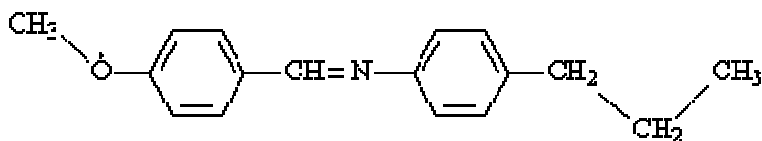
По своим общим свойствам ЖК можно разделить на две большие группы: 1) термотропные ЖК, образующиеся в результате нагревания твёрдого вещества и существующие в определённом интервале температур и давлений и 2) лиотропные ЖК, которые представляют собой двух- или более компонентные системы, образующиеся в смесях стержневидных молекул данного вещества и воды (или других полярных растворителей). Эти стержневидные молекулы имеют на одном конце полярную группу, а большая часть стержня представляет собой гибкую гидрофобную углеводородную цепь. Такие вещества называются амфифилами (амфи – по гречески означает с двух концов, филос – любящий, благорасположенный). Примером амфифилов могут служить фосфолипиды.

Амфифильные молекулы, как правило, плохо растворяются в воде, склонны образовывать агрегаты таким образом, что их полярные группы на границе раздела фаз направлены к жидкой фазе. При низких температурах смешивание жидкого амфифила с водой приводит к расслоению системы на две фазы. Одним из вариантов амфифилов со сложной структурой может служить система мыло–вода. Здесь имеется алифатический анион $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{n-2}-\text{CO}_2^-$ (где $n \sim 12 \dots 20$) и положительный ион Na^+ , K^+ , NH_4^+ и др. Полярная группа CO_2 стремится к тесному контакту с молекулами воды, тогда как неполярная группа (амфифильная цепь) избегает контакта с водой. Это явление типично для амфифилов.

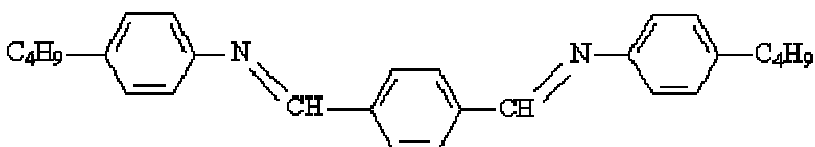
Термотропные ЖК подразделяются на три больших класса.

1. Нематические жидкие кристаллы. В этих кристаллах отсутствует порядок в расположении центров тяжести молекул, у них нет слоистой структуры, их молекулы скользят непрерывно в направлении своих длинных осей, вращаясь вокруг них, но при этом сохраняют ориентационный порядок: длинные оси направлены вдоль одного преимущественного направления. Они ведут себя подобно обычным жидкостям. Нематические фазы встречаются только в таких веществах, у молекул которых нет различия между правой и левой формами,

их молекулы тождественны своему зеркальному изображению (ахиральны). Примером вещества, образующего нематический ЖК, может служить N-(пара-метоксибензилиден)-пара-бутиланилин:



2. Сметические жидкие кристаллы имеют слоистую структуру, слои могут перемещаться друг относительно друга. Толщина сметического слоя определяется длиной молекул (преимущественно, длиной парафинового «хвоста»), однако вязкость сметиков значительно выше чем у нематиков и плотность по нормали к поверхности слоя может сильно меняться. Типичным является терефтал-бис (пара-бутиланилин):



3. Холестерические жидкие кристаллы – образуются, в основном, соединениями холестерина и других стероидов. Это нематические ЖК, но их длинные оси повернуты друг относительно друга так, что они образуют спирали, очень чувствительные к изменению температуры вследствие чрезвычайно малой энергии образования этой структуры (порядка 0,01 Дж/моль). В качестве типичного холестерика можно назвать амил-пара-(4-цианобензилиденамино)-циннамат.



Холестерики ярко окрашены и малейшее изменение температуры (до тысячных долей градуса) приводит к изменению шага спирали и, соответственно, изменению окраски ЖК.

Во всех приведённых типах ЖК характерным является ориентация дипольных молекул в определённом направлении, которое определяется единичным вектором \vec{n} , называемым «директором».

В недавнее время открыты так называемые колончатые фазы, которые образуются только дискообразными молекулами, расположенными слоями друг на друге в виде многослойных колонн, с параллельными оптическими осями. Часто их называют «жидкими нитями», вдоль которых молекулы обладают трансляционными степенями сво-

боды. Этот класс соединений был предсказан академиком Л.Д. Ландау, а открыт лишь в 1977 г. Чандрасекаром.

У ЖК необычные оптические свойства. Нематики и смектики оптически одноосные кристаллы. Холестерики вследствие периодического строения в видимой области спектра сильно отражают свет в видимой области спектра. Поскольку в нематиках и холестериках носителями свойств является жидкая фаза, то она легко деформируется под влиянием внешнего воздействия, а так как шаг спирали в холестериках очень чувствителен к температуре, то, следовательно, и отражение света резко меняется с температурой, приводя к изменению цвета вещества.

Эти явления широко используются в различных приложениях, например, для нахождения горячих точек в микроцепях, локализации переломов и опухолей у человека, визуализации изображения в инфракрасных лучах и др.

Характеристики многих электрооптических устройств, работающих на лиотропных ЖК, определяются анизотропией их электропроводности, которая, в свою очередь, связана с анизотропией электронной поляризуемости. Для некоторых веществ вследствие анизотропии свойств ЖК удельная электропроводность изменяет свой знак. Например, для *n*-октилоксибензойной кислоты она проходит через нуль при температуре 146 °С и связывают это со структурными особенностями мезофазы и с поляризуемостью молекул. Ориентация молекул нематической фазы, как правило, совпадает с направлением наибольшей проводимости.

Все формы жизни, так или иначе, связаны с деятельностью живой клетки, многие структурные звенья которой похожи на структуру жидких кристаллов. Обладая замечательными диэлектрическими свойствами, ЖК образуют внутриклеточные гетерогенные поверхности, они регулируют взаимоотношения между клеткой и внешней средой, а также между отдельными клетками и тканями, сообщают необходимую инертность составным частям клетки, защищая её от ферментативного влияния. Таким образом, установление закономерностей поведения ЖК открывает новые перспективы в развитии молекулярной биологии.

Жидкие кристаллы образуются из молекул, имеющих разную геометрическую форму (чаще всего – удлинённых или дискообразных). Электрическими межмолекулярными силами определяется характер «упаковки» молекул, то, как они геометрически соотносятся друг с другом.

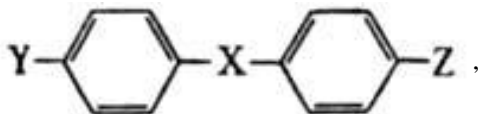
В нематических жидких кристаллах молекулы расположены параллельно или почти параллельно друг другу. Они могут двигаться во всех направлениях и вращаться вокруг своих продольных осей. Их можно уподобить карандашам в коробке: карандаши могут вращаться

и скользить вперед и назад, но должны оставаться параллельными друг другу.

Молекулярная упаковка смектиков (за исключением смектика *D*) даёт слоистую структуру с несколькими вариантами расположения молекул в слоях. Слои могут без помех скользить друг по другу. В наиболее распространённой упаковке продольные оси молекул направлены приблизительно под прямым углом к плоскости слоя. Каждая молекула может двигаться в двух измерениях, оставаясь в слое, и вращаться вокруг своей продольной оси. Расстояние между молекулами слоя может быть либо постоянным, либо беспорядочно меняющимся.

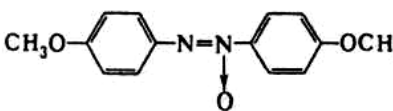
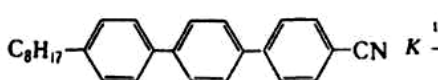
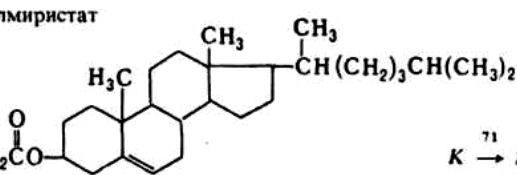
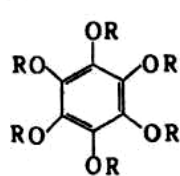
В жидких кристаллах холестерически-нематического класса молекулы упакованы в параллельных слоях так, что продольные оси всех молекул лежат в плоскости слоя. При этом «архитектура» молекулярной упаковки такова, что продольные оси молекул одного слоя повернуты на небольшой угол относительно молекул соседнего слоя. Это угловое смещение постепенно нарастает от слоя к слою как бы по спирали, один виток которой соответствует толщине слоя молекул.

Как и обычные жидкости, жидкие кристаллы обладают текучестью, но при этом для них характерно спонтанное появление анизотропии свойств (оптических, электрических, магнитных и др.) при отсутствии трёхмерного дальнего порядка в расположении частиц (атомов, молекул). Поэтому жидкокристаллическое состояние часто называют также мезоморфным (мезофазой). На диаграмме состояния температурный интервал существования жидких кристаллов ограничен температурой плавления твёрдых кристаллов и температурой просветления, при которой жидкокристаллические мутные образцы становятся прозрачными вследствие плавления мезофазы и превращения её в изотропную жидкость. Молекулы жидкокристаллических соединений обладают стержнеобразной или дискообразной формой и имеют тенденцию располагаться преимущественно параллельно друг другу. Термотропные жидкие кристаллы образуются при термическом воздействии на вещество. Такие жидкие кристаллы образуют производные ароматических соединений, содержащие чередующиеся линейные и циклические группировки (бензольные кольца). Жидкокристаллическая фаза образуется чаще всего в том случае, если заместители в молекуле располагаются в *para*-положении. Большое количество термотропных жидкокристаллических соединений может быть изображено общей формулой:



где X обычно $-\text{CH}=\text{N}-$; CH_2-CH_2- ; $\text{HC}=\text{CH}-$; $-\text{C}\equiv\text{C}-$; $-\text{C}(\text{O})-\text{NH}-$.

5. Жидкокристаллические фазы и температуры соответствующих переходов для некоторых соединений

Соединение	Тип жидких кристаллов и т-ры фазовых переходов, °С (цифры над стрелками)
<p>4,4'-Азоксанизол</p> <div style="text-align: center;">  </div>	$K \xrightarrow{116} N \xrightarrow{136} I$
<p>4-Циано-4'-октилтерфенил</p> <div style="text-align: center;">  </div>	$K \xrightarrow{127} S_E \xrightarrow{128} S_B \xrightarrow{133} S_A \xrightarrow{197} N \xrightarrow{216} I$
<p>Холестерилмиристат</p> <div style="text-align: center;">  </div>	$K \xrightarrow{71} S \xrightarrow{79} Ch \xrightarrow{85} I$
<p>Бензолгекса-<i>л</i>-гептаоат</p> <div style="text-align: center;">  <p style="text-align: center;">$R = C_7H_{15}C(O)$</p> </div>	$K \xrightarrow{81} D \xrightarrow{87} I$

Примечание. *K* – твёрдое кристаллическое состояние, *I* – изотропная жидкость (расплав), *N* – нематики, *S*, *S_A*, *S_B*, *S_F* – смектики, *D* – дискотики, *Ch* – холестерики.

Концевыми группами *Y* и *Z* бывают алкильные и алкоксильные группировки, галогены, циано-, нитро- и аминогруппы и др. Примеры некоторых жидких кристаллов приведены в табл. 5. Часто жёсткие

фрагменты молекул, цикличные группировки, определяющие существование мезофазы, называют «мезогенными». Наличие разветвлений в молекулах приводит к сужению температурного интервала существования мезофазы.

Лиотропные жидкие кристаллы образуются при растворении некоторых веществ в определённых растворителях. Например, водные растворы мыл, полипептидов, липидов, белков, ДНК и др. образуют жидкие кристаллы в определённом интервале концентраций и температур. Структурными единицами лиотропных жидких кристаллов являются надмолекулярные образования различных типов, распределённые в среде растворителя и имеющие цилиндрическую, сферическую или другую формы.

Как показано ранее, в зависимости от характера расположения стержнеобразных молекул различают три основных типа жидких кристаллов – смектический, нематический и холестерический. В смектических жидких кристаллах (их называют смектиками, обозначают S) молекулы располагаются в слоях. Центры тяжести удлинённых молекул находятся в равноотстоящих друг от друга плоскостях и подвижны в двух измерениях (на смектической плоскости). Длинные оси молекул могут располагаться как перпендикулярно к плоскости смектического слоя (ортогональные смектики, рис. 25, а), так и под некоторым углом к слою (наклонные смектики, рис. 25, б).

Кроме того, возможно упорядоченное и неупорядоченное расположение молекул в самих слоях. Все это обуславливает возможности образования различных полиморфных модификаций. Известно свыше десятка полиморфных смектических модификаций, обозначаемых буквами латинского алфавита, смектики А, В, С и т.д. (или S_A, S_B, S_C и т.д.).

Формирование смектических фаз характерно для жидкокристаллических соединений, молекулы которых содержат длинные концевые алкильные или алкоксильные группы Y и Z с числом атомов углерода 4 – 6. Нематические жидкие кристаллы (нематики N) характеризуются наличием ориентационного порядка, при котором длинные оси молекул расположены однонаправленно при беспорядочном расположении центров тяжести молекул (рис. 25, в). Нематические жидкие кристаллы образуют соединения, в молекулах которых имеются короткие алкильные или алкоксильные группы (число атомов углерода – 3).

Холестерический тип мезофазы (холестерики Chol) образуется двумя группами соединений: производными оптически активных стероидов (холестерина, отсюда название) и нестероидными соединениями, принадлежащими к тем же классам, которые образуют нематические жидкие кристаллы, но обладающими хиральностью (алкил-, алкокси-, ацилоксизамещённые азометины, производные коричной кислоты, азо- и азоксисоединения и др.). В холестерических жидких кристаллах молекулы расположены так же, как в нематических, но в каждом слое молекулы повернуты относительно их расположения в соседнем слое на определённый угол. В целом реализуется структура, описываемая спиралью (рис. 26).

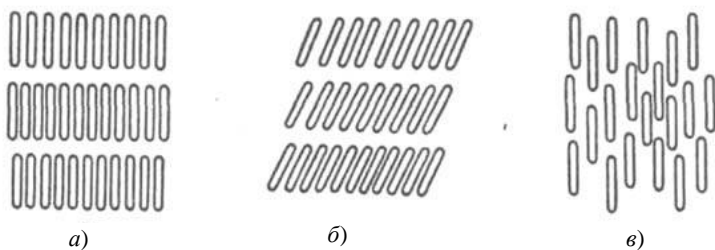


Рис. 25. Структура смектических (*a* и *б*) и нематических (*в*) жидких кристаллов (*a* – ортогональное, *б* – наклонное расположение молекул)

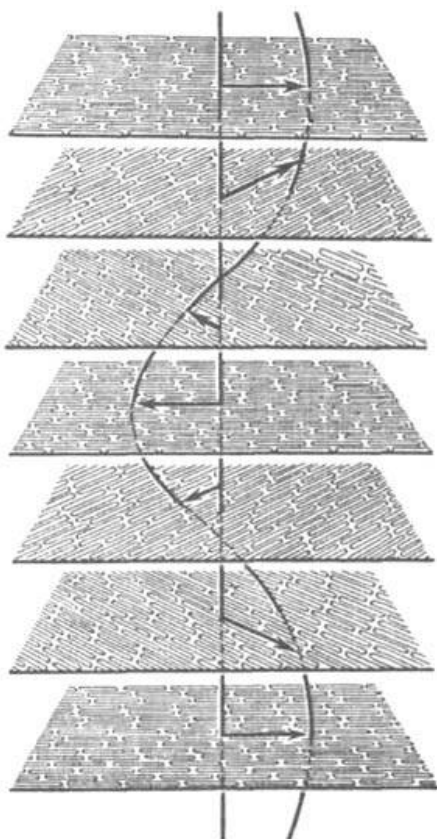


Рис. 26. Структура холестерических жидких кристаллов (пунктиром изображён шаг спирали; стрелки указывают направление длинных осей молекул)

Вещества с дискообразными молекулами (дискотики D) могут образовывать жидкие кристаллы, в которых молекулы упакованы в колонки (имеется дальний порядок в ориентации плоскостей дискообразных молекул) или расположены так же, как в нематиках (дальний порядок отсутствует) (рис. 27, *a* и *b*). Своеобразная структура жидкокристаллических соединений, обеспечивающая сочетание упорядоченности в расположении молекул с их высокой подвижностью, определяет широкие области практического использования жидких кристаллов. Направление ориентации молекул, характеризующее аксиальным единичным вектором, или директором, может легко изменяться под воздействием различных внешних факторов – температуры, механических напряжений, напряжённости электрических и магнитных полей.

Непосредственная причина ориентации или переориентации директора – анизотропия вязкоупругих, оптических, электрических или магнитных свойств среды. В свою очередь, изменение преимущественной ориентации молекул вызывает изменение оптических, электрических и других свойств жидких кристаллов, т.е. создаёт возможность управления этими свойствами посредством сравнительно слабых внешних воздействий, а также позволяет регистрировать указанные воздействия.

Электрооптические свойства нематических жидких кристаллов широко используют в системах обработки и отображения информации, в буквенно-цифровых индикаторах (электронные часы, микрокалькуляторы, дисплеи и т.п.), оптических затворах и других светоклапанных устройствах. Преимущества этих приборов – низкая потребляемая мощность (порядка $0,1 \text{ мВт/см}^2$), низкое напряжение питания (несколько вольт), что позволяет, например, сочетать жидкокристаллические дисплеи с интегральными схемами и тем самым обеспечивать миниатюризацию индикаторных приборов (плоские телевизионные экраны). Спиральная структура холестериков определяет их высокую оптическую активность (которая на несколько порядков выше, чем у обычных органических жидкостей и твёрдых кристаллов) и способность селективно отражать циркулярно поляризованный свет видимого, ИК- и УФ-диапазонов. При изменении температуры, состава среды, напряжённости электромагнитного поля изменяется шаг спирали, что сопровождается изменением оптических свойств, в частности цвета. Это позволяет измерять температуру тела по изменению цвета жидких кристаллов, контактирующих с поверхностью тела. Жидкокристаллическая термография используется в технике для визуализации ИК, СВЧ-излучений, в качестве неразрушающих методов контроля в микроэлектронике и др., в медицине – для диагностики ряда сосудистых и острых воспалительных заболеваний. Особое место среди жидкокристаллических веществ занимают полимеры. Термотропные полимерные жидкие кристаллы получают «химическим включением» мезогенных групп в состав линейных и гребнеобразных макромолекул.

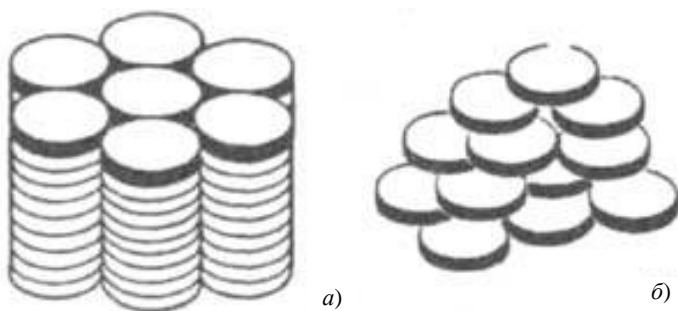


Рис. 27. Структура дискотических жидких кристаллов:
a – колончатая фаза; *б* – нематическая фаза

Это позволяет не только значительно увеличить количество жидкокристаллических веществ, но и существенно расширить общие представления о природе жидкокристаллического состояния. На основе полимеров можно получать жидкокристаллические стёкла, плёнки, волокна и покрытия с заданными анизотропными свойствами. Мезогенные группы макромолекул легко ориентируются в мезофазе под действием внешних полей (механических, электрических, магнитных), а при последующем охлаждении полимера ниже температуры стеклования полученная анизотропная структура фиксируется в твёрдом состоянии. Использование лиотропного жидкокристаллического состояния на стадии переработки жёсткоцепных полимеров – новый путь получения высокопрочных высокомолекулярных полимерных материалов. Число описанных жидких кристаллов превышает десятки тысяч и непрерывно увеличивается.

6. ДИСПЛЕИ НА ОСНОВЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

Для отображения информации в большинстве современных устройств используются дисплеи, содержащие в своей основе ту или иную вариацию жидкокристаллического вещества. Появление дисплеев на основе жидких кристаллов стало возможным благодаря работам австрийского ботаника Фридриха Рейнитзера (Friedrich Reinitzer). В ходе исследований в 1888 г. вещества, известного как *cholesteryl benzoate*, он обнаружил, что оно имеет две явные точки плавления. В своём эксперименте он увеличивал температуру твёрдого образца и наблюдал превращение кристалла в мутную жидкость. Дальнейшее увеличение температуры приводило к появлению чистой прозрачной жидкости, пропускающей свет. Благодаря этой ранней работе считается, что именно Рейнитзер открыл новую жидкокристаллическую фазу материи. Через много лет, в 1968 г., фирмой RCA был создан первый экспериментальный жидкокристаллический индикатор (ЖКИ).

Для ясного понимания технологических особенностей создания современных ЖК-дисплеев следует коротко остановиться на основных свойствах жидких кристаллов. Жидкие кристаллы (ЖК) уникальны по своим свойствам и возможностям использования. Они представляют собой почти прозрачные субстанции, проявляющие одновременно свойства кристалла и жидкости. Есть две главные особенности ЖК, благодаря которым возможно создание на их основе устройств отображения информации: способность молекул ЖК переориентироваться во внешнем электрическом поле и изменять поляризацию светового потока, проходящего через их слои.

В основе любого ЖК-дисплея лежит конструктивный принцип, проиллюстрированный на рис. 28. Основой для последующих слоёв ЖКИ являются две параллельные стеклянные пластины с нанесёнными на них поляризационными плёнками. Различают верхний и нижний поляризаторы, сориентированные перпендикулярно друг другу. На стеклянные пластины в тех местах, где в дальнейшем будет формироваться изображение, наносится прозрачная металлическая окисная плёнка (оксиды индия и олова – ИТО), которая в дальнейшем служит электродами. На внутреннюю поверхность стёкол и электроды наносятся полимерные выравнивающие слои, которые затем полируются, что способствует появлению на их поверхности, соприкасающейся с ЖК, микроскопических продольных канавок. Пространство между выравнивающими слоями заполняют ЖК веществом. В результате молекулы ЖК выстраиваются в направлении полировки выравнивающего

слоя. Направления полировки верхнего и нижнего выравнивающих слоёв перпендикулярны (подобно ориентации поляризаторов). Это нужно для предварительного "скручивания" слоёв молекул ЖК на 90° между стёклами, как показано в левой части рис. 28. Когда напряжение на управляющие электроды не подано, поток света, пройдя через нижний поляризатор, двигается через слои жидких кристаллов, которые плавно меняют его поляризацию, поворачивая её на угол 90° . В результате поток света после выхода из ЖК материала беспрепятственно проходит через верхний поляризатор (сориентированный перпендикулярно нижнему) и попадает к наблюдателю. Никакого формирования изображения не происходит. При подаче напряжения на электроды между ними создаётся электрическое поле, что вызывает переориентацию молекул ЖК (правая часть на рис. 28). Молекулы стремятся выстроиться вдоль силовых линий поля в направлении от одного электрода к другому. Вследствие этого пропадает эффект «скручивания» поляризованного света, под электродом возникает область тени, повторяющая его контуры. Создаётся изображение, формируемое светлой фоновой областью и тёмной областью под включённым электродом. Путём варьирования контуров площади, занимаемой электродом, можно формировать самые различные изображения: буквы, цифры, иконки и пр. Так создаются символьные ЖКИ. А при создании массива электродов (ортогональной матрицы) можно получить графический ЖКИ с разрешением, определяемым количеством задействованных электродов.

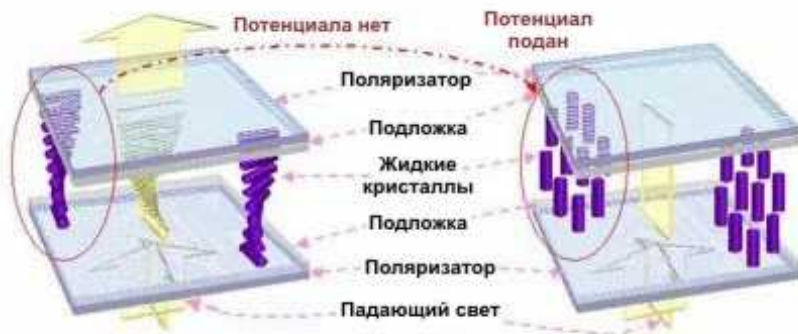


Рис. 28. Прохождение света через ЖКИ

Описанная конструкция ЖКИ представляет собой пассивный вариант дисплея. В зависимости от разновидности применённых в дисплее жидких кристаллов различают следующие типы ЖКИ: TN, STN, CTN, FSTN, HTN, DSTN и ECB (VAN). Отличительные особенности этих дисплеев отражены в табл. 6.

Для производства больших цветных дисплеев в настоящее время широко используются ЖКИ на основе TFT (тонкоплёночные транзисторы). Сечение TFT-панели показано на рис. 29. В основе структуры TFT-панели содержатся жидкие кристаллы, два поляризатора и две стеклянные пластины: верхняя подложка цветового фильтра и нижняя подложка массива TFT. Жидкокристаллическое вещество впрыскивается между этими стеклянными пластинами. Регулирование светового потока осуществляется путём изменения величины входного напряжения, подаваемого на ЖК. Тем самым изменяется расположение и ориентация ЖК-молекул, что приводит к соответствующему изменению объёма светового потока, проходящего через них.

При изготовлении такой панели с помощью высокоточных фотолитографических технологий на стеклянную подложку наносится узор для последовательного пошагового переноса изображений множества электродов ЖКИ (рис. 30). Количество транзисторов на стекле TFT равно числу подпикселей дисплея, при этом генерацию цвета обеспечивает стекло цветового фильтра с нанесённым на него фильтром цвета. Движение жидких кристаллов вызывается появлением разности потенциалов между электродами, находящимися на стекле TFT и стекле цветового фильтра, и именно это движение приводит к генерации цвета и изменению яркости ЖКИ.

6. Основные параметры и характерные особенности различных технологий изготовления ЖКИ

Технология	Угол обзора, град	Мультиплексное отношение	Время срабатывания	Особенности	Область применения
TN (скрученный нематик)	45 (тип.)	64:1	150 мс при 4,7 В	Самая низкая стоимость	Повсеместно в недорогих изделиях с низкими требованиями к читабельности изображения

Технология	Угол обзора, град	Мультиплексное отношение	Время срабатывания	Особенности	Область применения
STN (нематрики с суперскручиванием)	75 (тип.), 90 максимум	до 480:1	250 мс при 4,5 В	Подходит для отображения графики	Повсеместно в изделиях с повышенными требованиями к читабельности изображения
CTN (многоцветные скрученные нематрики)	–	1/8	–	Широкий диапазон рабочих температур (–30...+80 °С)	Автомобильные дисплеи (с максимальным количеством различных цветов равным трём)
FSTN (суперскрученный нематик с плёночной компенсацией)	80 (тип.)	до 480:1	250 мс при 4,5 В	Улучшенный в сравнении с STN угол обзора	Повсеместно в изделиях с повышенными требованиями к читабельности изображения
HTN (сильноскрученный нематик)	65 (тип.)	–	50 мс	Низкое рабочее напряжение (2,5 В) и низкая стоимость	Идеальны для использования в переносных устройствах с батарейным питанием

Технология	Угол обзора, град	Мультиплексное отношение	Время срабатывания	Особенности	Область применения
DSTN (сдвоенные ячейки, заполненные суперскрученным нематиком)	Превышает показатели дисплеев с STN	до 480:1	Превышает показатели дисплеев с STN	Диапазон рабочих температур от -30 до $+80$ °С	Идеальны для автомобильной электроники
ЕСВ, VAN (электронно-управляемое двойное лучепреломление или вертикально выровненный нематик)	—	—	Около 250 мс	Очень узкий диапазон рабочих температур	Малое быстродействие и узкий температурный диапазон не позволяют использовать эти устройства в автомобильной технике и видеосистемах

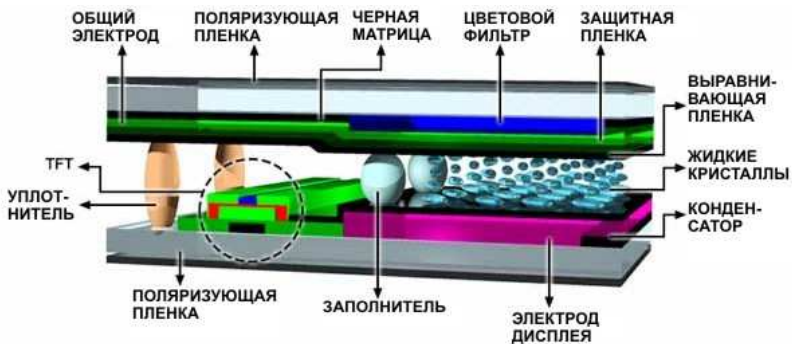


Рис. 29. Сечение TFT панели

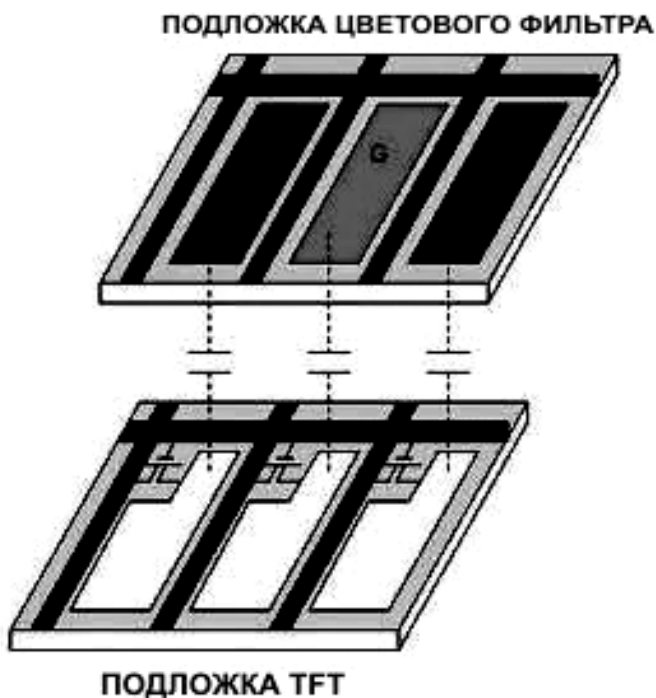


Рис. 30. Стекло́нные подложки TFT и цвето́вого фильтра

На рисунке 31 показан принцип управления ячейкой ЖК-матрицы. В пределах одного выбранного периода времени переключатель замыкается и на ЖК подается входное напряжение, что приводит к изменению ориентации жидкокристаллических молекул. После выключения переключателя в ёмкости C_{lc} (эквивалентная ёмкость ЖК-вещества) сохраняется некоторый заряд, уменьшающийся с течением времени. Для увеличения продолжительности хранения заряда параллельно C_{lc} добавляется запоминающий конденсатор C_{st} . Поскольку фактически управление жидкими кристаллами производится переменным напряжением, для активации ЖК напряжение подаётся только при включённом переключателе, после чего он немедленно отключается. В ряде случаев напряжение на ЖК будет падать из-за утечек. Для предотвращения этого и используется дополнительный конденсатор C_{st} , компенсирующий утечки. При достаточной его ёмкости напряжение на нём будет приближаться к идеальной форме меандра (рис. 32).

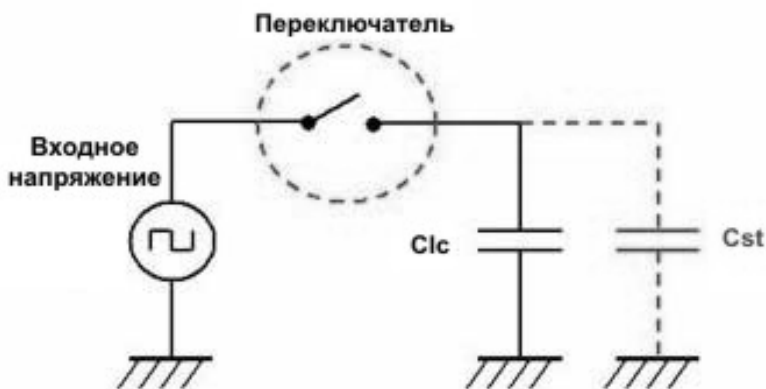


Рис. 31. Схема управления ячейкой ЖК-матрицы



Рис. 32. Компенсирующее действие запоминающего конденсатора

В TFT-панели тонкоплёночный транзистор выполняет функцию рассмотренного переключателя. Вывод затвора TFT подключён к линии сканирования, вывод истока соединён с линией данных, а вывод стока с $C1c$ и Cst (рис. 33). Когда затвор активизирован (выбран на линии сканирования), канал TFT открывается и данные об изображении записываются в $C1c$ и Cst . Если затвор не выбран, TFT закрыт.

Формирование цвета в TFT-панели происходит при прохождении светового потока через цветовой фильтр, интегрированный в верхнее цветное стекло. Каждый отдельный пиксель изображения формируется при смешивании базовых цветовых элементов RGB.

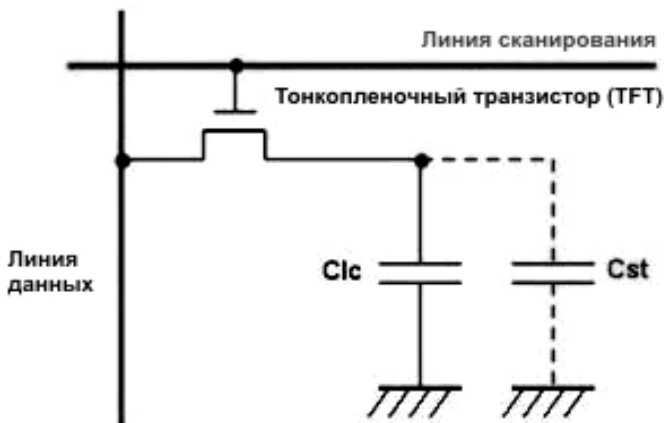


Рис. 33. Схема ячейки TFT-панели



Рис. 34. Формирование цвета

Если красный, зелёный и голубой элементы пикселя выбраны в равной пропорции, будет сформирован белый свет. Путём регулировки соотношения светопропускания этих трёх элементов получают необходимое количество разнообразных цветов (рис. 34).

Технология LTPS TFT. LTPS (низкотемпературная поликремневая) технология – это новейший производственный процесс изготовления TFT-панелей. В этой технологии используется лазерный отжиг, который позволяет производить кристаллизацию кремниевой плёнки при температуре менее 400 °С. Поликристаллический кремний – материал на основе кремния, содержащий множество кристаллов кремния размером от 0,1 до нескольких микрон. При производстве полупроводников поликристаллический кремний обычно изготавливается при помощи LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition – химическое осаждение при низком давлении из газообразной фазы), а затем отжигается при температуре более 900 °С. Этот метод известен как SPC (Solid Phase Crystallization – кристаллизация твёрдой фазы). Очевидно, что такой метод не удастся применить при производстве индикаторных панелей, поскольку температура плавления стекла составляет 650 °С. Поэтому для создания ЖК-панелей идеально подходит новая низкотемпературная технология LTPS.

В настоящее время для формирования LTPS плёнки используется несколько методов, среди которых наибольшую популярность приобрел метод лазерного отжига. В качестве источника энергии в этом случае используется эксимерный лазер. Он нагревает и расплавляет a-Si (аморфный кремний) с низким содержанием водорода, после чего кремний повторно кристаллизуется в виде p-Si (поликристаллической плёнки). Подготовка LTPS плёнки более сложна, чем a-Si плёнки, однако LTPS TFT имеют в 100 раз большую текучесть, чем a-Si TFT, что позволяет перенести КМОП-процесс непосредственно на стеклянную подложку. В результате технология p-Si приобретает следующие основные преимущества по сравнению с a-Si-технологией.

1. Подвижность электронов в тонкоплёночных транзисторах, изготовленных по технологии LTPS, достигает $\sim 200 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, что намного выше, чем у транзисторов a-Si технологии (всего около $0,5 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$). Повышенная подвижность электронов позволяет увеличить степень интеграции формируемой на подложке ЖКИ интегральной схемы и уменьшить размеры самого тонкоплёночного транзистора.

2. Достигается более высокий апертурный коэффициент (отношение полезной площади ячейки к её полной площади). Так как TFT-транзистор LTPS ЖКИ имеет меньший размер, чем транзистор a-Si, полезная площадь ячейки, а, следовательно, и апертурный коэффициент такого ЖКИ будут выше (рис. 35). В результате при прочих равных условиях яркость свечения ячейки LTPS-ЖКИ пропорционально возрастёт.

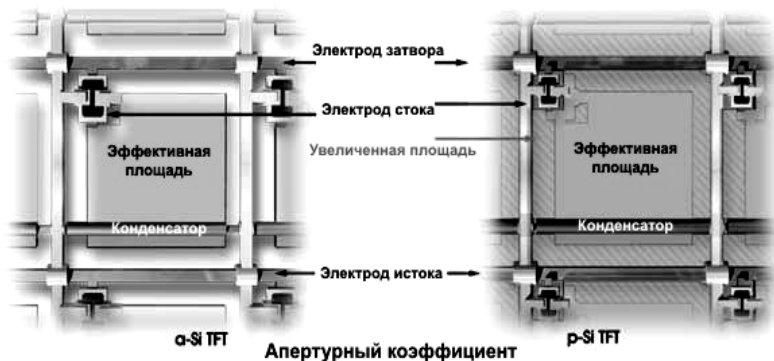


Рис. 35. Различия величины апертурного коэффициента у a-Si и p-Si-технологий

3. LTPS-технология позволяет формировать в едином цикле непосредственно на подложке ЖКИ интегральные схемы драйверов. Это позволяет существенно снизить количество необходимых внешних контактов и уменьшить размеры самой подложки, что ведёт к повышению надёжности устройства и снижению стоимости конечного изделия.

Дисплеи на основе органических плёнок (OLED). Сравнительно недавно на рынке появились дисплеи нового, отличного от ЖКИ типа, так называемые OLED (Organic Light Emitting Device). Дисплей OLED представляет собой электронное устройство, выполненное путём размещения ряда тонких органических плёнок между проводниками. При подключении источника питания к выбранным элементам дисплея они излучают яркий свет (рис. 36). Технология OLED идеально подходит для изготовления дисплеев, используемых в портативных устройствах, позволяя создавать лёгкие, надёжные и малопотребляющие дисплеи. Для получения OLED-дисплеев требуется меньшее число производственных этапов и более дешёвые материалы, в сравнении с ЖКИ. Ведущий лидер в производстве таких дисплеев, корпорация Universal Display (UDC), полагает, что технология OLED может заменить существующие технологии создания дисплеев во многих областях за счёт следующих преимуществ перед ЖКИ:

- Более высокая яркость;
- Более высокое быстродействие, улучшающее качество отображения и динамику видеоизображений;
- Расширенный угол обзора (до 180°);

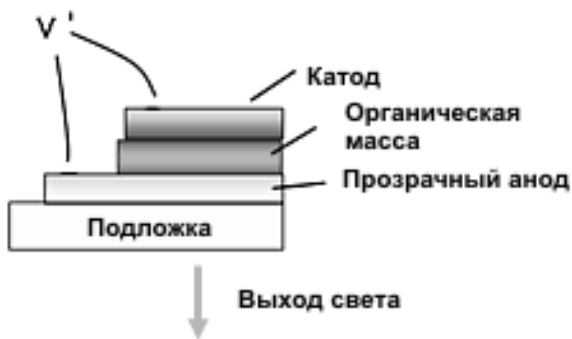


Рис. 36. Структура (ячейки) OLED-дисплеев

- Малый вес;
- Меньшее энергопотребление;
- Более широкий диапазон рабочих температур;
- Меньшая совокупная стоимость.

Столь впечатляющие характеристики своих OLED-дисплеев компания UDC достигла благодаря разработке особого семейства высокоэффективных OLED-материалов. Их ключевой особенностью является использование для излучения света процесса электрофлуоресценции. В традиционных OLED-дисплеях излучение света основано на флуоресценции – переходе от одного возбуждённого состояния материала. В соответствии с теоретическими и экспериментальными оценками максимальная эффективность OLED с добавлением флуоресцентных материалов может составить около 25%. Это ограничение практически снимается при использовании в качестве добавок электрофлуоресцентных материалов компании UDC, которым присуще как одиночное, так и тройное возбуждённое состояние. Учитывая, что эффективность таких материалов приближается к 100%, компания UDC работает над созданием и продвижением на рынок электрофлуоресцентных устройств, оптимизируя такие их характеристики, как чистоту цвета, надёжность функционирования и механическую прочность.

OLED-дисплеи могут быть выполнены на основе пассивной или активной матрицы.

Пассивная матрица дисплея состоит из массива отображающих элементов и пикселей, расположенных на поверхности по строкам и столбцам (рис. 37). В OLED-дисплее каждый пиксель является органическим светодиодом, образованным на пересечении каждой линии строки и столбца. Первые OLED, так же как и первые ЖКИ адресовались как пассивная матрица. Это означает, что для активизации пиксе-

ля необходимо приложить напряжение к линиям строки и столбца, на пересечении которых находится нужный пиксель. Чем больший ток протекает через каждый пиксель, тем больше яркость наблюдаемого свечения.

В дисплее с активной матрицей массив также разделяется на строки и столбцы с пикселями, образуемыми на пересечении линий строк и столбцов. Однако здесь каждый пиксель состоит из органического светодиода (OLED), включённого последовательно с тонкоплёночным транзистором (TFT), выполняющим функцию коммутатора, регулирующего уровень тока через OLED (рис. 38).

В активной матрице OLED-дисплея (AMOLED) информация посылается микротранзистору каждого пикселя, задавая яркость его свечения. TFT-транзистор запоминает эту информацию и плавно регулирует ток через OLED. На рисунке 39 показан образец таких дисплеев.

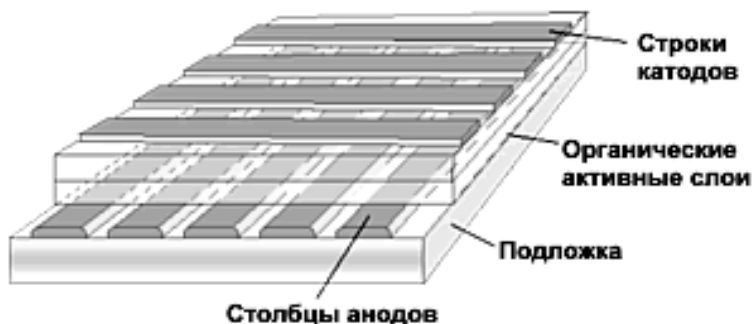


Рис. 37. Пассивная матрица OLED

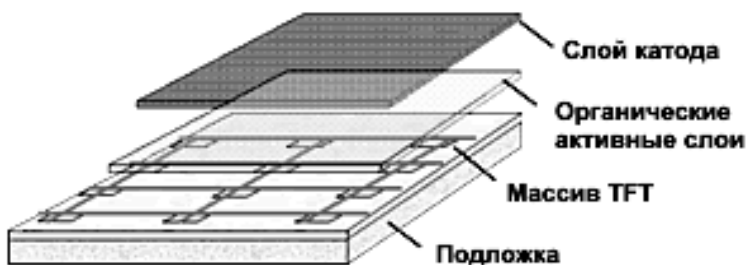


Рис. 38. Активная матрица OLED



Рис. 39. OLED-дисплей Universal Display Corp

Компания UDC предлагает несколько разновидностей OLED-дисплеев:

- TOLED – прозрачные органические светоизлучающие устройства;
- FOLED – гибкие органические светоизлучающие устройства;
- SOLED – сложенные органические светоизлучающие устройства.

В дисплеях TOLED используется прозрачная основа, что позволяет создавать дисплеи с излучением только вверх, только вниз или в оба направления. Технология TOLED позволяет получать высококонтрастные изображения, что улучшает читаемость дисплея при ярком солнечном свете. Поскольку TOLED имеет 70% прозрачности в выключенном состоянии, он может быть интегрирован в автостёкла в качестве табличек или указателей. Прозрачность дисплеев TOLED даёт возможность использовать их с непрозрачными подложками из металла, фольги или кремниевого кристалла, что позволяет создавать дисплеи с отображением только вперед. Простой TOLED дисплей может быть потенциально встроен в будущие динамические кредитные карты. За счёт использования поглотителя с низким коэффициентом отражения (чёрный фон) позади верхней или нижней поверхности TOLED контрастное отношение может быть значительно улучшено по сравнению с отражающими ЖКИ и OLED. Это особенно важно в приложениях, работающих при дневном свете, например в мобильных телефонах и кабинах авиационной техники.

Встраивая органическую плёнку в гибкую поверхность, производители получают исключительные по своим качествам гибкие дисплеи – FOLED (рис. 40). Плоские отображающие панели традиционно выпус-

каются на стеклянной основе вследствие структурных ограничений и/или ограничений технологического процесса. Гибкие материалы обладают существенными преимуществами в сравнении со стеклянной основой. Впервые дисплеи могут быть выполнены на разнообразных типах подложек: от прозрачных тонких плёнок до отражающей металлической фольги. Эти материалы позволяют изгибать и скручивать дисплеи, приспособливая их к любой поверхности. Это означает, что FOLED-дисплеи можно встроить в шлем, в рукав рубашки солдата, в приборную панель самолета или на стекло окна автомобиля. Использование тонких пластиковых подложек также существенно уменьшает вес тонких отображающих панелей в сотовых телефонах, портативных компьютерах и, особенно, в массовой сфере настенного телевидения. Дисплеи FOLED обладают повышенной стойкостью к изломам, устойчивостью к внешним воздействиям и более длительным сроком службы по сравнению с аналогами на стеклянной основе.

По заявлениям компании UDC, её партнеры по исследованиям в области технологии производства FOLED разработали эффективный процесс фазового смещения органического пара (OVPD), позволяющий создавать FOLED в технологическом цикле «рулон к рулону». Этот процесс отвечает потребностям массового производства и позволяет выпускать дисплеи на основе OLED наименьшей стоимости по сравнению с большинством плоских отображающих панелей, изготовленных по другим технологиям.

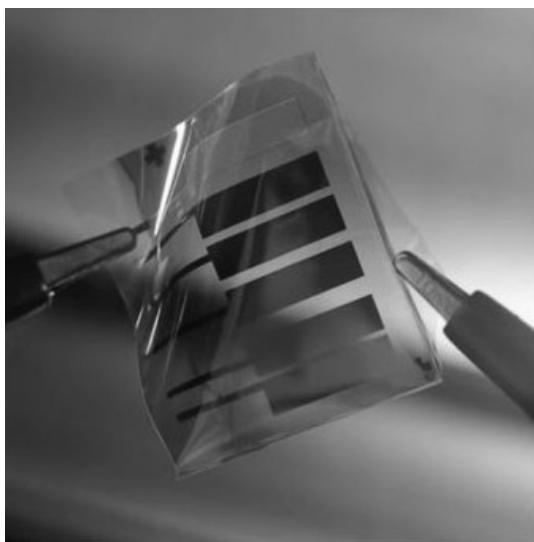


Рис. 40. Гибкие дисплеи FOLED

Дальнейшее развитие OLED-дисплеев привело к появлению так называемых «сложенных OLED» (SOLED). В них используется принципиально новая архитектура организации пикселя, разработанная компанией Universal Display. В дисплеях SOLED пиксель представляет собой вертикальную структуру расположенных друг над другом красного, зелёного и синего подпикселей, что отличается от расположения подпикселей в одной плоскости один возле другого, как в обычных дисплеях на основе ЭЛТ или ЖКИ. Это улучшает разрешающую способность дисплея в три раза и повышает качество цветопередачи. Для отдельной регулировки цвета и яркости каждый красный, зелёный и синий (R-G-B) подпиксельные элементы управляются индивидуально. Задание цвета выполняется за счёт регулировки уровня тока в этих трёх элементах. Регулировка яркости осуществляется путём изменения общего тока через сток ячейки. Получение градаций серого выполняется за счёт широтно-импульсной модуляции сигналов, подаваемых на подпиксели. Технология SOLED компании UDC является первой демонстрацией вертикально-интегрированной структуры, в которой цвет, яркость и шкала серого могут настраиваться независимо, обеспечивая полноцветное изображение с высоким разрешением.

Важной особенностью SOLED является очень высокий коэффициент заполнения, достигающий 100%. Например, когда у классического полноцветного дисплея устанавливается зелёный цвет, красный и синий подпиксели отключаются. Напротив, при тех же условиях у структуры SOLED все пиксели станут зелёными. Это означает, что архитектура SOLED обеспечивает лучшую цветопередачу и качество отображения. Ещё одной особенностью SOLED является равномерность цветопередачи при увеличении размера пикселя. Это важно для больших дисплеев, в которых пиксели имеют достаточные размеры, чтобы их можно было увидеть с малого расстояния. В традиционных ЭЛТ и ЖКИ дисплеях глаз с близкого расстояния может увидеть отдельные красный, зелёный и синий цвета вместо эквивалентной смеси. У SOLED-дисплеев каждый пиксель излучает желаемый цвет, и поэтому цвет пикселя правильно воспринимается независимо от его размера и расстояния, с которого он наблюдается.

Впечатляющие достижения в области создания новейших дисплейных технологий демонстрирует южнокорейская компания Samsung Electronics. В январе 2005 года она объявила о создании самого большого в мире дисплея OLED с диагональю 21 дюйм. Представленная модель имеет малое время отклика, яркость 400 кд/м², контрастность 5000:1 и поддерживает разрешение WUXGA (1920×1200 пикселей). Дисплей с такими характеристиками прекрасно подходит для использования в телевизорах высокой чёткости, а поскольку при его изготовлении применялась хорошо отработанная инженерами компании технология аморфного кремния, следует ожидать быстрого выхода этого изделия на массовый рынок по конкурентоспособной цене.

7. ЛАЗЕРЫ

7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЛАЗЕРАХ

Лазеры были изобретены в 1960 г. Басовым и Прохоровым (СССР) и Таунсом (США). Принципиальная схема лазера включает в себя активную среду (1), усиливающую (генерирующую) излучение, резонатор (2, 2'), состоящий из двух зеркал, одно из которых полупрозрачное (2') и устройство накачки (3) энергии в активную среду (рис. 41).

Активная среда может быть газообразной, жидкой, твёрдотельной либо представлять собой плазму, релятивистский электронный поток. Главное, чтобы активная среда обладала инверсной населённостью излучателей, т.е. большинство излучателей должно находиться в возбуждённом состоянии [1].

Согласно распределению Больцмана число излучателей, находящихся в возбуждённом состоянии N_2 в инвертированной среде, равно:

$$N_2 = N \exp\left(-\frac{E_2}{kT}\right),$$

а в основном (невозбуждённом) состоянии

$$N_1 = N \exp\left(-\frac{E_1}{kT}\right),$$

где $N = N_1 + N_2$ – общее число излучателей, $E_1 < E_2$ – энергия излучателей. При $N_2 > N_1$

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT^*}\right) > 1,$$

если эффективная температура среды $T^* < 0$.

Инверсная населённость активной среды (т.е. её отрицательная эффективная температура) создаётся в результате накачки энергии в среду от внешнего источника. Например, накачку осуществляют при пропускании электрического тока через активную среду, с помощью вспышки мощной лампы, в результате химических реакций, с помощью ускорения электронного потока и т.п.

Первичный световой (или микроволновой, рентгеновский) поток генерируется излучателями в активной среде в результате спонтанного излучения. Фотоны, распространяющиеся вдоль оси резонатора, отражаются от зеркал и многократно проходят через активную среду. При этом они стимулируют излучение возбуждённых излучателей. излу-

ченные в результате индуцированных процессов фотоны имеют точно такую же частоту (энергию), а волновой вектор (импульс) и поляризацию, как и первичные фотоны. Световой поток частично выводится через полупрозрачное зеркало. Лазерное излучение обладает высокой степенью когерентности, так как частота излучателей одинакова, а разность фаз остаётся постоянной во времени. Последнее объясняется тем, что в резонаторе формируется стоячая волна, возникающая при интерференции прямой и обратной волн. Таким образом, резонатор осуществляет обратную связь излучателей. Фотоны, излучаемые под большими углами к оси резонатора, покидают активную среду. Эта часть излучения активной среды некогерентна. При отражении от зеркал излучение частично ослабляется, кроме этого имеются потери в результате рассеяния в среде и дифракции. Для работы лазера в режиме когерентной генерации необходимо, чтобы усиление излучения за один проход превосходило потери, включая лазерное излучение [2].

Угол расходимости лазерного излучения минимальный, он обусловлен дифракцией, главным образом, на зеркалах, а также в активной среде. Цикл работы лазера включает два последовательных отражения от зеркал с эффективными коэффициентами отражения ρ_1 и ρ_2 , учитывающими все потери. Ослабление потока пропорционально $\rho_1\rho_2$ на пути $2L$ за один цикл. Согласно закону Бугера-Ламберта интенсивность светового потока, прошедшего слой L в среде, равна:

$$I = I_0 e^{\alpha L}.$$

Усиление светового потока за один цикл равно

$$I = I_0 \rho_1 \rho_2 e^{2\alpha L} = I_0 \exp[2\alpha L - \ln(\rho_1 \rho_2)].$$

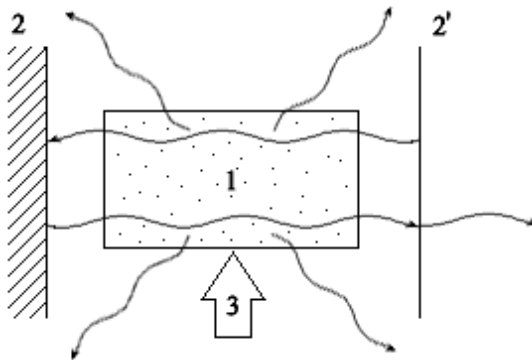


Рис. 41. Принципиальная схема лазера

Генерация лазерного излучения возникает при $2\alpha L > \ln(\rho_1\rho_2)$, т.е. порог генерации $\alpha_0 = \frac{\ln(\rho_1\rho_2)}{2L}$.

Добротность лазера

$$Q = \frac{W}{\delta W},$$

где $W = wSL$ – запасённая в резонаторе энергия; δW – потери энергии за одно колебание. Учитывая, что $\Delta W = \frac{1}{2} wSL[1 - \exp(-\ln(\rho_1\rho_2))]$ – потери энергии за цикл, w – плотность энергии прямого и обратного потоков, время цикла $t = \frac{2L}{v}$, период лазерного излучения $T = \frac{2\pi}{\omega}$, тогда за одно колебание потери энергии составляют

$$\delta W = \frac{\Delta W}{2L/v} T = \frac{wSLvT}{4L} \left(1 - \frac{1}{e^{\ln(\rho_1\rho_2)}} \right) \approx \frac{1}{4} wvST \ln(\rho_1\rho_2),$$

так как $\exp[-\ln(\rho_1\rho_2)] \approx 1 - \ln(\rho_1\rho_2)$. Отсюда добротность

$$Q = \frac{wSL}{\frac{1}{4} wSvT \ln(\rho_1\rho_2)} = \frac{4L}{\lambda \ln(\rho_1\rho_2)} = \frac{m}{\ln(\rho_1\rho_2)},$$

где $m = \frac{2L}{(\lambda/2)}$ – число полуволн (стоячей волны) в резонаторе, $\lambda = vT$.

Порог генерации через добротность лазера

$$\alpha_0 = \frac{m}{Q2L}$$

или

$$\alpha_0 \frac{\lambda}{2} = \frac{1}{Q},$$

т.е. для генерации лазера необходимо, чтобы усиление на пути, равном $\frac{\lambda}{2}$, было больше величины обратной добротности. Добротность лазера тем выше, чем меньше потери. Порог генерации обратно пропорцио-

нален добротности. Поэтому для параксиальных лучей порог генерации достигается раньше, чем для непараксиальных, и мощность излучения лазера приходится, в основном, на параллельные параксиальные лучи.

При отражении от поверхности предмета узкого лазерного пучка и наблюдении отражённого пучка чрез микрообъектив (проектирование на экран) видны характерные пятна – лазерные спеклы [3]. Их возникновение обусловлено интерференцией волн, отражённых от различных точек поверхности, так как лазерное излучение имеет очень высокую степень когерентности, а разность фаз волн, отражённых от случайных неоднородностей на поверхности, остаётся постоянной во времени. Если поверхность отполирована с оптической точностью до долей длины волны лазерного излучения, то происходит зеркальное отражение пучка и спеклы не возникают. Не наблюдаются спеклы и при диффузном отражении от поверхности жидкости, когда её неровности с течением времени сменяются.

Спеклы возникают не только при диффузном отражении, но и при прохождении лазерного излучения через среду.

7.2. ТИПЫ ЛАЗЕРОВ

В настоящее время разработано огромное число типов лазеров, отличающихся между собой активной средой, типом накачки, мощностью, режимом работы и т.д.

Рубиновый лазер. Рубиновый лазер был первым оптическим квантовым генератором света (1960 г.). Рабочим веществом является рубин – кристалл оксида алюминия Al_2O_3 (корунд), в который при выращивании введена примесь – оксид хрома Cr_2O_3 . Красный цвет кристалла рубина обусловлен излучением иона хрома Cr^{3+} , который в кристаллической решётке замещает ион Al^{3+} . Густота красного цвета рубина зависит от концентрации ионов Cr^{3+} , в темно-красном рубине концентрация Cr^{3+} достигает 1 % [4].

Кристалл рубина имеет две полосы поглощения: в зелёной и в голубой частях спектра. Помимо этих полос имеются два узких энергетических уровня E_1 и E'_1 , при переходе с которых на основной уровень атом излучает свет с длинами волн $\lambda = 694,3$ нм и $\lambda' = 692,8$ нм. Ширина этих линий $\sim 0,4$ нм, вероятность вынужденных переходов для линии 694,3 нм больше, чем 692,8 нм (так как эта вероятность обратно пропорциональна частоте в кубе ν^{-3}).

При облучении рубина белым светом голубая и зелёные части спектра поглощаются, а красная отражается. В рубиновом лазере используется оптическая накачка ксеноновой лампой, которая даёт вспышки света большой интенсивности при прохождении через неё импульса тока. Газ ксенон при этом разогревается до нескольких ты-

тысяч градусов. Непрерывная накачка невозможна, так как лампа не выдерживает длительного нагрева. Излучение лампы накачки поглощается ионами Cr^{3+} в области полос поглощения. Затем с этих уровней ионы Cr^{3+} очень быстро в результате безизлучательного перехода переходят на энергетические уровни E_1 и E'_1 . Излишек энергии передаётся кристаллической решётке в энергию её колебаний (энергию фононов). Уровни E_1 и E'_1 – метастабильны (время жизни атома на уровне E_1 равно 4,3 мс). Таким образом создаётся значительная инверсная населённость активной среды относительно уровня E_0 .

Кристалл рубина выращивают в виде круглого цилиндра длиной $L \approx 5$ см и диаметром $d \approx 1$ см. Ксеноновая лампа, имеющая форму цилиндра, и кристалл рубина помещаются в зеркальную полость с эллиптическим сечением в фокусы эллипса.

Благодаря этому обеспечивается практически полная фокусировка излучения накачки. Один из торцов кристалла рубина срезают так, чтобы обеспечить полное внутреннее отражение в рубине, а другой торец – под углом Брюстера. Такой срез обеспечивает выход из кристалла излучения с соответствующей линейной поляризацией. Далее по ходу луча располагают полупрозрачное зеркало.

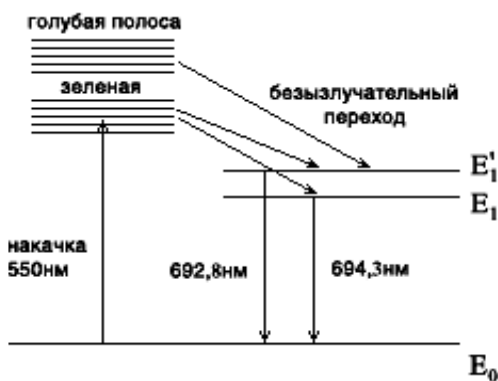


Рис. 42. Схема действия рубинового лазера

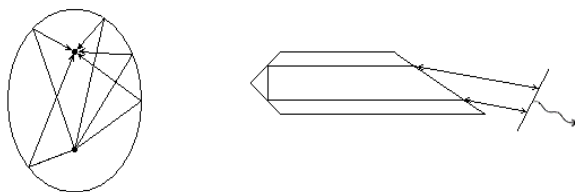


Рис. 43. Кристалл рубинового лазера и ход лучей в нём

Гелий-неоновый лазер. В гелий-неоновом He-Ne лазере активной средой является газообразная смесь гелия и неона. Генерация осуществляется при переходах между энергетическими уровнями Ne, а He играет роль посредника, через который энергия накачки передаётся атомам Ne.

Атом Ne может генерировать в результате более 130 различных энергетических переходов [5]. Однако наиболее интенсивными являются линии излучения 632,8 нм, 1,15 мкм и 3,39 мкм. При пропускании тока через смесь He-Ne атомы гелия в результате электронных ударов возбуждаются до состояний (2^3S и 2^2S), которые являются метастабильными, так как переход с них в основное состояние запрещён квантово-механическими правилами отбора. Когда возбуждённый атом гелия сталкивается с невозбуждённым атомом неона, то энергия переходит от He к Ne. Этот переход происходит весьма эффективно, так как уровни 3s и 2s атома Ne совпадают с соответствующими энергетическими уровнями атома He. Вследствие этого на уровнях 3s и 2s неона образуется инверсная населённость относительно уровней 3p и 2p.

He-Ne лазер работает в непрерывном режиме. На торцы лазерной трубки наклеены многослойные зеркала под углами Брюстера к оси. Это обеспечивает линейную поляризацию излучения. Давление He – 332 Па, Ne – 66 Па в трубке, постоянное напряжение на электродах в трубке 4 кВ, коэффициенты отражения зеркал 0,999 и 0,990.

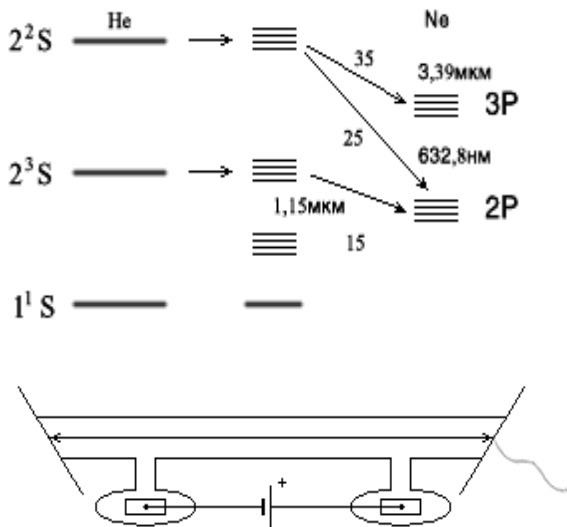


Рис. 44. Схема гелий-неонового лазера

Полупроводниковые лазеры. При взаимодействии электрона с внешним возбуждением в полупроводниках электрон, поглощая энергию, переходит из состояния с низким энергетическим уровнем в состояние с высоким энергетическим уровнем. Рассмотрим p - n -переход.

Если к нему приложить прямое напряжение U_R , то в p -области будет происходить инжекция электронов, а в n -области – дырок (в результате диффузии неосновных носителей зарядов). Эти неосновные носители, встречаясь с основными, будут рекомбинировать, излучая свет с длиной волны, соответствующей ширине запрещённой зоны [6].

Поскольку диффузионная длина электронов много больше, чем диффузионная длина дырок $L_{de} \gg L_{dh}$, световое излучение возникает, в основном, в p -области. Прибор, использующий p - n -переход (равный ширине запрещённой зоны E_g), называют полупроводниковым лазером с *гомоструктурным переходом*. Полупроводниковый лазер является «пороговым прибором». Если увеличить ток инжекции (т.е. увеличивать U_R – прямое напряжение), то при превышении некоторого порогового значения $I_{пор}$ возникает резкое линейное увеличение мощности лазера на выходе.

Вблизи $I_{пор}$ наблюдается качественное изменение процесса: медленный рост мощности излучения переходит скачком в режим насыщения при генерации излучения.

При $I < I_{пор}$ излучение лазера представляет собой сумму фотонов со случайными фазами – некогерентное излучение.

В области $I > I_{пор}$ при переходе в режим генерации происходит упорядочение фазы и возникает когерентное излучение.

Полупроводниковый лазер, так же как и лазеры других типов, представляет собой резонатор с помещённой внутрь его активной средой.

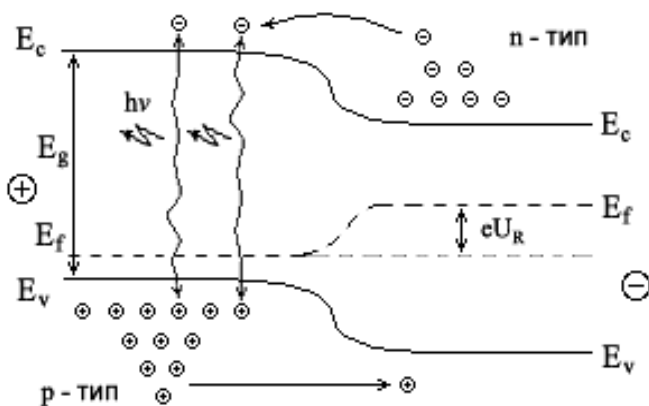


Рис. 45. Схема и принцип работы полупроводникового лазера

Так как коэффициент преломления полупроводникового материала большой, то плоскости спайности лазерного кристалла (кристаллографические плоскости роста) служат отражательными зеркалами резонатора.

Слабый свет, возникающий в лазере под действием спонтанных переходов, усиливается активной средой при многократном отражении от резонаторных зеркал, расположенных на торцах кристалла. В итоге образуется лавина вынужденно испущенных фотонов, которая и образует лазерный луч. Лазерная генерация возникает тогда, когда оптическое усиление компенсирует потери энергии внутри резонатора, складывающиеся из потерь в активной среде и потерь на отражение. Это соответствует пороговому току $I_{\text{пор}}$ инжекции. При дальнейшем увеличении тока инжекции усиление равно пороговому усилению и сопровождается резким увеличением мощности оптического излучения лазера.

Иногда встречается путаница с терминами «лазерный диод», «диодный лазер» и «лазер с диодной накачкой». Первое определение относится непосредственно к самому излучателю, т.е. полупроводниковому устройству, испускающему относительно монохроматическое излучение. Термин «диодный лазер» подразумевает законченное устройство, состоящее из лазерного диода, устройства стабилизированного электропитания (при необходимости с возможностью модуляции выходного излучения по питанию), устройства контроля температуры, а также оптической системы, преобразующей «некачественное» излучение лазерного диода в относительно монохроматическое и коллимированное. Лазером же с диодной накачкой называется твердотельный лазер, в котором в качестве источника накачки рабочей среды (кристалл Nd:YAG, Nd:YLF, Nd:YVO4 и т.д.) используется набор лазерных диодов инфракрасного диапазона.

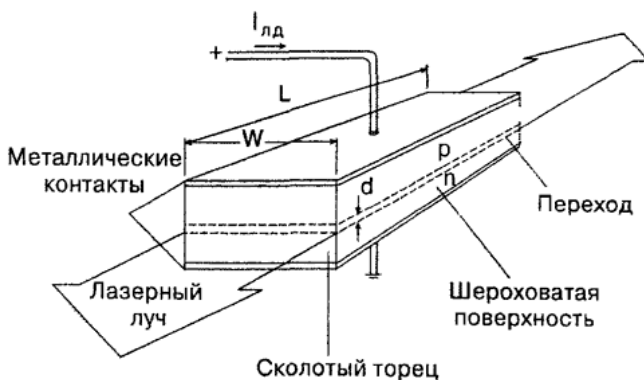


Рис. 46. Полупроводниковый лазер в разрезе

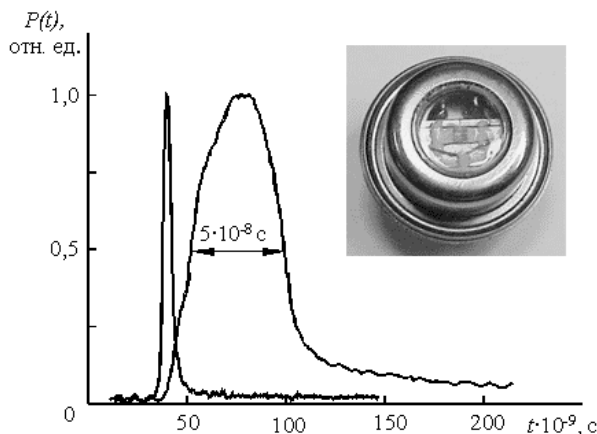


Рис. 47. Мощный полупроводниковый лазер и огибающие формируемых им короткого и длинного импульсов лазерного излучения

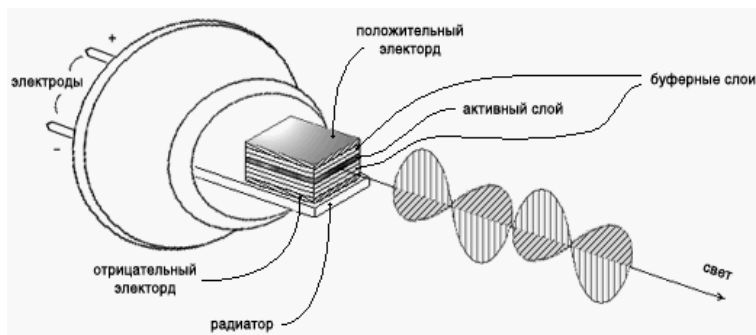


Рис. 48. Лазер на гетеропереходах

Основное преимущество лазерных диодов перед лампами накачки – значительно более узкая полоса излучения. Подобрал лазерный диод, излучающий как можно ближе к полосе поглощения активного вещества, удастся сильно снизить побочный нагрев рабочей среды.

В настоящее время кроме лазеров на $p-n$ -переходе широко используются лазеры на гетеропереходах (двойных гетероструктурах) [4].

Снижение порогового тока в гетеролазерах достигается за счёт каналирования инжектированных носителей в узкой области, ограниченной потенциальными барьерами гетероструктуры, а также за счёт каналирования спонтанного излучения в этой же области под действием волноводного эффекта, возникающего из-за различия в показателях преломления материалов гетероструктуры.

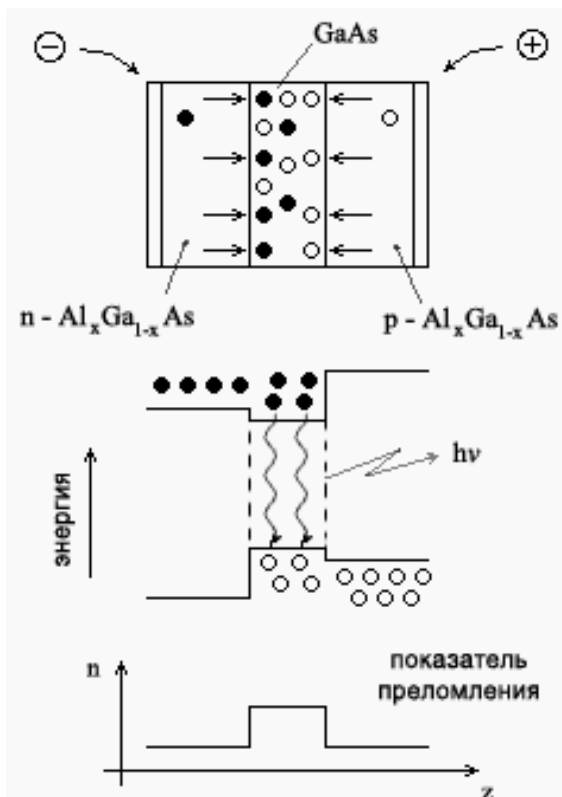


Рис. 49. Схема когерентного лазерного излучения

Если «+» напряжения питания приложен к *p*-области, а «-» – к *n*-области, то в активный слой инжектируются и дырки и электроны, где они рекомбинируют с излучением $h\nu$. Свет достигает плоскостей резонатора и отражаясь от них, не выходит в другие слои структуры из-за разницы показателей преломления. Когда сопутствующая этому процессу добавка энергии становится выше потерь внутри структуры, возникает когерентное лазерное излучение (рис. 49).

7.3. ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ

Длина волны лазерного излучения определяется материалом активного слоя. Например, если активный слой сделан из GaAs, то $\lambda = 0,86$ мкм при комнатной температуре, если из Al_xGa_{1-x}As, где *x* – молярная концентрация Al в структуре, то $\lambda = 0,6 \dots 0,9$ мкм. Если использовать InGa_{1-x}As_{1-y}P_y, то $\lambda = 0,5 \dots 1,6$ мкм.

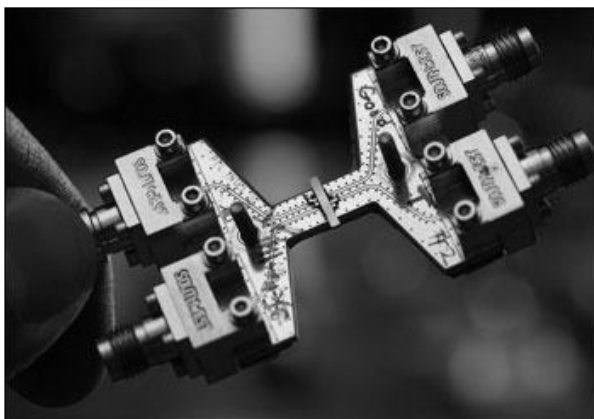


Рис. 50. Система волоконно-оптической линии

Оптические волокна для волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) имеют минимальные потери на длинах волн $1,0 \dots 1,6$ мкм. Для передачи информации по ВОЛС лучше всего использовать лазеры с активным слоем из $\text{InGa}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$. За разработку таких лазеров на тройных и четверных твёрдых растворах Ж.И. Алферов получил Нобелевскую премию в декабре 2000 года.

Кроме этого, полупроводниковые лазеры используются в оптических накопителях, CD-DVD-дисководах для записи и считывания информации в оптических указках.

7.4. ЛАЗЕРЫ В СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Кроме того, лазеры используются в устройствах обработки информации интегральной оптики, а также в оптических компьютерах, где идёт параллельная и последовательная обработка цифровой и аналоговой информации.

Лазерная система связи представляет собой открытую систему и поддерживает практически любой протокол из физической спецификации передающей системы. Кабельное или волоконно-оптическое устройство сопряжения доставляет сетевой трафик лазерному приемопередатчику, затем полученный сигнал модулируется оптическим лазерным излучателем и фокусируется в узкий коллимированный световой луч в передатчике, использующем систему линз. На принимающей стороне оптический пучок возбуждает фотодиод, который позволяет регенерировать модулированный сигнал. Сигнал демодулируется и преобразуется в коммуникационный протокол, поддерживаемый сетью. Иными словами, система использует тот же принцип действия, что и модемы для волоконно-оптических кабелей. Разница заключает-

ся только в другой среде для распространения светового луча и вытекающих из этого конструктивных особенностях.

Для дуплексных конфигураций на каждом конце двухточечной линии связи требуются и приемник, и передатчик (обычно они собраны в моноблоке). Стоимость таких изделий является функцией требуемых скорости и расстояния, все же остальные параметры несущественны.

Существующие в настоящее время коммерческие лазеры имеют выходную мощность сигнала менее 100 мВт и не требуют специального технического лицензирования для безопасной работы и управления. Они поддерживают высокую скорость передачи данных на расстояние до 1,2 км, однако их пропускная способность зависит от расстояния: чем выше пропускная способность, тем меньше расстояние передачи. Так, например, передача данных с пропускной способностью 34...52 Мбит/с возможна на расстояние до 1200 м, а с пропускной способностью 100...155 Мбит/с – на расстояние до 1000 м.

Очевидно также то, что чем больше мощность лазера, тем большее расстояние он покрывает. Так, например, лазерные передатчики Freespace или OmniBeam, имеющие выходную мощность от 20 до 40 мВт, способны передавать сигнал на расстояние до 1200 м. Если же использовать военные лазеры с выходной мощностью в 10 Вт, то информацию можно передавать на расстояние до нескольких километров. Однако чем выше мощность излучателя, тем меньше срок службы лазера. Поэтому в настоящее время, в основном, применяются коммерческие лазеры (чаще всего диодные лазеры с гетероструктурой на основе соединения GaAlAs и длиной волны 820 нм) с выходной мощностью до 50 мВт. При передаче информации на расстояние до 1200 м такие лазеры обеспечивают пропускную способность до 155 Мбит/с с частотой появления ошибок по битам порядка требований протокола 1E-9 и поддерживают стандарты E1, E3, OC1, OC3 и др.

Использование лазерной связи наиболее привлекательно в крупных городах с высокой плотностью застройки. Наиболее типично применение лазерной связи для создания беспроводных мостов между зданиями, разделёнными улицами, площадями, железной дорогой, рекой, промышленной зоной и т.п.

Так кто же является потенциальным пользователем лазерных систем? В первую очередь, это комплексы, занимающие несколько зданий (университетские городки, промышленные объекты, склады, бизнес-центры).

Примером удачного решения проблемы ближней связи является Госпиталь св. Бернарда в Бронксе (шт. Нью-Йорк), для которого потребовалось соединить основной центр обработки данных с центром информационных систем, находящимся на другой стороне улицы, и одной из клиник, расположенной на той же улице, но в другом здании.

Только 100 метров разделяли эти точки, но госпиталь не мог перекапывать улицу для прокладки подземного кабеля и не имел возможности тянуть кабель по воздуху. Требовалось решение, при котором госпиталь не нуждался бы в лицензии на использование радиоканала. И такое решение было найдено благодаря применению лазерной связи для передачи трафика данных между зданиями. Две системы OmniBeam 2000 Quad T1 и сеть Ethernet позволили решить проблему передачи аудио- и видеосигналов и данных на расстояние до 1200 метров с пропускной способностью до 150 Мбит/с.

Таким образом, лазерная связь может быть использована для:

- создания основного и/или резервного канала связи;
- объединения нескольких локальных сетей;
- соединения с опорной АТС или выноса абонентской ёмкости в телефонии (решение проблемы "последней мили");
- систем видеонаблюдения и охранного телевидения;
- обслуживания мини-сотовой связи;
- аварийной связи, когда необходимо быстрое развёртывание.

Существующие в настоящее время лазерные системы имеют огромный набор интерфейсов, обеспечивающих сопряжение с учрежденческими АТС, мостами, коммутаторами, маршрутизаторами и повторителями. Кроме этого, они могут быть сопряжены с другими приёмопередатчиками, например каналами кабельного телевидения. В зависимости от выбранной конфигурации информационный поток доставляется к лазерному передатчику по проводной линии с соответствующими характеристиками или по волоконно-оптическому кабелю, если в состав сопрягаемых устройств входит встроенный оптический конвертер (модем).

Высокоскоростная лазерная связь обеспечивает передачу информации с пропускной способностью от 34 до 155 Мбит/с. Данные от локальной сети поступают на лазерный передатчик через коммутатор. Причём передача данных между коммутатором, установленным в помещении, и лазером, установленным на крыше или стене здания, ведётся по волоконно-оптическому кабелю.

В случае передачи данных внутри локальных сетей различной топологии идеология построения лазерной связи оказывается такой же, как и в предыдущем случае, а пропускная способность ограничена только скоростью передачи данных внутри сети.

Передача речи и данных по общему каналу может осуществляться с помощью оборудования лазерной связи с комбинированным интерфейсом, одновременно обеспечивающим обмен информацией между двумя сегментами локальной сети и передачу 30 каналов тональной частоты в групповом потоке ИКМ30 (Е1, 2,048 Мбит/с, G.703) между двумя УАТС, а также для организации вынесенной абонентской ёмкости.

Передача видеоизображения может быть весьма кстати и в системах замкнутого телевидения, например, когда необходимо получить сигнал от удалённой телекамеры систем производственного или охранного видеонаблюдения. Используемое для этих целей оборудование обеспечивает не только одно- или двустороннюю передачу видеоизображения, но и имеет дополнительный интерфейс для передачи управляющих данных или звука.

В настоящее время во всём мире эксплуатируется несколько тысяч коммерческих лазерных систем, качество исполнения которых (а стало быть и популярность) растёт день ото дня. С увеличением пропускной способности и расстояния количество их будет возрастать и впредь. Лазерные передающие системы совместимы практически со всеми существующими сетевыми интерфейсами, легки в эксплуатации и отличаются большим диапазоном настройки. Такие системы – лучшее решение проблемы ближней связи между зданиями, находящимися в поле прямой видимости.

Носителем информации в лазерной системе является промодулированный лазерный пучок. Приёмник и передатчик расположены на некотором удалении друг от друга. Лазерный луч распространяется в атмосфере, поэтому в процессе передачи происходит уменьшение плотности энергии сигнала. Рассеяние энергии лазерного луча происходит вследствие отличия коэффициента преломления атмосферы от единицы. На качество передачи влияют микроскопические частички пыли, присутствие в воздухе паров или капелек жидкости, вызывающих дифракцию или интерференцию сигнала. Чем меньше таких препятствий, тем, разумеется, выше и качество связи. Колебания температуры или выпадение осадков (дождь, снег) приводят к изменению плотности атмосферы, а следовательно, к рассеянию волны. Не исключена возможность и непосредственной интерференции солнечных лучей с лазерным лучом прямо в приёмопередатчике.

При кратковременном попадании каких-либо крупных предметов в область прохождения луча (птиц или листья) передача автоматически повторяется, и информация не теряется. Следует отметить, что птицы видят луч лазера и уклоняются от него, но даже попадая в область прохождения луча, они ни коим образом не страдают: мощность излучения коммерческих лазеров слишком мала и поэтому абсолютно безвредна (исключение составляют только военные лазеры).

Внешние факторы способны также влиять и на само устройство (порою это может повредить лазер). Поэтому разработчикам лазерных систем приходится создавать такую конструкцию, которая позволила бы компенсировать интерференцию или дифракцию сигнала в окружающей среде и сдвиг зданий относительно друг друга (что особенно важно для высотных зданий, амплитуда колебаний которых достигает временами нескольких метров). Каждое устройство помещается внут-

ри алюминиевого корпуса, стойкого к воздействиям окружающей среды. Защитный корпус лазера должен обеспечивать надёжную работу устройства в любую погоду, поэтому лазерные устройства испытываются на стойкость к коррозии и прочность в условиях высокой влажности, в условиях воздействия низких и высоких температур и т.п.

Большинство лазерных систем работают в дождь со скоростью выпадения осадков до 8 см в час и в снегопад – до 5 см в час и практически в условиях сплошного тумана.

Особо стоит сказать о чувствительности системы к вибрации и движению. Для снижения вибрации систему помещают на массивную опору (обычно стальную или бетонную и ни в коем случае не на деревянную). Выше упоминалось о возможном сдвиге зданий относительно друг друга. Это может привести к отклонению луча при прохождении им достаточно большого отрезка пути. Так, отклонение луча при выходе из передатчика на угол в 1 миллирадиан приведёт к сдвигу луча относительно приёмника на 1 метр при передаче на 1 километр.

Существует несколько способов борьбы с такого рода трудностями. Некоторые фирмы, например, увеличивают диаметр луча передатчика (до 2 м для требуемого диапазона) и устанавливают угол уверенного принятия луча приёмником в 3 – 5 миллирадиан. Другие производители используют специальные устройства для автоподстройки, которые не позволяют лучу отклониться от заданного направления. Первый подход гораздо дешевле и более прост в решении, чем второй.

Использование лазерной связи возможно даже при наличии каких-либо временных препятствий на пути луча, хотя выполнение требования нахождения приёмопередатчиков в области прямой видимости является обязательным. Все лазерные приёмопередатчики обеспечивают передачу сетевого трафика со статистической достоверностью более чем 99,9% во всем допустимом диапазоне их рабочих скоростей и расстояний.

Отдельно следует сказать о границе замирания сигнала. Лазерный луч теряет свою световую энергию при следовании от приёмника к передатчику, а максимальное количество световой энергии, которое может быть потеряно, определяет границу замирания. Затухание сигнала в 20 дБ означает, что получить удастся только 1% световой энергии – 99% будет потеряно. Длина волны лазера 820 нм выбиралась исходя из необходимости уменьшить затухание сигнала.

Нужно учитывать и эффект сцинтилляции. Поднимающиеся от нагретых предметов вихревые потоки горячего воздуха приводят к дифракции луча. В итоге количество световой энергии в приёмнике может оказаться меньше порога чувствительности, что может привести к ошибкам при приёме. Правильный выбор места и оптического

пути способны свести на нет этот эффект, а посему прежде, чем устанавливать приёмопередатчик, обратитесь за советом к специалистам.

Во избежание травм органов зрения не рекомендуется смотреть на лазерный луч (находясь на пути луча) на расстоянии ближе 15 м от точки излучения, а также смотреть на отражённый от окна лазерный луч с расстояния меньше метра.

Как правило, приёмопередатчики монтируют на крыше или стене здания, что позволяет максимально снизить влияние различных внешних факторов и исключить нахождение людей в непосредственной близости от излучателя, как того требуют правила по эксплуатации и технике безопасности устройств такого класса.

Размещение лазерной системы возможно и внутри помещения. Правда, в данном случае необходимо учитывать, что передача будет осуществляться через стекло, а стало быть, уменьшение интенсивности сигнала (приблизительно на 5% на каждом стекле) неизбежно; если же окна в вашем офисе с поглощающим или отражающим инфракрасное излучение покрытием, то передача в принципе невозможна. Нельзя забывать и о критическом угле отражения, при котором луч будет отражаться даже от чистого стекла. Он составляет примерно 42 градуса.

При монтаже этой системы два подготовленных человека могут установить её за 30 минут, имея специальный набор инструментов. Вес устройства всего 6 – 12 кг. Демонтаж системы займет ровно столько же времени. Это значит, что в случае передислокации тратить силы и ломать голову над тем, что делать с проложенными вами коммуникациями, не придётся. Таким образом, лазерная передающая система хороша как для постоянного, так и для временного использования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии рассмотрены основные типы оксидных полупроводниковых материалов и физических процессов, обеспечивающих в качестве материалов твёрдотельной микро- и нанoeлектроники работу приборов. Приводятся их общая характеристика и классификация материалов с отрицательным (ферриты) и положительным (позисторы) температурным коэффициентом сопротивления, а также особенности технологии их получения.

Представлены общие сведения и области применения лазеров различных типов и принципы их работы, а также материалы, применяемые в качестве индикаторов приборов микро- и нанoeлектроники – жидкокристаллические материалы и условия их перехода из одного агрегатного состояния в другое.

Учебное пособие предназначено для студентов старших курсов, а также магистрантов, специализирующихся в области физики, микро- и радиоэлектроники и электронной техники. Оно может быть полезно аспирантам и научным сотрудникам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шефтель, И.Т. Терморезисторы / И.Т. Шефтель. – М. : Наука, 1973. – 415 с.
2. Жураковский, Е.А. Электронные состояния в ферромагнетиках / Е.А. Жураковский, П.П. Киричок. – Киев : Наукова Думка, 1985. – 325 с.
3. Летюк, Л.М. Химия и технология ферритов / Л.М. Летюк, Г.И. Журавлев. – Л. : Химия, 1983. – 255 с.
4. Тикадзуми, С. Физика ферромагнетизма. Магнитные свойства вещества : пер. с яп. / С. Тикадзуми. – М. : Мир, 1983. – 270 с.
5. Брусенцов, Ю.А. Основы физики и технологии оксидных полупроводников / Ю.А. Брусенцов, А.М. Минаев. – Тамбов. : Изд-во ТГТУ, 2002. – 79 с.
6. Жен П.Ж. де. Физика жидких кристаллов / пер. с англ. – М., 1977.
7. Пикин, С.А. Структурные превращения в жидких кристаллах / С.А. Пикин. – М., 1981.
8. Сонин, А.С. Введение в физику жидких кристаллов / А.С. Сонин. – М., 1983.
9. Тарасов, Л.В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения / Л.В. Тарасов. – М. : Радио и связь, 1981. – 440 с.
10. Кондиленко, И.И. Физика лазеров / И.И. Кондиленко, П.А. Коротков, А.И. Хижняк. – Киев : Вища школа, 1984. – 232 с.
11. Звелто, О. Принципы лазеров / О. Звелто. – М. : Мир, 1990. – 559 с. – ISBN 5-03-001053-X.
12. Бруннер, В. Справочник по лазерной технике / пер. с нем. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 544 с. – ISBN 5-283-02480-6.
13. Квантовая электроника : энциклопедия / под. ред. М.Е. Жаботинского – М. : Советская энциклопедия, 1969. – 500 с.
14. Тарасов, Л.В. Лазеры. Действительность и надежды / Л.В. Тарасов. – М. : Наука, 1985. – Т. 42. – 176 с. – (Библиотечка «Квант»).

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ФЕРРИТЫ	4
1.1. Общая характеристика и классификация ферритов	4
1.2. Природа магнетизма ферритов	4
1.3. Условия заполнения электронных оболочек	5
1.4. Антиферромагнетики, ферромагнетики	11
1.5. Ферриты со структурой шпинели	12
1.6. Гексаферриты	14
1.7. Ортоферриты	16
1.8. Свойства и применение ферритов	17
2. ПОЗИСТОРЫ (ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТВЁРДЫЕ РАСТВОРЫ НА ОСНОВЕ ТИТАНАТА БАРИЯ)	21
3. СОЕДИНЕНИЯ ТИПА $A^{III}B^V$	23
3.1. Двойные и тройные полупроводниковые фазы	25
3.2. Закономерность образования двойных полупроводниковых фаз	26
3.3. Двойные алмазоподобные полупроводниковые фазы	26
4. СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФАЗ. ИХ СПОСОБНОСТЬ К РАСТВОРИМОСТИ	28
5. ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ	35
5.1. Общая характеристика жидких кристаллов	35
5.2. Типы жидких кристаллов	35
5.3. Структура жидких кристаллов	36
6. ДИСПЛЕИ НА ОСНОВЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ	46
7. ЛАЗЕРЫ	61
7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЛАЗЕРАХ	61
7.2. ТИПЫ ЛАЗЕРОВ	64
7.3. ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ	70
7.4. ЛАЗЕРЫ В СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	77
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	78

Учебное издание

БРУСЕНЦОВ Юрий Анатольевич,
МИНАЕВ Александр Михайлович,
ФИЛАТОВ Иван Сергеевич

МАТЕРИАЛЫ ТВЁРДОТЕЛЬНОЙ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное пособие

Редактор Т.М. Глинкина

Инженер по компьютерному макетированию М.С. Анурьева

Подписано в печать 30.03.2012.

Формат 60 × 84 / 16. 4,65 усл. печ. л. Заказ № 127

Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14