

*А. А. Колосов*

---

Экз. № . . . .  
На правах рукописи

**ВОПРОСЫ  
МОЛЕКУЛЯРНОЙ  
ЭЛЕКТРОНИКИ**

---

Отдел Научно-Технической Информации  
1960  
«У»

*А. А. Колосов*

---

Экз. № *99*

На правах рукописи

ВОПРОСЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ  
ЭЛЕКТРОНИКИ

---

Отдел Научно-Технической Информации  
1960  
«У»

- 2 -

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ГЛАВА I. Факторы, определяющие необходимость создания устройств молекулярной электроники....	8
I.1. Определение надёжности .....	10
I.2. Возрастание сложности систем .....	12
I.3. Прогноз надёжности .....	14
I.4. Время безотказной работы современной аппаратуры .....	18
I.5. Вес и объём радиоэлектронной аппаратуры...	22
ГЛАВА II. Физические основы работы устройств молекулярной электроники .....	29
II.1. Основной принцип формирования устройств молекулярной электроники .....	29
II.2. Электронная и дырочная проводимость в полупроводниках .....	30
II.3. Тепловое равновесие электронов в полупроводнике. Свободное и связанное состояние .....	32
II.4. Запорный слой .....	34
II.5. Квантовые состояния электронов в отдельном атоме .....	38
II.6. Квантовые состояния электронов в твёрдом теле .....	40
II.7. Заполненная зона и свободная зона .....	45
II.8. Условия движения электрона в полупроводнике .....	47
II.9. Подвижность носителей тока .....	52
II.10. Примесные уровни .....	54
II.11. Энергетические уровни в полупроводниках .....	56
II.12. Переход типа n-p .....	61

	Стр.
П.13. Использование физических процессов в полупроводниках для создания устройств молекулярной электроники .....	67
ГЛАВА III. Состояние работ по устройствам молекулярной электроники за рубежом .....	78
III.1. Программа работ исследовательского центра ВВС США .....	78
III.2. Работы фирмы Вестингауз по созданию функциональных блоков на базе молекулярной электроники .....	79
III.3. Работы фирмы Техас Инструментс .....	84
ГЛАВА IV. Вопросы разработки и изготовления молекулярных устройств .....	88
IV.1. Основные этапы разработки .....	88
IV.2. Создание прототипа молекулярного устройства .....	90
IV.3. Особенности процессов изготовления молекулярных устройств .....	95
IV.4. Выращивание полупроводниковых кристаллов из расплава .....	97
IV.5. Выращивание с помощью дендритного процесса .....	101
IV.6. Изготовление функциональных устройств на базе полупроводниковых пластин .....	107
IV.7. Пример разработки функционального устройства .....	117
IV.8. Изготовление выводов и внешнее оформление молекулярного устройства .....	120
IV.9. "Плотность упаковки" полупроводниковой пластины и общая "плотность упаковки" устройства .....	124
IV.10. Соображения по надёжности молекулярных устройств .....	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	128
БИБЛИОГРАФИЯ .....	132

- 4 -

### ПРЕДИСЛОВИЕ

Решение грандиозной задачи создания в нашей стране материально-технической базы коммунизма неразрывно связано с всемерным повышением темпов технического прогресса и с ускорением внедрения последних достижений науки и техники во все отрасли народного хозяйства. Одной из важнейших сторон этого процесса является все более широкое использование радиоэлектроники.

Потребность в радиоэлектронной аппаратуре растёт чрезвычайно быстро: требования, предъявляемые к ней, всё более и более усложняются. В результате методы разработки, технология изготовления и организация производства радиоэлектронной аппаратуры находятся в состоянии непрерывного совершенствования. Несмотря на имеющиеся успехи в этой области, становится все более очевидным, что требуемого прогресса нельзя достичь одними частными улучшениями и что необходим совершенно новый подход к самим принципам построения аппаратуры.

Современные радиоэлектронные системы используются для решения всё более и более сложных задач, что приводит к непрерывному усложнению самих систем. Число элементов, входящих в систему, достигает сотен тысяч. Время безотказной работы таких систем, даже при использовании наиболее высококачественных деталей, в некоторых случаях не превышает нескольких часов.

- 5 -

Между тем, например, для аппаратуры искусственных спутников Земли, необходимо иметь время безотказной работы в тысячи и десятки тысяч часов. Кроме того, как для аппаратуры искусственных спутников и космических кораблей, так и для широкого класса военной и гражданской радиоэлектронной аппаратуры желательно не только многократное увеличение времени безотказной работы, но и соответствующее уменьшение её объёма и веса.

Одной из наиболее актуальных задач является повышение надёжности и уменьшение габаритов электронных счётных машин. Электронные счётные машины являются важнейшим фактором технического прогресса. Однако сложность, громоздкость и высокая стоимость этих машин затрудняют широкое внедрение их во все отрасли техники и народного хозяйства. Разработка методов создания высоконадёжных, лёгких, малогабаритных, рассчитанных на широкую автоматизацию производства электронных счётных машин и других радиоэлектронных устройств явилась бы подлинным техническим переворотом, открывающим новые неисчерпаемые возможности во всех отраслях техники, науки и народного хозяйства.

В настоящее время радиоэлектроника стоит на пороге такого технического переворота, который по своей значимости, возможно, будет превосходить скачок вперёд, сделанный в начале этого столетия при переходе от искровой и дуговой радиотехники к радиотехнике электронной лампы.

Научной основой этого переворота являются проведенные за последние два десятилетия широкие исследования в области физики

строения вещества, одним из результатов которых было создание атомной энергетики. Изучение физики твёрдого тела, в частности, процессов, происходящих в полупроводниках, позволяет в настоящее время найти новые принципы создания радиоэлектронной аппаратуры, обеспечивающие колоссальный прогресс в этой области.

Сущность этих новых принципов заключается в отказе от построения систем в виде блоков, состоящих из совокупности большого числа активных и пассивных элементов, и переходе на моноблоки твёрдого тела, которые за счёт создания в этом твёрдом теле соответствующих областей, слоёв и зон с требуемыми свойствами преобразования электрического сигнала смогут выполнять те же функции, что и обычные электронные блоки, состоящие из набора отдельных элементов. Это направление в создании радиоэлектронных устройств получило название "молекулярной электроники".

Настоящая работа ставит своей задачей сделать первую попытку изложения вопросов молекулярной электроники на основе обобщения материалов, в разное время опубликованных в отечественной и зарубежной открытой литературе. В последние годы за рубежом достигнуты определенные успехи в разработке первых образцов устройств молекулярной электроники, однако данные, опубликованные в иностранной литературе по этому вопросу, носят во большей части рекламный характер.

Работа содержит четыре главы. В первой главе обосновывается необходимость поисков новых путей создания радиоэлектронной аппаратуры. В частности, рассматриваются проблемы надёжности, объёма и веса аппаратуры.

- 7 -

Вторая глава посвящена физическим основам работы устройств молекулярной электроники. Ввиду того, что основным материалом, который используется для этих устройств, являются полупроводниковые кристаллы, главное внимание уделено физическим процессам в полупроводниках.

По вопросам полупроводниковой техники имеется обширная литература, в которую входит ряд фундаментальных работ по физике полупроводников, в том числе превосходная книга академика А.Ф.Иоффе "Физика полупроводников". Глава II в значительной своей части представляет изложение работ А.Ф.Иоффе по разделам, непосредственно связанным с процессами в устройствах молекулярной электроники.

В третьей главе излагается состояние работ по молекулярной электронике за рубежом.

Наконец, в четвёртой главе рассматриваются вопросы разработки и технологии изготовления устройств молекулярной электроники.

В настоящей работе не затрагивались проблемы создания молекулярных усилителей и молекулярных генераторов, поскольку эти проблемы являются специфическими и требуют отдельного рассмотрения.

А.КОЛОСОВ

Май-июль 1960 г.



- 8 -

ГЛАВА IФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ НЕОБХОДИМОСТЬ СОЗДАНИЯ  
УСТРОЙСТВ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИВВЕДЕНИЕ

В последние годы радиоэлектроника переживает период бурного развития. Если до недавнего времени дальность действия радиосредств определялась только земными расстояниями и получение, например, радиосвязи между северным и южным полюсами Земли рассматривалось как предельное достижение, то в настоящее время положение дел существенно изменилось. Обеспечение работы радиолиний связи и телеизмерений на космических кораблях, установление радиолокационного контакта с Луной и Венерой требуют дальности действия средств радиоэлектроники в сотни тысяч и миллионы километров. Возникает необходимость создания новых методов обработки приходящего сигнала в условиях шумов, с широким использованием техники когерентного накопления, а также резкого увеличения коэффициента усиления антенн, мощности передатчиков и чувствительности приёмных устройств. Собственные шумы радиоприёмников на ультравысоких частотах до последнего времени являлись основным фактором, ограничивающим потенциал радиосистем. Разработка новых методов радиоприёма с использованием молекулярных и параметрических усилителей привела к тому, что в ряде случаев уровень шумов, действующих в радиоприёмном устройстве, в большей степени определяется шумами, приходящими из космического пространства, чем собственными шумами приёмника.

В то же время достигнут существенный прогресс в области элементов радиоэлектронных схем, особенно в области полупроводниковых устройств, всё больше вытесняющих электронные лампы.

Однако принципы создания и конструирования электронных устройств, как и в самый первый период развития радиотехники, сводятся к тому, что проектировщик аппаратуры строит схему из большого числа отдельных пассивных и активных элементов, стремясь создать из них наиболее удачную комбинацию, удовлетворяющую заданным требованиям.

Подобное построение аппаратуры связано с рядом серьезных недостатков, имеющих принципиальный характер. Современная радиоэлектронная аппаратура, наряду с предъявляемыми к ней специфическими требованиями, определяемыми условиями её работы, в значительной части случаев должна обеспечивать:

1. Максимальную надёжность действия.
2. Минимальные вес и габариты.
3. Возможность организации массового производства в условиях широкой автоматизации.
4. Минимальный расход материалов.
5. Минимальную стоимость производства.

Принятие в настоящее время методы разработки и изготовления аппаратуры не могут считаться удовлетворительными с точки зрения этих требований.

- 10 -

### I.I. Определение надёжности

Надёжность аппаратуры принято называть вероятностью того, что в течение определенного времени аппаратура, работающая в заданных условиях, будет удовлетворять предъявляемым к ней требованиям. Такое определение надёжности, применимое, вообще говоря, к любому виду устройств, во многих случаях не является достаточно удобным. Вопрос о времени, в течение которого должна обеспечиваться требуемая вероятность невыхода аппаратуры из строя, здесь остается несколько неопределенным, и выбор этого времени носит, в сущности, довольно произвольный характер. Вместе с тем очевидно, что вероятность невыхода из строя будет существенно зависеть от того, какой интервал рабочего времени выбран.

Поэтому в ряде случаев более удобны другие определения [1]. Так, для значительного числа классов аппаратуры военного применения целесообразно определять надёжность как произведение вероятности того, что к моменту начала работы аппаратура окажется исправной, на вероятность невыхода аппаратуры из строя за время работы. При этом предполагается, что как к моменту начала работы, так и в процессе работы аппаратура не только функционирует, но и соответствует заданным техническим требованиям. При таком определении надёжность будет зависеть не только от частоты выхода из строя элементов, но и от времени, требуемого для обнаружения и устранения неисправности.

- II -

В дальнейшем мы будем исходить из приведенного выше определения надёжности. Тогда

$$P_{\epsilon} = P_r \cdot P_p, \quad (I.1)$$

где  $P_{\epsilon}$  - надёжность аппаратуры;  
 $P_r$  - коэффициент готовности, определяемый как вероятность того, что в произвольно выбранный момент времени аппаратура исправна и готова к работе;  
 $P_p$  - вероятность безотказного действия за время рабочего цикла (например, за время боевой работы)

Величины, входящие в (I.1), определяются следующими соотношениями:

$$P_p = e^{-t_p \sum_i \lambda_i} \quad (I.2)$$

$$P_r = \frac{t_p}{t_p + \bar{N} t_{n_i}} = \frac{1}{1 + \lambda t_{n_i}}. \quad (I.3)$$

Здесь:

$t_p$  - время работы аппаратуры;  
 $\lambda_i$  - средняя частота отказов отдельных элементов;  
 $\lambda = \sum_i \lambda_i$  - средняя частота отказов устройства;  
 $\bar{N}$  - математическое ожидание числа неисправностей за время  $t_p$ ;  
 $t_{n_i}$  - среднее время нахождения и устранения отдельной неисправности.

- 12 -

Не претендуя на детальное рассмотрение весьма сложной и обширной проблемы надёжности, коснёмся тех сторон вопроса, которые связаны с рассматриваемыми задачами. Ввиду того, что одной из главных причин, вызывающих необходимость поисков новых принципов построения радиоэлектронной аппаратуры, является трудность получения требуемой надёжности при обычных методах создания аппаратуры, следует представить себе, какие данные по надёжности современной радиоэлектронной аппаратуры могут быть получены при обычных способах конструирования.

### 1.2. Возрастание сложности систем

Одной из основных причин, приводящих к необходимости предъявлять все более жесткие требования к надёжности отдельных элементов, является непрерывно возрастающая сложность систем и связанное с этим резкое увеличение числа элементов, используемых в системе. Увеличение сложности систем вызвано повышением тактико-технических требований к системам и более тяжёлыми условиями их работы.

В качестве примера рассмотрим аппаратуру некоторых американских самолётных систем вооружения. Число элементов в ней характеризуется следующими данными:

- 13 -

Тип самолёта используемой системы воо- ружения	Год раз- работки	Число элементов, входящих в аппа- ратуру системы
В-29	1942	2 000
В-50	1948	8 000
В-47	1952	18 000
В-52	1955	48 000
В-58	1959	100 000

По мере повышения тактико-технических требований к системе и связанного с этим возрастания её сложности надёжность деталей должна резко возрастать.

Сопоставим аппаратуру системы на самолёте В-29 с 2000 деталями с аппаратурой системы на самолёте В-58 с 100 000 деталей и будем считать, что качество деталей в обеих системах обеспечивает среднее время между отказами, равное 10 часам.

Если количество элементов возрастёт в 500 раз, а надёжность каждого отдельного элемента останется неизменной, то естественно, что количество отказов в единицу времени увеличится также в 500 раз, и среднее время между отказами уменьшится в 500 раз. Например, для системы вооружения В-58 при деталях и лампах уровня 1959г среднее время между отказами (в летных условиях) соответствовало 10 часам, при том же количестве элементов и при деталях и лампах уровня 1942 г это

- 14 -

время уменьшится до 1,2 минуты.

Естественно, что подобная система будет совершенно непригодна для эксплуатации.

### 1.3. Прогноз надёжности

Одним из основных вопросов проектирования и создания современной радиоэлектронной аппаратуры является вопрос о расчёте ещё при проектировании той надёжности, которой она будет удовлетворять.

Основные параметры системы, в том числе её эффективность, не могут быть определены, если неизвестна надёжность. Следовательно, не могут быть правильно выбраны элементы системы, определяющие эффективность.

В то же время, по-видимому, безнадёжно задним числом, уже на испытаниях, пытаться добиться некоторой произвольно выбранной величины надёжности (например 0,95 или 0,99), если в процессе проектирования на основе проведенного расчёта не был выполнен соответствующий выбор параметров, обеспечивающий возможность получения указанной надёжности. Поэтому в разработках систем, наряду с дальностью действия, точностью и т.д., необходимо производить расчёт надёжности и уделять обеспечению надёжности исключительное внимание.

Основной причиной отказов хорошо отработанной радиоэлектронной аппаратуры являются отказы активных и пассивных элементов.

- 15 -

тов, составляющих схему этой аппаратуры.

Эти отказы могут иметь аварийный характер, или же могут быть связаны с отклонением параметров элементов от заданного значения. Если принять то определение надёжности, которое было дано выше, то среднее время работы между отказами может быть определено следующим соотношением

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda}, \quad (I.4)$$

где:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n = \sum_i \lambda_i. \quad (I.5)$$

При наличии однотипных деталей:

$$\lambda = \sum_2 \lambda_2 N_2 + \sum_\beta \lambda_\beta N_\beta + \dots + \sum_\mu \lambda_\mu N_\mu. \quad (I.6)$$

Типовые ориентировочные значения коэффициентов  $\lambda_i$  даны в таблице I.I. В этой таблице детали группы I относятся к элементам, разработанным несколько лет тому назад и в течение ряда лет находящимся в серийном производстве. Детали группы II соответствуют деталям, разработанным в 1959-1961 гг. Во многих случаях при ориентировочных расчётах удобно пользоваться величиной  $\lambda_{\text{бал}}$ , т.е. частотой отказов, отнесенной к одному баллону схемы; данные для  $\lambda_{\text{бал}}$  также приведены в таблице I.I. Значения  $\lambda_i$  зависят не только от типа деталей, но и от выбранного режима работы. Так, при повышении температур, увеличении рабочих напряжений и рассеиваемой мощности величины  $\lambda_i$  возрастают.



- 16 -

Таблица I.I.

№ пп	Наименование деталей	Частота отказов $\lambda \cdot 10^{-5} (1/\text{час})$		Среднее число элементов на один баллон
		детали гр. I	детали гр. II	
I	Приёмо-усилительные лампы	4	0,2	I
2	Кристаллические диоды	0,15	0,03	0,2
3	Сопротивления	0,6	0,3	5,0
4	Конденсаторы	0,3	0,15	3,0
5	Реле	2,7	I	0,1
6	Трансформаторы и дроссели	0,4	0,2	0,2
7	Катушки индуктивности	0,1	0,1	0,5
8	Разъёмы	0,05	0,05	2
9	Пайки	0,01	0,01	12
Частота отказов $\lambda_{\text{с.л}}$ на I баллон				
		8,55 · 10 <sup>-5</sup>	2,57 · 10 <sup>-5</sup>	

Соотношение между числом деталей зависит от конкретного построения схемы, но в среднем для радиолокационной аппаратуры может быть принято в соответствии с данными таблицы I.I. В схемах на транзисторах на I транзистор приходится 5-6 деталей.

Для специальной аппаратуры американского производства, находящейся в эксплуатации, по данным надёжности деталей, при-

- 17 -

веденным в [3], коэффициент  $\lambda_{\text{д.л.}}$  может быть принят равным  $5 \cdot 10^{-5}$ . Аналогичные данные характерны и для английской специальной аппаратуры. Следует иметь в виду, что коэффициенты  $\lambda_i$ , приведенные выше, получены на основании испытаний элементов в лабораторных условиях. При эксплуатации в полевых условиях, вследствие более тяжелого режима работы, который обычно не удается полностью воспроизвести в лаборатории, среднее время между отказами уменьшается. Так, для самолётной аппаратуры в лётных условиях работы оно может уменьшиться более чем в два раза [4].

За последние годы качество деталей существенно улучшилось. Чтобы оценить тенденцию этого улучшения из года в год, интересно рассмотреть данные, касающиеся американской специальной аппаратуры систем определенного класса.

Согласно [3], эти данные можно свести в следующую таблицу [I.2]. В последней графе таблицы приведено среднее время безотказной работы.

Таблица I.2

Система	Год разработки	Число элементов	Среднее время безотказной работы $T_{\text{ср}}$ (в часах)
A	февраль 1954	2100	3,5
B	июль 1955	5200	6,5
C	июнь 1957	6700	11
D	октябрь 1958	25000	5,9
D (дораб.)	1960	25000	10,0
E	1961	25000	14,2

- 18 -

Для того, чтобы представить результаты в более наглядной форме, проследим, как изменяется значение  $\lambda_{\text{эл.}}$  из года в год. При этом принималось, что число элементов равно  $n = 12 N_n$ , где  $N_n$  - число баллонов.

Таблица I.3

Система	Год раз- работки	$\lambda$ бал.
А	февраль 1954	$170 \cdot 10^{-5}$
В	июль 1955	$35 \cdot 10^{-5}$
С	июнь 1957	$17 \cdot 10^{-5}$
Д	октябрь 1958	$8,5 \cdot 10^{-5}$
Д (дораб.)	1960	$5 \cdot 10^{-5}$
Е	1961	$3,6 \cdot 10^{-5}$

Из таблицы видно, что за счёт улучшения качества элементов, при той же степени сложности аппаратуры, время безотказной работы возросло бы с 1954 г по 1960 г более чем в 30 раз. Однако ввиду того, что сложность аппаратуры также сильно возросла, время безотказной работы фактически увеличилось менее, чем в три раза.

#### I.4. Время безотказной работы современной аппаратуры

Представляет интерес определение времени безотказной работы при той степени сложности аппаратуры, которая характерна

для современных систем управления. Определим это время для двух случаев:

- а) для работы в режиме предполётной проверки (режим ожидания);
- б) для работы в лётных условиях.

Как показывает опыт, на первых этапах испытаний новой аппаратуры большая часть отказов бывает обусловлена конструктивными дефектами отдельных узлов, неудачной регулировкой аппаратуры или наличием неправильного режима (вибрационного, теплового и т.д.) тех или иных узлов и элементов аппаратуры. Отказы, вызываемые этими дефектами системы, носят систематический характер. В последующем расчёте мы будем считать, что в результате выполненных доработок все эти отказы устранены и что неисправности вызваны только случайными отказами отдельных элементов.

Будем проводить расчёт для аппаратуры самолётной радиолокационной станции. Расчёт выполним для двух вариантов: для сравнительно простой системы ("система А"), с числом баллонов  $N_s = 150$ , и для более сложной системы ("система В"), для которой  $N_s = 400$ . При расчёте будем пользоваться данными таблицы I.I. Примем время боевой работы аппаратуры  $t_p = 1$  час, а время обнаружения и устранения неисправности в среднем  $t_{л,r} = 2$  ч. Результаты расчёта сведены в таблицы. Среднее время между отказами при лётной работе будем считать в два раза меньшим, чем в режиме ожидания.

- 20 -

Таблица I.4

Надёжность самолётной аппаратуры типа А

при  $t_p = 1$  час $(N_A = 150)$ 

Режим работы	Детали типа	$\lambda = \sum_i \lambda_i$	$T_{ср}$ часов	$P_r$	$P_p$	$P_\epsilon$
Предполётная проверка	Группа I	$1,27 \cdot 10^{-2}$	78	0,975	0,986	0,96
	Группа II	$3,75 \cdot 10^{-2}$	266	0,992	0,997	0,988
Лётная работа	Группа I	$2,55 \cdot 10^{-2}$	39	0,975	0,975	0,95
	Группа II	$7,5 \cdot 10^{-3}$	133	0,992	0,993	0,985

Результаты аналогичных расчётов для системы типа В

 $(N_B = 400)$  приведены в таблице I.5 для времени боевой работы  $t_p = 1$ .

Таблица I.5

Надёжность самолётной аппаратуры типа В ( $N_B = 400$ )при времени работы  $t_p = 1$  час.

Режим работы	Детали типа	$\lambda = \sum_i \lambda_i$	$T_{ср}$ часов	$P_r$	$P_p$	$P_\epsilon$
Предполётная проверка	Группа I	$3,4 \cdot 10^{-2}$	29,4	0,93	0,965	0,897
	Группа II	$1 \cdot 10^{-2}$	100	0,98	0,99	0,97
Лётная работа	Группа I	$6,8 \cdot 10^{-2}$	14,7	0,93	0,934	0,87
	Группа II	$2 \cdot 10^{-2}$	50	0,98	0,98	0,96

В приведенных таблицах вероятность готовности  $P_r$  принята для обоих режимов работы одной и той же с учётом, что готовность

- 21 -

аппаратуры проверяется на земле, до взлёта самолёта. Результаты, приведенные в таблицах I.4 и I.5, показывают, что при времени боевой работы 1 час можно получить удовлетворительную надёжность. Эта надёжность может быть дополнительно повышена за счёт уменьшения времени нахождения и устранения неисправностей при том же качестве деталей. Применяя встроенную в основную систему контрольную аппаратуру, позволяющую быстро найти и устранить неисправность, можно довести  $P_r$  до значений, близких к 1, даже при использовании деталей I группы.

Однако положение вещей существенно изменится, если время боевой работы возрастёт. Рассмотрим, например, случай, когда система типа В предназначена для установки на самолёте с большим полётным временем, совершающим полёт в режиме барражирования. Примем время боевой работы равным 10 часам. В этом случае для лётного режима получим данные, приведенные в таблице I.6.

Таблица I.6

Надёжность самолётной аппаратуры типа В ( $N_A = 400$ )  
при времени работы  $t_p = 10$  часов

Режим работы	Детали типа	$\lambda = \sum \lambda_i$	$T_{ср}$ часов	$P_r$	$P_p$	$P_z$
Лётная работа	Группа I	$6,8 \cdot 10^{-2}$	14,7	0,93	0,51	0,475
	Группа II	$2 \cdot 10^{-2}$	50	0,98	0,825	0,81

- 22 -

Рассмотрение этой таблицы показывает, что при времени работы в 10 часов детали первой группы совершенно непригодны для использования. Использование деталей высокого качества II-й группы также не обеспечивает удовлетворительных результатов, особенно если учесть, что нами рассматривается надёжность не всей системы в целом, а лишь её части. Отсюда следует, что для обеспечения высокой вероятности ( $P_{\epsilon} \geq 0,95$ ) невыхода из строя самолётной аппаратуры рассматриваемого класса при времени работы в 10 часов требуется резко поднять качество деталей даже по сравнению с достаточно высоким и на сегодняшний день еще не достигнутым качеством деталей группы II (таблица I.I).

Вместе с тем, если для самолётной аппаратуры время безотказной работы в 10 часов с высокой вероятностью невыхода из строя за это время можно считать в большинстве случаев достаточным, то для аппаратуры спутников и космических кораблей это время должно исчисляться тысячами часов.

Таким образом, уже при рассмотрении вопросов надёжности современных систем с учётом их сложности и важности обеспечения длительного времени безотказной работы становится очевидной настоятельная необходимость поисков новых путей конструирования радиоэлектронной аппаратуры.

#### 1.5. Вес и объём радиоэлектронной аппаратуры

Вопрос об уменьшении веса и объёма радиоэлектронной аппаратуры является одним из важнейших вопросов проектирования, особенно

- 23 -

для аппаратуры космических кораблей, искусственных спутников Земли и бортовой аппаратуры антиракет. Весьма важным является уменьшение веса и габаритов аппаратуры ракет и самолётов-снарядов, а также всех видов полевой военной радиоэлектронной аппаратуры. По американским данным [5], для космического корабля, способного преодолеть тяготение Земли, увеличение веса оборудования корабля относится к увеличению стартового веса, как 1:200.

Таким образом, увеличение веса оборудования на 100 кг обуславливает увеличение стартового веса космического корабля на 20 тонн. Для многоступенчатой ракеты, возвращающейся на Землю (такой, например, как Локхид X-17), это отношение равно 1:140. Для ракет и самолётов-снарядов оно может быть 1:10 и выше. Поэтому очевидно, что сокращение веса оборудования для рассмотренных летательных аппаратов имеет очень большое значение. Решение этих вопросов весьма существенно также и для полевой подвижной аппаратуры.

Сложность боевых технических средств и быстротечность современных боевых операций настолько сильно возросли, что для управления боем приходится использовать большое число различных радиоэлектронных устройств.

Сюда входят:

- аппаратура проводной связи и радиосвязи;
- радиолокационная аппаратура;
- аппаратура стрельбовых средств;



- 24 -

- аппаратура обработки данных;
- аппаратура контроля и т.п.

Значительная часть этой аппаратуры должна выполняться в подвижном варианте, обеспечивающем быструю передислокацию в любой тактической обстановке. Громоздкость существующей аппаратуры приводит к тому, что её эксплуатация требует использования в ряде случаев целых поездов грузовых автомашин или вездеходов, а это, в свою очередь, резко снижает оперативность войсковых соединений. Существующая технология изготовления военной радиоаппаратуры не позволяет найти решения, вполне удовлетворяющие, с точки зрения мобильности, практике современного боя. Для того, чтобы сделать существенный шаг вперед в этой области, вес и объём полевой радиозлектронной аппаратуры нужно снизить не менее чем в 10 раз. Используемые в настоящее время методы разработки и производства аппаратуры не позволяют этого сделать.

Не будет преувеличением сказать, что сокращение веса и габаритов аппаратуры в десятки и сотни раз по сравнению с существующими означало бы подлинный технический переворот не только в военном деле, но и в самых разнообразных областях человеческой деятельности.

Задача уменьшения объёма и веса аппаратуры не является новой; большие коллективы работают над её решением почти во всех странах и в течение многих лет, причём за последние годы в

- 25 -

этом направлении достигнуты определенные успехи. Так, если за единицу относительного объема принять новую аппаратуру 1940 года на металлических лампах, то аналогичная аппаратура 1950 года, спроектированная с использованием субминиатюрных ламп и соответствующих деталей, разместится в 1/10 части этого объема. Применяя технику печатного монтажа, транзисторы и миниатюрные детали, можно снизить объем еще примерно в 10 раз. Однако сохранение обычной конструкции аппаратуры со схемой, состоящей из большого числа отдельных активных и пассивных элементов, тормозит дальнейшее сокращение объема и веса.

В последних американских разработках на печатных платах, с использованием транзисторов, была достигнута почти предельная плотность монтажа деталей — около 2 шт на один кубический сантиметр занимаемого объема. Коэффициент использования объема, т.е. отношение объема деталей ко всему объему, при этом составляет 0,3. Размеры деталей были уменьшены до такой степени, что их производство и монтаж стали почти ввездной работой.

Невозможность получения кардинальных результатов при решении задачи уменьшения веса и объема без изменения обычных принципов конструирования требует отыскания новых путей в построении радиоэлектронной аппаратуры.

В настоящее время в качестве наиболее перспективных при решении этой задачи определены следующие направления:

1. Создание микромодульных конструкций.
2. Создание устройств с микросхемами на основе тонких пленок.

- 26 -

3. Создание устройств молекулярной электроники на основе использования свойств твёрдого тела.

В таблице I приведены данные, характеризующие возможности уменьшения объёмов, при использовании каждого из этих направлений.

Таблица I.7

	Число элементов в см <sup>3</sup>
1. Ламповые схемы с объёмным монтажом	0,28
2. Схемы на транзисторах с печатным монтажом	1,8
3. Микромодули	18
4. Микросхемы на плёнках	100-180
5. Устройства молекулярной электроники	1200

Создание микромодулей является первым шагом в области микроминиатюризации. Здесь так же, как и в схемах обычного вида, используют отдельные активные и пассивные элементы, размещенные на тонких изоляционных платах, причём соединения между платами выполнены паяными проводками. Микромодульные схемы по сравнению со схемами объёмного или плоского монтажа имеют ряд существенных преимуществ с точки зрения возможностей автоматизации производства. Кроме того, они позволяют более полно использовать объём.

Следующим шагом в области микроминиатюризации можно считать микросхемы, использующие тонкие плёнки из проводящих, резистивных, диэлектрических и других материалов в сочетании с полупроводниковыми устройствами. Плёнки наносятся на изоляционную подложку методом вакуумного распыления и являются основой всех пассивных элементов схемы. Активные элементы, например, транзисторы, используются как отдельные устройства, впаиваемые в схему. Предполагается, что в дальнейшем будет возможно создавать методом распыления полупроводниковых материалов и активные элементы схемы.

Схемы с тонкими плёнками позволяют создавать устройства, размещаемые в весьма малых объёмах, и значительно повысить надёжность этих устройств как за счёт характеристик используемых элементов, так и вследствие резкого уменьшения числа паяных контактов в схемных соединениях.

Наконец, наиболее полно поставленные задачи могут быть решены при использовании устройств молекулярной электроники, на описании которых мы остановимся ниже более подробно.

Из данных, приведенных в таблице, видно, что применение устройств молекулярной электроники позволит уменьшить объём и соответственно вес радиоэлектронной аппаратуры в сотни и тысячи раз, что будет большим качественным скачком в этой области техники.

С уменьшением объёма аппаратуры связано резкое сокращение количества используемых материалов, что имеет важное значение

- 28 -

для народного хозяйства. В устройствах молекулярной электроники почти весь применяемый материал является "активным", непосредственно участвующим в преобразовании электрического сигнала, в то время как в обычных радиоэлектронных блоках большая часть материала используется в силовых конструкциях, в конструкциях панелей, несущих детали, в изоляционных платах и т.д.

Если рассмотреть более подробно обычные радиоэлектронные детали, непосредственно участвующие в преобразовании сигнала, то и здесь большая часть используемого материала выполняет вспомогательные функции, прямо не относящиеся к основному процессу. За счёт устранения этих излишков материала и удаётся получить столь значительное уменьшение веса и объёма при использовании молекулярной электроники.

Переход на методы молекулярной электроники позволяет обеспечить широкую автоматизацию процессов производства аппаратуры.

Резкое сокращение количества потребляемых материалов, сокращение бесполезных отходов и почти полное исключение ручного труда при производстве аппаратуры позволит значительно снизить её стоимость.

Таким образом, только переход на системы молекулярной электроники позволит решить основные проблемы создания и производства современной радиоэлектронной аппаратуры.

- 29 -

## ГЛАВА II

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

#### П.1. Основной принцип формирования устройств молекулярной электроники

Молекулярная электроника базируется на возможности создавать в молекулярной структуре материала области или зоны, имеющие заданные свойства. В качестве исходных материалов используются достаточно чистые монокристаллы полупроводников (обычно германия или кремния).

В полупроводниках атомы расположены в виде кристаллической решетки, поддерживаемой внутренними электростатическими силами. С помощью специальной технологии в монокристалле полупроводника создаются отдельные зоны, каждая из которых обладает свойствами, определяющими заданные для неё электрические характеристики.

Эти характеристики почти полностью зависят от уровней энергии, на которых могут находиться электроны. В необходимых случаях на границах между зонами создаются слои, качественно отличающиеся от разделяемых зон.

Создавать в кристаллах области с определёнными электрическими данными можно путём внесения в атомную решетку структурных аномалий и химических примесей. При этом атомы и ионы сдвигаются внутрь решетки, в результате чего изменяется энер-

- 30 -

гетические уровни их электронов, что в свою очередь приводит к изменению электрических свойств данной области кристалла.

В результате получается полупроводниковый кристалл весьма малых размеров, который можно использовать как целое функциональное устройство, осуществляющее нужное преобразование электрического сигнала. В настоящее время уже создан ряд молекулярных устройств, выполняющих функции усилителей, генераторов, преобразователя непрерывных данных в цифровые, арифметических и логических элементов и т.п.

Для того, чтобы разобраться в работе этих устройств, необходимо остановиться на некоторых физических явлениях, происходящих в твердых телах, и в первую очередь, на процессах, имеющих место в полупроводниках. Рассмотрим сначала упрощенную картину явлений. Более полное представление о происходящих процессах можно получить только с помощью квантовой механики.

## П.2. Электронная и дырочная проводимость в полупроводниках [7]

Как уже отмечалось выше, используемые в радиоэлектронных устройствах полупроводники обычно представляют собой германий или кремний с малым количеством примесей (порядка одного атома примеси на  $10^9$  атомов вещества).

Химическая природа и размещение внутри кристаллической решетки так называемых электроположительных примесей таково,

- 31 -

что тепловое движение легко отщепляет от их атомов валентные электроны, которые при этом получают возможность свободно передвигаться. В результате получится полупроводник со свободными электронами. Другие примеси (их называют электроотрицательными) в результате теплового движения присоединяют к себе электроны атомов кристаллической решетки, образуя отрицательные ионы. В результате в решетке окажется недочёт электронов, как бы пустые места, откуда электроны изъяты. Эти пустые места не связаны с определенным атомом и могут переходить из одного участка в другой, диффундируя по всему кристаллу подобно тому, как диффундируют свободные электроны. Физический смысл перемещения пустого места - это заполнение его одним из соседних электронов, прежнее место которого окажется теперь пустым.

Пустые места перемещаются навстречу электронам. В электрическом поле, в котором электроны перемещаются в среднем слева направо, пустые места будут сдвигаться в среднем справа налево, т.е. так, как двигались бы свободные положительные заряды. Вместо того, чтобы описывать движение электронов, которые то здесь, то там переходят на пустые места, проще следить за самими пустыми местами. Их называют "дырками". Движение дырки подобно движению электрона с положительным зарядом.

Полупроводники с дырочным механизмом проводимости называют полупроводниками р-типа (с "позитивными" зарядами), а полупроводники с электронным механизмом - полупроводниками n - типа



- 32 -

(с "негативными" зарядами).

Если электроны освобождаются или закрепляются не примесями, а частицами основной решетки, то каждый освобожденный теплом или светом электрон оставляет в решетке пустое место. Следовательно, в этих случаях одновременно с каждым свободным электроном появляется дырка. И тот и другая участвуют в токе.

Процесс преимущественного перемещения дырок вдоль электрического поля происходит во всей массе проводника; он эквивалентен движению положительного электричества.

Во многих полупроводниках, например в закиси меди или селене, наблюдается чисто дырочная проводимость. Это полупроводники - р-типа. В других полупроводниках, например, в окиси алюминия, окиси цинка или окиси титана, перенос тока осуществляется движением свободных электронов. Это полупроводники  $n$ -типа. Наконец, такие полупроводники, как германий, кремний, сернистый свинец, сурьмянистый индий, в зависимости от присутствия в них тех или иных примесей, могут относиться как к р, так и к  $n$ -типу.

### П.3. Тепловое равновесие электронов в полупроводнике.

#### Свободное и связанное состояние

В полупроводнике, характеризуемом слабой связью валентных электронов с системой атомов, под влиянием теплового движения непрерывно происходят процессы перехода валентных электронов то в свободное, то в связанное состояние.

Физический смысл понятий свободного и связанного состояния отличается от общепринятого в разговорном языке.

Статистика Ферми допускает присутствие в каждой ячейке фазового пространства не более двух электронов с противоположными направлениями спина. Поэтому, если все ячейки пространства вокруг данного электрона заполнены парами электронов, то этот электрон оказывается связанным; его скорость и координаты не могут измениться. Он может, правда, перейти в отдалённую свободную ячейку, но для этого ему необходимо сообщить значительную дополнительную энергию.

Наоборот, если электрон в кристалле находится в фазовой ячейке, окруженной большим числом пустых ячеек, он может, следуя силе внешнего поля или толчкам теплового движения, переходить из одной ячейки в другую, увеличивая свою энергию и изменяя направление своего движения, т.е. свой импульс. Такой электрон следует считать свободным.

В полупроводнике тепловое движение переводит электроны в такое состояние повышенной энергии, в котором они оказываются среди свободных фазовых ячеек. Хаотически перемещаясь под действием теплового движения и смещаясь одновременно под влиянием внешнего электрического поля, свободный электрон раньше или позже вновь связывается, встретив дырку, атом примеси или такой дефект решетки, закрепление на котором уменьшает его потенциальную энергию. Аналогичное рассуждение можно отнести и к свободным дыркам.

- 34 -

Таким образом, свободный электрон обладает конечной длительностью свободного существования. Эта длительность различна от случая к случаю так же, как различны тепловые скорости  $v$  электронов. Длительности свободного существования, или, как часто говорят, длительности жизни отдельных свободных электронов группируются статистически вокруг некоторой средней длительности  $\bar{\tau}_0$ .

За время  $\bar{\tau}_0$  электрон, испытав многочисленные столкновения, успеет пройти сложный путь. Если в полупроводнике существует еще и внешнее электрическое поле  $E$ , то на хаотическое движение накладывается постоянное смещение со скоростью  $\Delta v$ , пропорциональной напряженности внешнего поля  $\Delta v = \mu E$ . Здесь  $\mu$  - подвижность электрона, или средняя скорость смещения, вызываемого полем в I в/см.

В отсутствие электрического поля электрон движется хаотически и за время  $\bar{\tau}_0$  удаляется от своего исходного положения в среднем на расстояние  $L$ , называемое диффузионной длиной.

#### П.4. Запорный слой

На границе полупроводника с металлом наблюдается своеобразное явление - возникновение запорного слоя. Это явление широко используется в технике.

Известно, что в проводнике внешний слой часто отличается по своему химическому составу от внутреннего. Испарение кислорода и серы или, наоборот, поглощение атмосферного кислорода

может сильно изменить проводимость проводника на некоторую глубину и создать непроводящую прослойку. Простейшими примерами таких прослоек являются тонкая плёнка окиси алюминия на металлическом алюминии или обескислороженная закись меди на границе с легко окисляющейся чистой медью.

В полупроводниках, помимо таких химически измененных слоев, даже при неизменном химическом составе, на границе между полупроводником и металлом или на границе двух полупроводников, обладающих значительной разностью контактных потенциалов, возникают резко отличные по своей проводимости приэлектродные слои.

Различие контактных потенциалов указывает на разную потенциальную энергию связи электронов с веществом. При контакте двух тел с разными контактными потенциалами, например полупроводника и металла, электроны или дырки переходят из того тела, где энергия их больше, в то, где она меньше, и заряжают его соответствующим знаком до тех пор, пока созданная в результате этого перехода разность потенциалов не уравнивает разности контактных потенциалов. В металле, обладающем большой проводимостью, весь необходимый для такой компенсации заряд размещается в одноатомном поверхностном слое толщиной  $d$  порядка  $10^{-8}$  см. В полупроводнике слой получается значительной толщины - тем большей, чем меньше электропроводность. При проводимости  $\sigma = 10^{-3} \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$  приэлектродный слой имеет толщину  $d$  около  $10^{-5}$  см; при проводимости  $\sigma = 10^{-7} \text{ ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$

- 36 -

$d \approx 10^{-3}$  см. Объёмный заряд, расположенный в этом слое, вызывает, в зависимости от своего знака, увеличение или уменьшение концентрации носителей тока. Положительный заряд в полупроводнике с электронным механизмом проводимости создаётся примесными ионами, оставшимися после удаления из слоя электронов; в результате электропроводность слоя резко падает.

Если подвижными являются дырки, то положительный заряд создается в результате накопления их в приэлектродном слое в количестве, превышающем заряд отрицательных ионов, что вызывает в нем повышенную проводимость. Аналогичные явления происходят и на границе двух полупроводников с разными контактными потенциалами.

Если в полупроводнике с электронной проводимостью к непроводящему слою, образовавшемуся вследствие удаления из него электронов, приложить извне разность потенциалов такого направления, которое способствует дальнейшему удалению электронов, толщина слоя увеличивается и его сопротивление растёт. При поле обратного направления слой становится тоньше и его сопротивление падает.

Соотношение между противоположными токами при одинаковой разности потенциалов на границе металла с полупроводником, называемое коэффициентом выпрямления, получается небольшим по сравнению с коэффициентами выпрямления ламповых выпрямителей, достигающими многих тысяч. В работах А.Ф.Иоффе и его

- 37 -

сотрудников показано, что коэффициенты выпрямления такого же порядка получаются на границе между полупроводниками с дырочным и электронным механизмом проводимости или, другими словами, на р-п границе. Такую выпрямляющую границу можно создать и внутри одного сплошного кристалла. В результате получается выпрямитель, который в одном направлении, называемом пропускным, обладает весьма малым сопротивлением, а в другом — запорном направлении, оказывается почти изолятором. Прикладывая к нему переменное напряжение, мы будем наблюдать значительные токи только одного направления и получим выпрямитель переменного тока. В современной электротехнике полупроводниковые выпрямители переменного тока получили большое распространение.

Возможность формирования запорных слоев позволила также создать новый тип фотозлемента. Если полупроводник, имеющий на своей поверхности запорный слой, обладает фоточувствительностью, то вырванные светом фотоэлектроны, проходя сквозь запорный слой, заряжают прозрачный электрод, находящийся на внешней поверхности слоя. Между электродом и полупроводником возникает разность потенциалов, достигающая нескольких десятых вольта. Под влиянием этой разности потенциалов во внешней цепи текут довольно значительные токи, доходящие в некоторых случаях ( $Te_2S$ ,  $Ag_2S$ ,  $CdS$ ) до 10 ма/мм, и даже ( $Ge$ ) до 50 ма/мм, т.е. в сотни раз большие, чем в лучших вакуумных фотозлементах. В отличие от последних фотозлемента с запорным слоем не требуют внешней электродвижущей силы и являются источниками электрической энергии, получаемой

- 38 -

только за счёт энергии поглощенного света. В настоящее время созданы кремниевые фотоэлементы с коэффициентом полезного действия превращения световой энергии в электрическую порядка 11%.

#### П.5. Квантовые состояния электронов в отдельном атоме

Состояние электрона характеризуется квантовыми законами, в частности, для отдельного атома оно описывается четырьмя квантовыми числами:  $n$ ,  $l$ ,  $j$ ,  $m$ , из которых первое, в основном, определяет энергию, второе - вращательный момент.

Переходы электрона с одного энергетического уровня на другой не всегда возможны. Для перехода требуется, прежде всего, чтобы состояние, в которое перейдёт электрон, не было занято другим электроном. Необходимо также, чтобы между квантовыми числами обоих состояний существовали определенные соотношения. В частности, нужно, чтобы второе квантовое число  $l$  изменялось при переходе на единицу.

По величине квантового числа  $l$  различают следующие состояния атомных электронов:

- $s$  - состояние при  $l = 0$ ,
- $p$  - состояние при  $l = 1$ ,
- $d$  - состояние при  $l = 2$ ,
- $f$  - состояние при  $l = 3$ .

- 39 -

Высказанное выше "правило отбора" допускает лишь переходы из состояния  $p$  в состояние  $s$  или обратно, из состояния  $p$  в состояние  $d$  или из состояния  $d$  в состояние  $f$ , но не допускает перехода из одного  $s$ -состояния в другое  $s$ -состояние.

Значение главного квантового числа  $n$  отмечается соответственной цифрой при символах  $s, p, d, f$ ; состояния различаются, как:

- $K$  - уровни с  $n=1$ , например  $1_s$  (ближайшие к ядру атома электроны);
- $L$  - уровни с  $n=2$ , например  $2_s, 2_p$  (второй слой электронов);
- $M$  - уровни с  $n=3$ , например  $3_s, 3_p, 3_d$  (третий слой электронов);
- $N$  - уровни с  $n=4$ , например  $4_s, 4_p, 4_d, 4_f$  (четвёртый слой электронов).

Обозначения  $K, L, M, N$  были приняты условно для различных групп рентгеновских лучей, испускаемых данным телом, в то время, когда не существовало еще теории атома, разъясняющей физический смысл спектров. Позже выяснилось, что группа спектральных линий, названная  $K$ - группой, вызвана переходами электронов из разных состояний на уровни с главным квантовым числом  $n=1$  (т.е. в состояние  $1_s$ ),  $L$ - группа линий спектра вызвана переходами в состояние с  $n=2$ , т.е. в состоя-



- 40 -

ния  $2s$ ,  $2p$  и т.д.

В атоме в состоянии  $S$  могут присутствовать два электрона с противоположными спинами: имеется три различных  $p$  состояния, в каждом из которых может быть по два электрона. Если энергии электронов в каких-нибудь состояниях одинаковы, то эти состояния называют вырожденными.

#### П.6. Квантовые состояния электронов в твёрдом теле

При переходе от отдельных атомов и молекул разреженного газа к твёрдому или жидкому телу происходит сближение атомов, которое усиливает их взаимодействие; при этом электрические поля отдельных атомов перекрываются.

В разреженном газе можно рассматривать каждый атом как самостоятельную квантовую систему и считать, что в пределах атома не может быть двух электронов с тождественными четырьмя квантовыми числами, допуская однако повторение одинаковых квантовых состояний для электронов разных атомов. Твёрдое или жидкое тело приходится считать единой системой, в которой все электроны должны быть в различных состояниях.

Переход от отдельных атомов или молекул к твёрдому телу представим себе как их постепенное сближение между собой.

Допустим, что первоначально атомы находились в таком же расположении друг относительно друга, как в кристалле, но на

- 41 -

столь больших расстояниях, что взаимодействием между ними можно было пренебречь. Сохраняя такое расположение атомов, но непрерывно уменьшая расстояния между ними, мы перейдем к кристаллу, свойства которого различны в зависимости от направления.

При сближении большого числа  $N$  одинаковых атомов, образующих твердое или жидкое тело, взаимодействие их электрических полей приводит к расщеплению каждого из квантовых состояний отдельного атома на  $N$  различных состояний. Вместо системы дискретных уровней энергии, которыми характеризуется отдельный атом, при переходе к твердому телу появляется система полос, каждая из которых представляет собой энергетический уровень атома, расщепленный на  $N$  чрезвычайно близких друг к другу уровней (рис. П.1). Расстояние между соседними уровнями имеет порядок  $10^{-22}$  эл.-в, поэтому их совокупность можно рассматривать как сплошную полосу шириной порядка  $1$  эл.-в, в пределах которой может находиться энергия электрона. Такую полосу энергетических состояний мы будем называть зоной. Однако в этой "почти" сплошной полосе энергии находится всё же  $N$  и только  $N$  уровней.

Любой процесс, происходящий с электронами, сводится к изменению их состояний, к изменению величины или направления их скорости, к повороту их спина, или к изменению энергии. Если же все доступные электронам квантовые состояния заняты (а в каждом таком состоянии, включая в определение состояния

- 42 -

и направление спина, может находиться только один электрон), никакие изменения состояний невозможны, а следовательно, невозможны и такие изменения в движении электронов, которые вызывали бы электрический ток.

В случае электронного полупроводника понятия "свободный" или "связанный" электрон приобретают иной смысл, чем соответственные представления о свободных и связанных ионах. Ион связан химическими или электростатическими силами с окружающей средой; связанный ион находится в положении такого минимума потенциальной энергии, для выхода из которого необходимо затратить работу, значительно превышающую  $kT$ . Если же энергия иона не изменяется при его перемещении или глубина энергетического минимума настолько мала, что тепловое движение легко переводит ион из одного минимума в другой, то создаются условия, при которых внешнее электрическое поле в зависимости от своего направления может ускорять или замедлять движение иона; такой ион свободен.

Входящий в состав твёрдого тела электрон свободен тогда, когда в энергетическом спектре тела имеется достаточное количество близких по энергии состояний (в пределах  $kT$ ), не занятых другими электронами. Под влиянием внешних сил и теплового движения такой электрон может изменить свое состояние, перейдя в соответствующее внешнему полю состояние с близкой энергией. Наоборот, тот же электрон окажется связанным, не

- 43 -

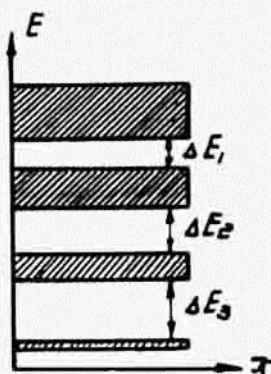


Рис.П.1 - В твёрдом теле энергетические уровни представляют собой систему полос, разделённых запретными зонами;  $\Delta E$  - расстояние между разрешёнными зонами энергии.

способным участвовать в токе, если соседние состояния, в которые поле должно было бы его перевести, уже заняты другими электронами.

Связанные электроны не участвуют в токе. Но это не значит, что внешнее электрическое поле не оказывает никакого влияния на систему электронов твёрдого тела. Под совместным влиянием соседних атомов и внешнего поля изменяются самые квантовые состояния. Электроны несколько смещаются из своего положения равновесия, оставаясь в пределах того же атома. Величина их смещения невелика и пропорциональна напряжению  $E$ . Такое диэлектрическое смещение электронов следует за полем с запаздыванием не более  $10^{-14}$  -  $10^{-15}$  сек. Оно ослабляет существующее электрическое поле в некоторое число  $\epsilon$  раз; число  $\epsilon$  называется диэлектрической постоянной среды, оно

- 44 -

равно квадрату коэффициента преломления для света соответственной частоты. Большая диэлектрическая постоянная твёрдого и жидкого тела ослабляет в нём все электрические силы взаимодействия. Однако как для отдельного атома, так и для твёрдого тела остаётся справедливым основное требование: электрон может находиться стационарно только в одном из незанятых другим электроном квантовых состояний и не может пребывать ни в каких промежуточных состояниях.

Итак, мы приходим к заключению, что в твёрдом или в жидком теле, состоящем из большого числа  $N$  одинаковых частиц, возможные состояния электрона представляют собой полосы из  $2N$  близких уровней, разделенные зонами, в которых отсутствуют квантовые состояния и которые поэтому оказываются запретными для электронов данного тела. Дискретным уровнем атома соответствует в твёрдом теле дискретная система полос, разделенных запретными зонами (рис.П.2).

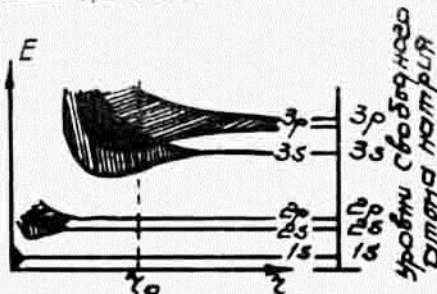


Рис.П.2 - Расщепление уровней при сближении атомов и образование энергетического спектра твёрдого тела.

### П.7. Заполненная зона и свободная зона

В твёрдом теле электроны заполняют зону (а) основных уровней (рис.П.3). При определенных условиях отдельные электроны могут перейти из этой зоны в свободную зону (в), которую также можно назвать зоной возбужденных состояний.

Запретная полоса отделяет заполненную электронами зону основных уровней от уровней возбужденных состояний электрона. Эти состояния свободны: любое из них может быть замещено электроном, перешедшим из основной полосы или с атомов примеси. Переход в свободные состояния повышенной энергии не может, однако, происходить путём постепенного накопления и нарастания энергии, так как все промежуточные значения энергии находятся в запретной зоне.

Для перехода электрона в свободную зону необходим источник, который мог бы сразу сообщить ему энергию, равную ширине запретной зоны  $\Delta E_0$  или превышающую её. Такими источниками могут быть, например, поглощенные электроном фотоны с энергией  $h\nu > \Delta E_0$ . Переход может быть вызван и существующим в теле хаотическим тепловым движением, несмотря на то, что средняя энергия теплового движения во много раз меньше  $\Delta E_0$ . Так, при комнатной температуре средняя тепловая энергия  $kT$  составляет около 0,03 э.в., тогда как  $\Delta E_0$  полупроводников имеет обычно значения от 0,5 до 1,5 э.в.

- 46 -

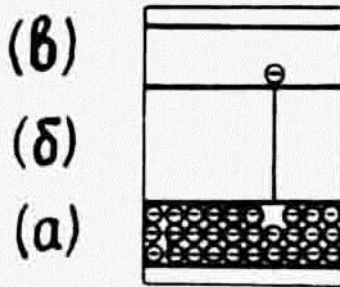


Рис.П.3 - Заполненная электронами зона основных уровней (а), запретная зона (б) и свободная зона, т.е. зона возбужденных состояний (в).

Наконец, источниками, способными поставлять электроны в свободную зону, могут быть атомы посторонних примесей и атомы основного вещества, в случае отклонения от стехиометрического состава химического соединения. Электроны таких включений как не участвующие в образовании зон (в отличие от электронов заполненной зоны, совокупность которых охватывает весь объем тела) локализованы там, где находятся сами атомы. Они могут обладать энергиями, отличными от энергии электронов основной решетки, в том числе и энергиями, лежащими в запретной зоне. В этом случае их энергия окажется ближе к границе свободной зоны; на переход их в свободное состояние потребуется энергия  $\Delta E < \Delta E_0$ .

Перешедшие в свободную зону электроны располагаются у нижнего края свободной зоны, занимая уровни с наименьшими энергиями, независимо от своего происхождения. Каждый из этих электронов обладает одинаковой вероятностью возврата в основную зону, в одно из свободных состояний с меньшей энергией или на уровень примеси.

#### П.8. Условия движения электрона в полупроводнике

Электрон, движущийся в вакууме в отсутствие силового поля, сохраняет свою скорость  $v$  неизменной. В кристаллической решетке скорость электрона сохраняется только в среднем, да и то на небольших расстояниях. Если рассматривать движение электрона классически, то скорость его каждый раз должна убывать и вновь возрастать при прохождении сквозь энергетические барьеры между ионами или атомами решетки. Рассматривая движение реальных электронов, обладающих волновыми свойствами, необходимо иметь в виду, что мгновенное значение скорости размыто в пределах  $\Delta v = \frac{h}{m} \cdot \frac{1}{\Delta a}$ ,

где  $\Delta a$  - порядка постоянной решетки. Подставив

$h = 6 \cdot 10^{-27}$  эрг.сек.,  $m = 9 \cdot 10^{-28}$  г. и  $\Delta a = 3 \cdot 10^{-8}$  см, получим  $\Delta v = 10^8$  см/сек. Таким образом, размытие  $\Delta v$  больше самой величины  $v$ , которая для свободных электронов равна  $\sim 10^7$  см/сек. Определение мгновенной скорости электрона в полупроводнике теряет смысл. Сохраняет свое значение лишь понятие средней скорости, определяемое на протяжении многих расстояний между атомами.



- 48 -

Всю совокупность электронов полупроводника следует рассматривать как единую систему. Электроны при таком подходе не локализованы и обладают конечной вероятностью нахождения в любом участке тела. В строго периодическом поле кристалла любой электрон, несмотря на существующие между атомами энергетические барьеры, может передвигаться без рассеяния энергии, если его энергия и импульс лежат в области разрешенных квантовых состояний.

Однако практически существует большое различие между электронами более глубоких  $K, L \dots$  слоев и валентными электронами. Первые связаны мощными силами взаимодействия со своими ядрами, энергетические барьеры между ними измеряются тысячами электрон-вольт, а их волновые функции сконцентрированы в небольшом объеме вокруг ядра. Волновые функции  $K$  и  $L$  - электронов различных атомов почти не перекрываются. Электростатические силы взаимодействия между ними ничтожны по сравнению с силами, связывающими электрон с его ядром. Поэтому энергетические уровни таких электронов, как правило, не расщеплены и представляют собой почти такие же узкие спектральные термы, как и в отдельных атомах. Внутренние  $K$  и  $L$  - электроны локализованы вблизи своих ядер.

Существует конечная вероятность того, что такой электрон может оказаться в любом участке кристалла, но для этого требуются громадные промежутки времени. Практически это значит,

- 49 -

что электроны внутренних слоев атома остаются вблизи своих ядер. Внутренние электроны не принимают участия в прохождении тока или в диффузии внутри твердого тела даже тогда, когда они входят в состав незаконченной оболочки атома.

Если же внутренние электроны образуют замкнутую группу квантовых состояний атома, то соответствующая полоса уровней твердого тела сплошь заполнена. Это - вторая, независимая причина, которая препятствует внутренним электронам участвовать в переносе тока или диффузии. Иное дело - валентные электроны, волновые функции которых перекрывают энергетические барьеры между атомами: они не локализованы в определенных участках тела.

Что же касается свободных электронов или дырок, то концентрация их часто настолько мала ( $10^{15}$ - $10^{18}$  см<sup>-3</sup>), что можно говорить о волновых функциях каждого из них в отдельности, следовательно, об их положении в пределах тела.

Как выразятся законы движения свободных электронов в твердом теле?

Волновые функции  $\psi$  электрона, движущегося в вакууме в направлении оси  $x$ , имеют вид

$$\psi(x) = A e^{ikx}, \quad (\text{П.1})$$

где  $A$  - постоянная, не зависящая от " $x$ ".

В случае движения электрона в периодическом поле кристаллической решетки можно представить волновую функцию  $\psi$  анало-

- 50 -

гичным образом, но с множителем  $A$ , являющимся периодической функцией координаты  $x$  с периодом решетки в направлении движения электрона. Кроме того, в анизотропной среде  $A$  зависит также от волнового вектора  $K$ .

Таким образом, волновую функцию  $\Psi_k$  можно выразить аналогично волновой функции свободного электрона в виде:

$$\Psi_k(x) = A_k(x) e^{ikx} \quad (\text{П.2})$$

при данном  $K$

$$A_k(x) = A_k(x + \mu a), \quad (\text{П.3})$$

где  $a$  - период решетки, а  $\mu$  - любое целое число.

Волновые функции электронов в кристалле могут быть описаны как гармонические волны, амплитуды которых модулированы с периодом, равным постоянной решетки.

Приняв, что атомы или ионы, из которых построена кристаллическая решетка, расположены в её узлах, что все внутренние  $K$ ,  $L$  - и  $M$  - группы электронов связаны со своими ядрами, а все валентные электроны, за исключением рассматриваемого, непрерывно заполняют все остальное пространство, можно убедиться, что функция (П.2) удовлетворяет уравнению квантовой механики, описывающему движение электрона в поле периодического потенциала. Сделанные здесь допущения следует признать совершенно естественными и для полупроводника: мы учитываем, что сравнительно тяжелые ионы или атомы медленно изменяют

- 51 -

свое положение в пространстве; их можно считать практически неподвижными при рассмотрении быстро движущихся электронов. Вместе с тем совокупность громадного числа хаотически движущихся электронов столь же естественно заменить зарядом, непрерывно распределенным в поле, определяемом мгновенным расположением атомов без учёта влияния того электрона, движение которого мы изучаем. Движение этого электрона могло бы существенно изменить распределение заряда остальных электронов только на таких расстояниях, на которых электрическое поле данного электрона еще сравнимо с периодическим полем самой решетки.

Однако в полупроводниках обычно имеют дело с небольшой концентрацией подвижных электронов - порядка  $10^{14}$ - $10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Средние расстояния между ними измеряются десятками или сотнями расстояний между атомами. Поэтому имеется все основания считать, что движение одного свободного электрона не изменяет заметным образом распределения всех остальных электронов.

Выводы такой теории практически совпадают с результатами более строгой, но и гораздо более сложной теории твёрдого тела, учитывающей изменения в распределении зарядов всех электронов при движении одиночного электрона.

Вероятность нахождения электрона в определенном месте пространства равняется произведению функции  $\psi$  на её сопряженное значение, т.е. квадрату модуля функции  $A$ .

- 52 -

Для свободного электрона в вакууме, согласно уравнению (П.1),  $|\psi_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})|^2$  при постоянном значении  $\Lambda$  не зависит от  $\mathbf{x}$ . Электрон, обладающий данным волновым вектором  $\mathbf{K}$ , как уже указано, с одинаковой вероятностью может находиться в любой точке пространства; движение электрона описывается при данном  $\mathbf{K}$  плоской волной определенного периода.

### П.9. Подвижность носителей тока

Если внутри полупроводника существует одновременно электрическое и магнитное поля, то движение электронов и дырок происходит так же, как происходило бы движение свободных отрицательных и положительных зарядов, численно равных заряду электрона и обладающих определенными, хотя и различными, эффективными массами.

Уравнения квантовой теории показывают, как изменяется за время  $\tau$  под влиянием поля скорость движения электрона. Эти изменения невелики. Средняя кинетическая энергия электронов  $E$  при небольшой их концентрации, обычно не достигающей в полупроводниках границ вырождения, равна  $3/2 kT$ , что составляет при комнатной температуре около 0,03 э.в. Между тем наибольшая энергия, накопленная даже в электрическом поле  $10^4$  в/см, на длине свободного пробега  $\ell = 10^{-7}$  см. составит всего  $10^{-3}$  э.в., что в 30 раз меньше средней тепловой энергии. Увеличение тепловой скорости становится заметным лишь в полях порядка  $10^5$  в/см и выше, или при  $e \gg 10^{-7}$  см.

- 53 -

Таким образом, несмотря на присутствие в полупроводнике электрического поля, электроны движутся в основном хаотически, почти с такими же скоростями, как и без поля. Однако вся масса хаотически движущихся электронов "сдувается" электрическим полем со сравнительно небольшой средней скоростью, пропорциональной напряжению поля.

Отношение этой добавочной общей скорости, всей совокупности свободных электронов или дырок, к напряженности поля называется подвижностью.

Поскольку опыт показывает, что вплоть до полей  $10^4$  в/см в большинстве полупроводников справедлив закон Ома, можно утверждать, что в этих пределах подвижность не зависит от величины поля. За пределами применимости закона Ома подвижность добавочно введенных зарядов (например, фотоэлектронов), а следовательно, и ничем от них не отличающихся свободных зарядов, вызванных тепловым движением, сохраняет часто то же значение. Отклонение от закона Ома вызвано в этих условиях увеличением числа свободных электронов.

В атомных решетках подвижность в сильных полях должна убывать как  $1/\sqrt{E}$ , где  $E$  - напряженность поля. В ионных кристаллах вплоть до полей в несколько тысяч в/см подвижность от поля не зависит. В более сильных полях, которые заметно изменяют средние тепловые скорости электронов, можно ожидать зависимости подвижности от напряженности поля  $E$ : подвижность

- 54 -

растёт с увеличением скорости, а следовательно и с ростом поля.

### П.10. Примесные уровни

Мы рассматривали до сих пор поведение электронов в кристаллической решетке, состоящей из большого числа одинаковых атомов или молекул, когда строго соблюдается стехиометрическое соотношение между компонентами. Такие идеальные кристаллы не встречаются на практике. Реальные кристаллы отличаются от идеальных в следующих отношениях.

1. Структура реальных полупроводников не обладает строгой периодичностью идеального кристалла. Чаще всего это мелкокристаллический агрегат, в отдельных кристалликах которого встречаются трещины, сдвиги, повороты одних участков по отношению к другим и т.п.

Всякое такое нарушение периодичности рассеивает электронные волны и снижает подвижность электронов и дырок. Однако до тех пор, пока число искажений невелико, влияние их на концентрацию свободных зарядов и на электрические свойства полупроводников так же незначительно, как в случае твёрдых электролитов. Наличие искажений в решетке может, однако, привести к закреплению на них электронов, если эти искажения таковы, что создаются дискретные квантовые уровни.

2. Гораздо большее значение имеют нарушения правильности химического состава, выражающиеся избытком или недостатком

- 55 -

одного из компонентов соединения или присутствием посторонних атомов. Излишние или недостающие атомы соединения и посторонние атомы вносят дополнительные квантовые уровни, отличающиеся от уровней основной решетки. В то время как последние сливаются в широкие полосы, в которых объединяются валентные электроны всего кристалла, примесные уровни электронов локализованы в тех областях кристалла, где находятся связанные с ними атомы. Эти добавочные уровни, локализованные в решетке, изменены по сравнению с уровнями тех же атомов в свободном состоянии; однако они не расщеплены, если примесные атомы расположены в среднем достаточно далеко друг от друга. Если же концентрация примесных атомов такова, что волновые функции валентных электронов перекрываются, то уровни примесных электронов также расщепляются и образуют объединенную примесную полосу уровней, способную обеспечить проводимость, если не все уровни, лежащие в этой полосе, заняты электронами.

В полупроводниках могут одновременно находиться как примеси типа доноров, способные отдавать электроны в свободную зону, так и акцепторы, способные присоединять электроны, переходящие из заполненной зоны. Если уровни доноров выше уровней акцепторов, то электроны перейдут с доноров на акцепторы, превратив первые в положительные ионы, а вторые - в отрицательные. Разность между числом доноров и акцепторов определит



- 56 -

проводимость полупроводника. В зависимости от соотношения между донорами и акцепторами и от расстояния до края зоны тех из них, которых окажется больше, определится электронная или дырочная проводимость полупроводника.

### П.И. Энергетические уровни в полупроводниках

Изложенные в предыдущих параграфах соображения позволяют дать наглядную графическую схему энергетических уровней в полупроводниках.

Рассмотрим сначала случай, когда в поле периодического потенциала движутся валентные электроны. Электроны внутренних *K*, *L* и *M*- групп, как мы уже видели, прочно связаны со своими ядрами. Их взаимодействие с соседними атомами настолько слабо, что не создаёт практически заметного расщепления уровней, остающихся почти столь же резкими, как и в отдельном атоме. Волновые функции валентных электронов перекрываются с волновыми функциями электронов соседних атомов, образуя единую систему с полосой из  $2N$  расщепленных состояний. Чем сильнее связь валентных электронов со своим ядром и чем слабее взаимодействие их с соседними атомами, тем уже полоса уровней, в которую превращаются дискретные уровни электронов каждого отдельного атома.

При изображении системы уровней валентных электронов нейтральный кристалл можно рассматривать как совокупность пе-

- 57 -

риодически расположенных в узлах решетки положительных ионов, пространство между которыми непрерывно заполнено электронами.

В участках, где расположены положительные ионы, потенциальная энергия электронов резко снижается, а в промежутках между ними энергия обладает максимумом. Высота этих максимумов может превышать энергию квантовых уровней электронов. Однако образующийся в этих условиях энергетический барьер легко преодолевается, если при небольших межатомных расстояниях он не превышает 1-3 э.в. Сквозь такой барьер резонирующие электроны соседних атомов обмениваются  $10^{10}$  -  $10^{15}$  раз в секунду.

До сих пор мы не учитывали тех изменений кристаллической решетки, которые вносят электроны или дырки, перешедшие в свободное состояние. Электрон и ионизированный атом примеси поляризует своим электрическим полем окружающую среду и тем сильнее, чем выше диэлектрическая постоянная  $\epsilon$  этой среды. Поляризация среды всегда ведет к уменьшению потенциальной энергии; в результате поляризации энергетический уровень электрона снижается.

Когда электрон движется, он вызывает перемещение и созданного им состояния поляризации. При этом поляризуются новые области кристалла, в которые переместился электрон, в то время как оставленные электроном области возвращаются в исходное состояние. Такие свободные заряды, движущиеся в окружении поляризованной среды, называют поляронами. Поляронные состоя-

- 58 -

ния образуют в кристалле сплошную зону, внутри которой поларон движется по тем же законам, что и электрон в свободной зоне. В кристалле также могут возникнуть особые состояния совокупности электронов, которые называют экситонами, т.е. возбуждениями. При определенных условиях, например, под влиянием поглощенного фотона, электрон может перейти в возбужденное состояние, образуя пару: положительная дырка - электрон. В экситоне электрон остаётся связанным с положительным зарядом дырки и вместе с ним может переходить от одного атома к другому. Связанная между собой пара зарядов электрон и дырка, т.е. экситон, хаотически диффундирует внутри кристалла до тех пор, пока не встретит условий для закрепления одного из зарядов, для перехода электрона в свободную зону или для воссоединения электрона с дыркой.

Энергетические схемы и распределение электронов по энергиям для полупроводников различного типа представлены на рис. II.4, а уровни экситонов и поляронов иллюстрируются рис. II.5.

Все приведенные здесь диаграммы изображают энергию квантовых состояний электронов в кристалле. Не следует забывать, что энергия полностью не характеризует квантового состояния. В кристалле, как и в отдельном атоме, состояния определяются всей совокупностью квантовых чисел, что сказывается, например, на правилах отбора. Рентгеновские спектры полупроводни-

- 59 -

ков и металлов при более точном анализе действительно обнаруживает явления, возникающие благодаря наличию других квантовых характеристик, помимо энергии.

Связь между оптическими спектрами поглощения и фотоэффекта, с одной стороны, и шириной запретной зоны - с другой, осложняется правилами отбора. Для полупроводника эти правила требуют равенства волнового числа  $K$  на обоих уровнях, между которыми имеет место переход электронов. Может оказаться, что переходы с уровней, соответствующих верхней границе заполненной зоны, на нижнюю границу свободной зоны запрещены и что переходы возможны лишь на другую систему уровней, не заключающую в себе уровни энергии нижнего края свободной зоны.

Запреты не имеют места для тепловых переходов, в которых участвуют тяжелые атомы и фононы, обладающие достаточно большим импульсом  $\frac{h v_s}{v_s}$ , где  $v$  - скорость звука; в чисто оптических переходах участвует только фотон с ничтожным импульсом, равным  $\frac{h v}{c}$ , где  $c$  - скорость света.

Поэтому наименьшая тепловая энергия, необходимая для перевода электрона из заполненной полосы в свободную, в отличие от энергии, затрачиваемой на оптический переход, всегда равна ширине запретной зоны.

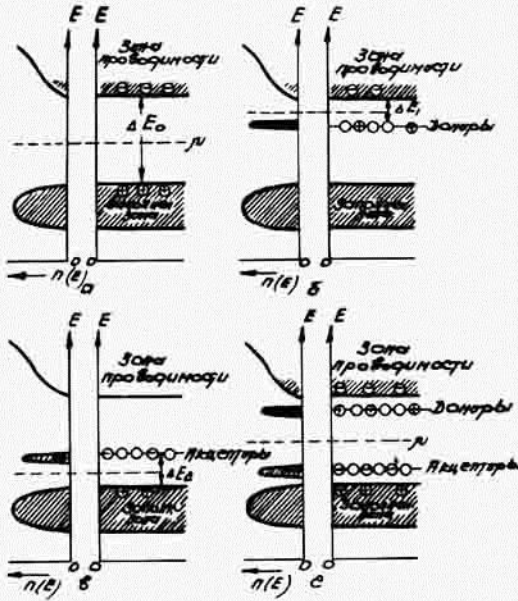


Рис.П.4 - Энергетические схемы чистого и примесных полупроводников при  $T > 0$

а) - чистый, беспримесный полупроводник; б) - полупроводник с примесью доноров; в) - полупроводник с примесью акцепторов; г) - полупроводник с равным числом доноров и акцепторов.

$n(E)$  - число квантовых состояний на единицу энергии в единице объема.

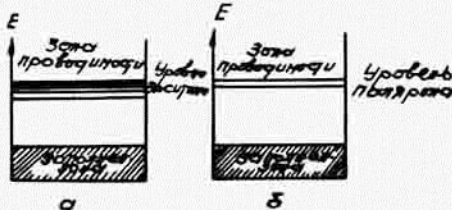


Рис.П.5 - Энергетические схемы полупроводников с экситонными (а) и поляронными (б) уровнями.

- 61 -

П.12. Переход типа р-п

Переход типа р-п имеет место в том случае, если в кристалле существует область с проводимостью  $n$ -типа, которая переходит в область р-типа. При этом важно, чтобы переход из одной области в другую был осуществлен внутри монокристалла. Следовательно, для образования перехода недостаточно прижать друг к другу, например, два куска германия, обладающих обратным типом проводимости.

Допустим, что имеется кристалл германия (рис.П.6), у которого одна половина содержит доноры, а другая акцепторы. Для упрощения будем считать, что переход симметричный, т.е. концентрация доноров  $n_0$  равна концентрации акцепторов  $n_A$  : в нашем случае примем

$$n_0 = n_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$$

При комнатной температуре можно предполагать существование полной ионизации примесей, так что концентрация электронов в правой части кристалла будет  $n_N = 10^{16}$  электронов/см<sup>3</sup>, а в левой половине концентрация дырок  $P_p = 10^{16}$  дырок. Вследствие тепловой ионизации образуются также и неосновные носители, согласно соотношению  $n_p = n_i$ , так что мы должны считать, что в левой части будет концентрация  $n_p = 10^{10}$  электронов/см<sup>3</sup>, а в правой  $P_n = 10^{10}$  дырок/см<sup>3</sup>. Хотя в  $n$ -области приходится на один миллион электронов только одна дырка и аналогично в  $p$ -области на миллион дырок - только один электрон, все-таки нельзя пренебрегать неосновными носителями, так как они оказывают решающее влияние на характеристику выпрям-

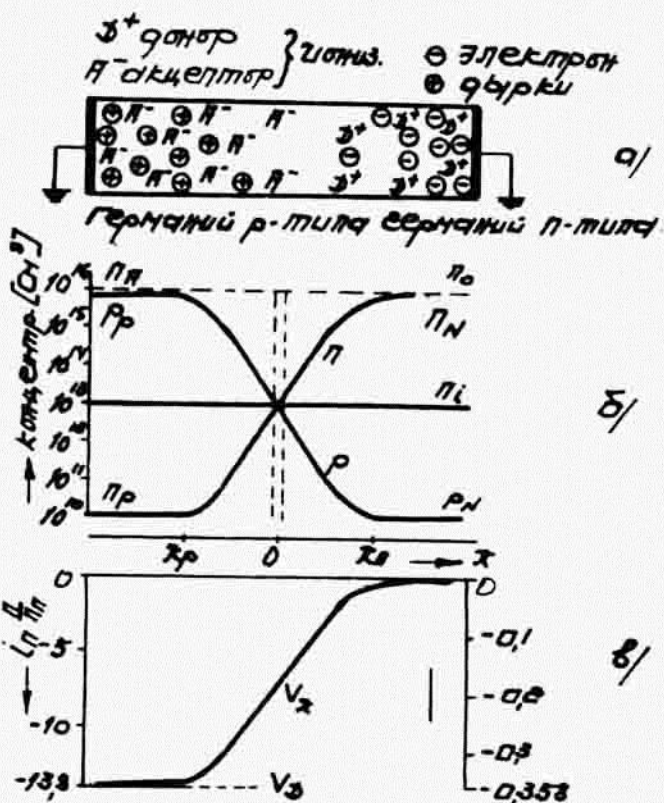


Рис. П.6 - р-п-переход в кристалле германия. Случай отсутствия тока.

а)-распределение активных центров и носителей тока. Доноры и акцепторы распределены равномерно в своей области. Электроны и дырки вблизи перехода имеются в меньшем количестве, чем на более удаленном расстоянии; б)-распределение концентрации электронов и дырок на крутом переходе. Концентрация доноров и акцепторов изображена пунктиром; в) - распределение потенциала в области перехода.

- 63 -

ления. Для упрощения предполагаем, что концентрация акцепторов в левой половине постоянная и что в правой половине кристалла она переходит скачком в постоянную концентрацию доноров.

Концентрация электронов и дырок на границе  $p-n$ -перехода такого резкого скачка не совершает, а понижается постепенно с первоначальной величины  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  до величины собственной проводимости  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Такое поведение обуславливается основными законами электричества, наглядно может быть объяснено следующим образом.

Электроны будут диффундировать из правой половины, где их концентрация больше, в левую половину, где их концентрация очень мала. То же самое происходит и с дырками, только они диффундируют в обратном направлении.

Переход электронов и дырок будет продолжаться до тех пор, пока электрическое поле, которое возбуждается пространственным зарядом ионизированных неподвижных доноров и акцепторов, его не остановит. Поэтому, даже когда внешний источник напряжения не подключен, на  $p-n$  переходе существует постоянное электрическое поле. Это электрическое поле создаёт поток электронов и дырок через переход в направлении, обратном диффузионному потоку электронов и дырок, создаваемому градиентом концентрации носителей. В равновесном состоянии, в отсутствие тока по внешней цепи, диффузионный ток электронов и дырок через переход равняется току, возбуждаемому внутренним электрическим



- 64 -

полем. Последнее представляет потенциальный барьер, который является причиной проводимости в одном направлении. Величина потенциала может быть рассчитана на основании следующего соображения.

Положительный пространственный заряд в области ( $x > 0$ ) создаёт изгиб электростатической кривой потенциала  $V_x$  книзу, согласно уравнению Пуассона,

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = -\frac{qx}{\epsilon E_0} < 0, \quad (\text{П.4})$$

а отрицательный пространственный заряд в левой половине ( $x < 0$ ) кристалла изгибает кривую потенциала  $V_x$  обратно в горизонтальное положение, так что получается потенциальная ступенька.

Высоту потенциальной ступеньки называют диффузионным напряжением  $V_D$ . Эту величину можно выразить через  $n_N$  и  $n_p$  следующим образом:

$$V_D = \frac{kT}{e} \ln(n_N/n_p). \quad (\text{П.5})$$

В нашем числовом примере:

$$V_D = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 3 \cdot 10^2}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{10^{16}}{10^{10}} = 0,36 \text{ в.}$$

Если воспользоваться понятием энергии Ферми, то можно получить результат в более простом виде как разность уровней Ферми для областей  $n$  и  $p$ , т.е.

$$V_D = (E_{f_1} - E_{f_2}) / e \quad (\text{П.6})$$

- 65 -

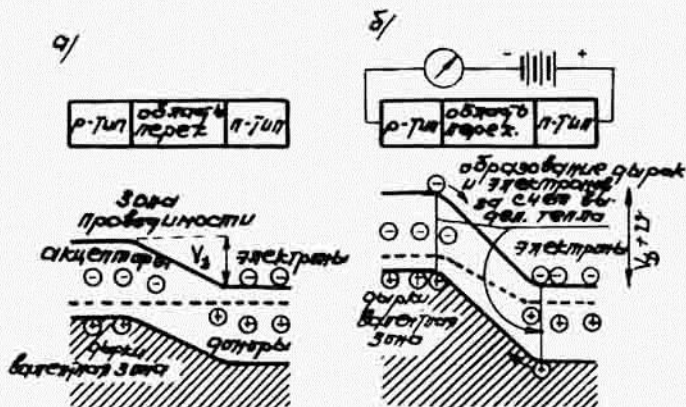


Рис.П.7 - Зонная модель p-n-перехода

а) - переход при тепловом равновесии; внешнее напряжение отсутствует. Уровни Ферми уравниваются и между обоими слоями образуется потенциальная разность  $V_D$ , которая препятствует проникновению дырок в область n-типа, а электронов в области p-типа; б) - при подключении внешнего источника в таком направлении, что потенциальная разность увеличивается до  $V_D + U$ , получится обратное направление тока. Обратный ток состоит из неосновных носителей тока образовавшихся в области перехода, вследствие тепловой генерации. Потенциальный барьер их не задерживает, а, наоборот, ускоряет.

При этом следует упомянуть, что на переходе уровни в обеих частях (см.рис.П.7) выравниваются. Энергии  $E_{f_1}$  и  $E_{f_2}$  отсчитываются от верхней границы валентной зоны отдельных материалов перед образованием перехода.

Если к p-n-переходу (рис.П.8б) приложить напряжение так, чтобы область p-типа была соединена с положительным, а область n-типа - с отрицательным полюсом источника напряжения, то как электроны, так и дырки пройдут через переход, так

- 66 -

как они притягиваются электростатическими силами, а именно: положительно заряженные дырки - к отрицательному электроду, а отрицательно заряженные электроны - к положительному электроду.

В направлении, которое мы называем **прямым**, через переход потечёт довольно большой ток. В этом направлении переход представляет малое сопротивление. В левой части кристалла (рис. П.8б) электрический ток переносится дырками, а в правой - электронами. Дырки, которые перейдут через переход в область *n*-типа, не могут там существовать стабильно и рекомбинируют с электронами; время их существования в области *n*-типа называется временем жизни. Расстояние, на которое проникают дырки через переход в область *n*-типа, определяется диффузионной длиной. Иногда говорят, что *p-n*-переход, к которому было приложено напряжение в прямом направлении, хорошо инжектирует неосновные носители тока. Последнее важно для транзисторной техники. Ток дырок постепенно переходит в ток электронов. Аналогичные рассуждения относятся также и к электронам, которые переходят в область *p*-типа.

Совершенно другая картина получается при обратной полярности приложенного напряжения (рис. П.8в). Электростатические силы действуют так, что электроны в области *n*-типа и дырки в области *p*-типа удаляются от перехода и практически ток прекращается. Такое направление мы называем **обратным**; пере-

- 67 -

ход в этом направлении представляет большое сопротивление. Наблюдаемый при этом остаточный ток образован неосновными носителями, для которых напряжение имеет благоприятную полярность при их движении через переход.

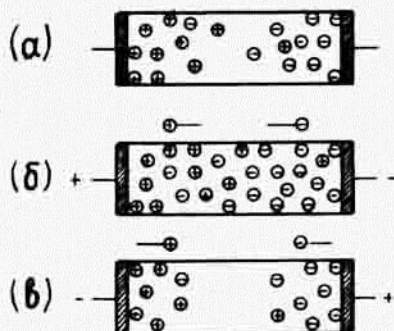


Рис. П.8 - Качественная модель процесса выпрямления на p-n-переходе. Изображены только свободные носители тока

а) - переход в отсутствие внешнего напряжения; б) - направление прямого тока. Если напряжение действует с указанной полярностью, то электроны и дырки движутся через переход и ток течёт; в) - обратное направление. При указанной полярности приложенного напряжения через переход может пройти только небольшая часть неосновных носителей, которые создают остаточный ток. Основные носители удаляются от перехода и расширяют зону пространственного заряда, ток не течёт.

### П.13. Использование физических процессов в полупроводниках для создания устройств молекулярной электроники

Рассмотренные в предыдущих параграфах основные процессы, происходящие в полупроводниках, а также в переходах между

- 68 -

слоями, имеющими различные свойства, позволяют уяснить принципы работы устройств молекулярной электроники, в качестве основного материала для которых применяются полупроводниковые пластины. Используя особенности полупроводников, удается создать соответствующие зоны, области и слои, обладающие требуемыми свойствами; определенные области могут использоваться как объёмные сопротивления, р-л переходы, как ёмкость между слоями и т.д. Располагая в полупроводниковой пластине несколько слоев типа р и л, можно создать в нужных местах диоды и транзисторы [8].

Область между двумя невыпрямляющими контактами всякого однородного полупроводника будет вести себя как омическое сопротивление, величина которого зависит от удельного сопротивления материала, а также от длины и поперечного сечения рассматриваемой области. Эти сопротивления являются линейными элементами<sup>+)</sup>, подчиненными закону Ома при тех значениях тока, которые обычно имеют место в полупроводниковых схемах.

В определенных отношениях они будут более стабильны, чем сопротивления в виде тонких плёнок, будут меньше изменять свою величину под нагрузкой и в результате старения. Путём подбора материала можно получить определенное значение температурного коэффициента такого сопротивления.

---

<sup>+) Механизм проводимости в подобных сопротивлениях был рассмотрен в предыдущих параграфах настоящей главы. При некоторых рассмотренных там условиях линейность сопротивления может быть нарушена.</sup>

Так, при использовании кремния с высоким удельным сопротивлением может быть получен температурный коэффициент  $7 \cdot 10^{-3}$  на  $1^\circ\text{C}$ ; при определенных материалах с малым удельным сопротивлением температурный коэффициент может быть отрицательным.

Область сопротивления можно создать в виде объемного сопротивления  $n$ -слоя в соответствии с рис. П.9А или, используя технику диффузии, получить тонкий поверхностный слой, как показано на рис. П.9в и П.9с. В последнем случае получающийся  $p$ - $n$  переход создаёт запирающий слой, наличие которого приводит к тому, что ток оттекает к поверхности. Ввиду того, что значение подобных сопротивлений зависит от глубины погружения тока, их расчёт не так прост, как расчёт объемного сопротивления.

При использовании полупроводников со сравнительно высоким удельным сопротивлением обычно делают объемные сопротивления в толще материала; в полупроводниках с малым удельным сопротивлением формируют сопротивления с диффузионным слоем. Как в первом, так и во втором случае материалом для сопротивления является монокристалл полупроводника. Вследствие этого данный тип сопротивлений имеет хорошие шумовые характеристики, т.к. отсутствуют неоднородности в структуре материала.

Нельзя указать строго определенного предельного значения величины сопротивлений типа диффузионного слоя. Для объемных

сопротивлений при допустимых размерах элементов и известных в настоящее время параметрах материалов, желательно не превышать величины 40 000 ом.

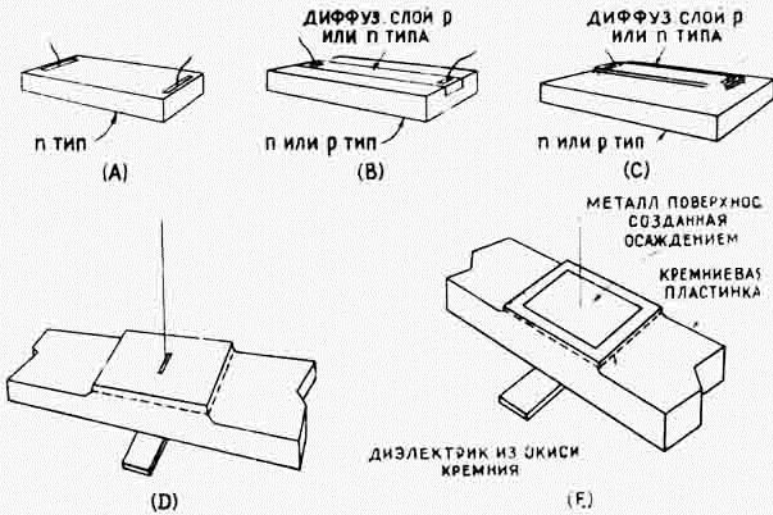


Рис.П.9 - Полупроводниковые сопротивления и ёмкости

а) - объёмное сопротивление; б) - сопротивление, созданное диффузией с помощью оксидной маски; в) - сопротивление, созданное диффузией с помощью специального травления; д) - ёмкость в виде p-n перехода; е) - ёмкость с диэлектриком из окиси кремния.

- 71 -

Ёмкость можно создавать, используя переходы между слоями; переход р-п (рис.П.9д) при передаче обратных напряжений ведёт себя как ёмкость, в которой сам переход выполняет функции диэлектрика.

При выбранном материале ёмкость зависит от площади перехода и от толщины запирающего слоя. Для кремния можно получить ёмкость до 200 000 пф на см<sup>2</sup>. Пробивное напряжение достигает при этом нескольких сотен вольт. Температурный коэффициент такой ёмкости получается небольшим. С изменением приложенного напряжения будет изменяться толщина запирающего слоя, а следовательно, и величина ёмкости.

Это обстоятельство можно использовать в некоторых специальных случаях. Однако там, где требуется высокая степень линейности, указанное свойство является недостатком ёмкости данного типа. Вторым недостатком является то, что ёмкость требует подачи на неё постоянного напряжения определенной полярности.

Если необходимо исключить эти недостатки, может быть сформирован другой тип ёмкости. На кремниевой полупроводниковой пластине создаётся используемый в качестве диэлектрика слой окиси кремния. На поверхность окиси кремния путём распыления наносят металлический проводящий слой. Кремний является одной из пластин конденсатора, а металлический слой - второй пластиной. Ввиду того, что слой окиси наносится на пластину монокристалла, полученный конденсатор не имеет структурных дефектов.



- 72 -

Подобные оксидные конденсаторы имеют температурный коэффициент меньше  $1 \cdot 10^{-4}$  на  $1^\circ\text{C}$  и малую величину старения. Они могут работать при низких напряжениях, свойственных полупроводниковым схемам. При пробивном напряжении 50 в можно получить ёмкость до 50 000 пф на  $\text{см}^2$ .

В миниатюрных схемах приходится ограничивать максимальную величину ёмкости. С учётом необходимости использования ряда других элементов схемы наибольшим допустимым значением ёмкости  $p-n$  переход... следует считать ёмкость от 2 000 до 5 000 пф, и для схемы оксидного конденсатора от 500 до 1000 пф.

Используя методы создания сопротивления и конденсаторов, описанные выше, можно получить цепи RC с распределёнными постоянными. В качестве примера рассмотрим устройство, изображённое на рис. П.10. Подобные устройства могут использоваться во многих схемах, например, в RC фильтрах, в схемах генераторов синусоидальных колебаний с фазосдвигающей цепочкой и т.д. Интересно отметить, что такие цепи обеспечивают лучшие частотно-фазовые характеристики, чем цепи с сосредоточенными постоянными. В то же время сложная структура делает их весьма удобными для применения в устройствах молекулярной электроники.

В настоящее время не найдено удовлетворительных решений для создания значительных величин индуктивностей; однако в

- 73 -

схемах счётно-решающих приборов, усилителях, схемах контрольной аппаратуры, применительно к которым в первую очередь будут разрабатываться молекулярные устройства можно во многих случаях обходиться без индуктивности.

Ввиду того, что в качестве основы, на которой строится молекулярное устройство, используются полупроводниковые материалы, создание полупроводниковых диодов и транзисторов в подобных устройствах является вполне разрешимой задачей. В том случае, когда пластина выполнена в виде нескольких слоев  $p$  и  $n$ -типа, можно выделить требуемые области путём прорезания части слоев. Если полупроводниковая пластина состоит из одного слоя, то диоды и транзисторы можно получить, создавая в определенных областях этой пластины  $p$ - $n$  переходы методом диффузии.

Диффузионный процесс протекает сравнительно медленно, и поэтому его легко контролировать. Полупроводниковые устройства, созданные таким методом, обладают малым разбросом по параметрам и высокой степенью воспроизводимости. Они могут работать на весьма высоких частотах и при значительных мощностях. В молекулярных устройствах удавалось, создавая переходы в определенных областях пластины, получить диоды нескольких типов.

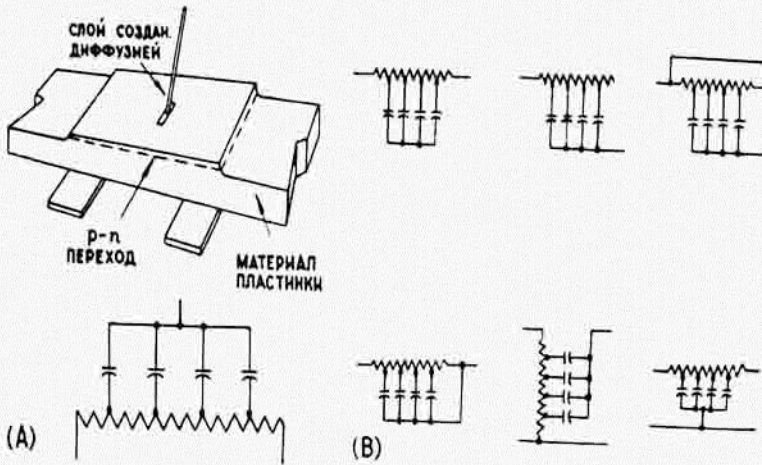


Рис.П.10 - Полупроводниковые цепи R-C с распределёнными параметрами

(А) - цепь с распределёнными параметрами и её эквивалентная схема; (В) - различные способы включения цепи RC с распределёнными параметрами.

- 75 -

Характеристики двух типов диодов помещены в таблице IV.1. Диоды (кремниевого типа) рассчитаны на работу в интервале температур от  $-65^{\circ}\text{C}$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ .

В литературе имеются сведения о возможности создания на базе использования полупроводниковых пластин и других устройств молекулярной электроники: транзисторов, использующих эффект поля, туннельных диодов, полупроводниковых устройств типа  $p-n-p-n$ , солнечных батарей и термоэлектрических элементов. По-видимому, особый интерес представляет использование туннельных диодов, с помощью которых можно построить целый ряд самых разнообразных устройств. Конкретных материалов о применении туннельных диодов в устройствах молекулярной электроники пока не имеется.

Из данных, приведенных в настоящем параграфе, видно, что, создавая в полупроводниковом твердом теле требуемые неоднородности, можно получить функциональное устройство, выполняющее функции, выполняемые обычными электронными блоками, состоящими из совокупности большого числа активных и пассивных элементов.

Возможность создания подобных функциональных устройств основывается на том, что, как это уже было более подробно показано в предыдущих параграфах, любой процесс, происходящий с электронами в твердом теле, сводится к изменению их состояний, заключающемуся в изменении величины или направления их

Таблица 1У.1

Тип	Миним. напряжение насыщения (В)	Обратное напряжение пиков. насыщения (В)	Максим. обрат. ток (мкА)	Макс. выпр. ток (мА)	Миним. прим. ток при +1,0в (мА)	Характеристика обратного восстановления	Область применения
1И645	275	225	0,2	15	400	150	Выпрям. ср. мощ.
1И659	60	50	5(50в)	25(50в)	-	-	Дiodы для счётно-решающ. устройств

- 77 -

скорости, к повороту их спина или к изменению энергии. Когда все возможные для электрона квантовые состояния заняты, никакие изменения состояния невозможны, а следовательно, невозможен и электрический ток. Каждый электрон может стационарно находиться только в одном из незанятых другими электронами квантовых состояний и не может занимать ни одного из промежуточных состояний. В твёрдом теле дискретные энергетические уровни электронов атома превращаются в широкие энергетические полосы. Возможные состояния электронов в твёрдом теле, в том числе и в полупроводнике, представляют собой полосы близких энергетических уровней, разделённых зонами, запретными для электронов данного тела. Создавая за счёт внесения примесей или каким-либо другим путём в первоначально однородном твёрдом теле слои полупроводников с разным характером проводимости (р - слои и n - слои), мы получаем возможность изменять общие свойства определённых областей. Переходы между этими слоями обладают в свою очередь существенно новыми свойствами, резко отличающимися от свойств каждого из слоев. Свойства р-n переходов позволяют использовать их для создания как пассивных, так и активных элементов устройства.

Таким образом, имеются широкие, но пока еще слабо реализованные возможности формировать в твёрдом теле области с нужными

- 78 -

свойствами, то-есть создавать функциональные блоки в виде единого объёма твёрдого тела, с соответствующим образом вкрапленными в него неоднородностями.

Более конкретные примеры использования свойств твёрдого тела в технике изготовления молекулярных устройств рассмотрены в главе IV.

### ГЛАВА III

#### СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО УСТРОЙСТВАМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ЗА РУБЕЖОМ

##### III.1. Программа работ исследовательского центра ВВС США

В настоящее время работы по молекулярной электронике [8,9, 10, 11] ведутся большим числом американских фирм и институтов по единой программе. Общее руководство этими работами осуществляет лаборатория деталей Исследовательского центра ВВС США.

Программа охватывает достаточно широкий круг исследовательских проблем, в том числе следующие:

- изучение свойств атомов, молекул и кристаллов материи;
- исследование различных физических явлений в твёрдом теле, таких, как эффект Холла, эффект Зеебека, эффект Пельтье, парамагнитный резонанс и т.д. с целью использования этих явлений в устройствах молекулярной электроники;

- 79 -

- разработка математических методов анализа физических процессов, происходящих в устройствах молекулярной электроники. (Пенсильванский государственный университет);

- изучение свойств полупроводниковых материалов, исследование вопросов повышения химической чистоты полупроводников, улучшения структуры существующих материалов и новых материалов. (Технологический институт в Джорджии);

- разработка технологических вопросов, являющихся связующим звеном между теоретическими исследованиями и использованием этих исследований при создании устройств молекулярной электроники (Государственный университет в Огайо).

### Ш.2. Работы фирмы Вестингауз Электрик по созданию функциональных блоков на базе молекулярной электроники

Наряду с теоретическими исследовательскими работами, в США большим числом организаций проводятся также конкретные разработки сверхминиатюрных блоков. Наиболее подробные сведения имеются о работах фирм Вестингауз Электрик и Техас Инструментс, которые, по-видимому, достигли наибольших успехов в этой области. В качестве основы для создания устройств молекулярной электроники используется полупроводниковая пластинка. В разработках фирмы Вестингауз Электрик в полупроводниковой пластинке создаются соответствующие зоны и границы между зонами при помощи обычной технологии, принятой при создании полупроводнико-



- 80 -

вых приборов, включая диффузию, покрытие металлом, обработку электронным лучем, травление, резание, облучение и т.д. Заключенное устройство заливается компаундом, защищается от ударов, вибраций, внешних климатических воздействий и излучения.

Фирмой Вестингауз Электрик разработаны лабораторные образцы восьми типов устройств, работающих на отдельных участках широкого диапазона частот, от постоянного тока до инфракрасных лучей, а именно:

- усилитель звуковой частоты мощностью 5 вт;
- двухкаскадный видеоусилитель;
- полосовой усилитель с фильтром в цепи обратной связи;
- схемы с двумя устойчивыми состояниями: триггер, ждущий мультивибратор, мультивибратор, работающий в режиме автоколебания;
- потенциометр с логарифмическим сложением двух входов;
- переключающие схемы на несколько положений: схема "или", переключатель, использующий полупроводник типа  $n-p-n$ ; транзисторный переключатель с пусковым электродом;
- преобразователь непрерывных данных в цифровые, с применением релаксационного генератора  $n-p-n$ ;
- двухкаскадное охлаждающее устройство инфракрасных детекторов, использующее эффект Пельтье.

- 81 -

По утверждению разработчиков, благодаря отсутствию отдельных деталей и внутрисхемных соединений, надёжность устройств молекулярной электроники высока и значительно превышает надёжность обычной аппаратуры, выполненной из отдельных деталей.

На рис.Ш.1 показана схема "или" с несколькими входами. На рис.Ш.2 изображена демонстрационная установка с мультивибраторами трёх видов: на электронных лампах, на транзисторах и в виде молекулярного устройства. Внешнее оформление последнего аналогично устройству, изображенному на рис.Ш.1. Три молекулярных устройства представлены на рис.Ш.3.

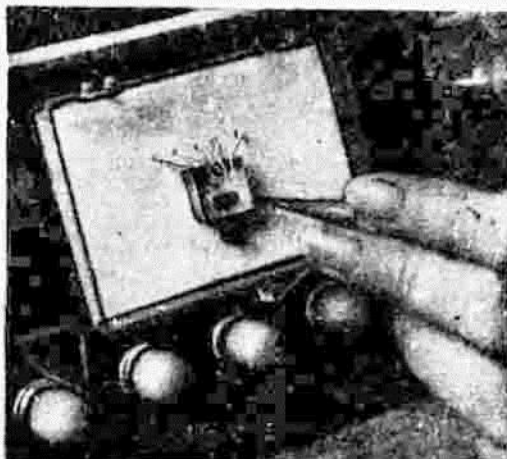


Рис.Ш.1 - Схема "или" в виде устройства молекулярной электроники. Устройство выполнено в виде полупроводниковой пластины (зачерненная часть в центре) и заключено для работы на стенде в Полистирол.

- 82 -

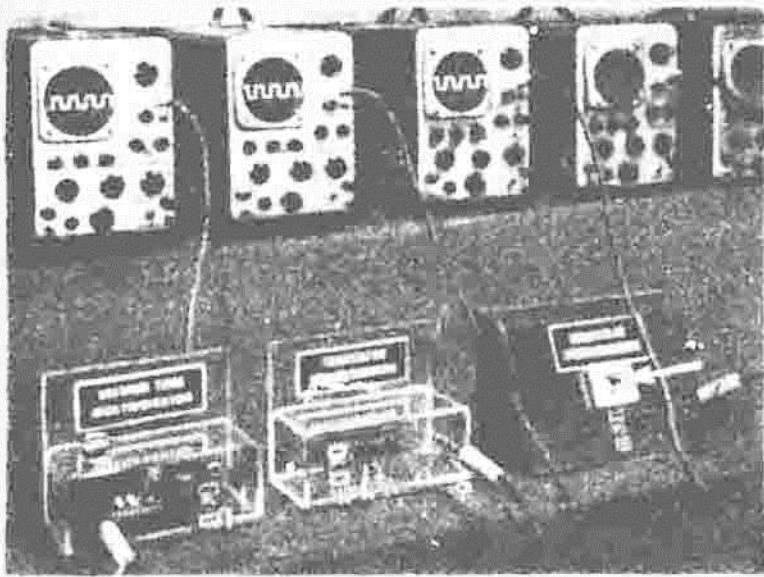


Рис.Ш.2 - Демонстрационная установка, показывающая сравнительные размеры мультипликаторов: на электронных лампах (слева), на транзисторах (в центре) и в виде молекулярного устройства (справа).

- 83 -

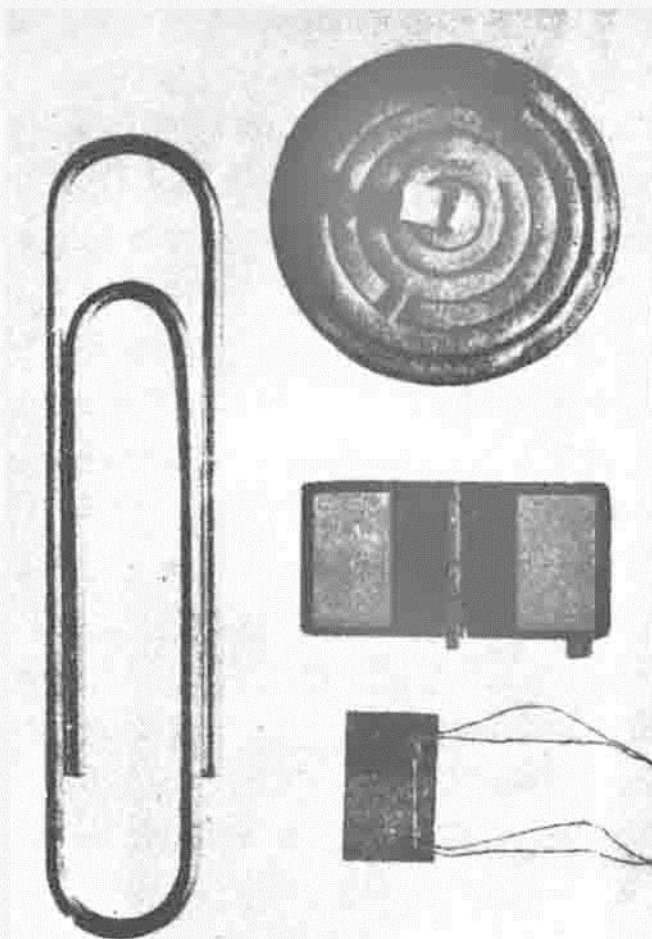


Рис.Ш.3 - Усилители звуковой частоты выходной мощностью в 5 вт (наверху), мультивибратор (в середине) и двухкаскадный видеосуилитель. Для сравнения слева помещена обычная канцелярская скрепка.

### Ш.3. Работы фирмы Техас Инструментс

Фирма Техас Инструментс добилась в разработке интегральных молекулярных устройств значительных успехов. Разрабатываемые фирмой полупроводниковые устройства сформированы на пластинках монокристалла полупроводника; каждое из них может выполнять функцию некоторого электронного блока.

На пластинах и внутри них методами технологии полупроводников - испарением через маску, травлением и диффузией - формируются "дорожки" для создания активных и пассивных элементов. Меняя форму дорожек и их направление, можно получить большое разнообразие схем, дающих возможность снизить размеры и вес аппаратуры в 100-500 раз.

Сопrotивления выполняются в виде омических или невыпрямляющих контактов на пластинке полупроводника. Так как электрические свойства элементов зависят, в первую очередь, от природы полупроводникового материала, такие сопротивления будут иметь низкие шумовые характеристики, хорошую линейность, достаточно высокий температурный коэффициент и хорошую стабильность во времени.

При формировании конденсаторов используется ёмкость перехода р-п. Эти конденсаторы являются одновременно диодами и должны быть соответствующим образом поляризованы в схеме. Неполарные конденсаторы могут быть изготовлены соединением двух переходов р-п.

- 85 -

Плоскостные конденсаторы, полученные методом диффузии, имеют заметную зависимость ёмкости от напряжения, причём ёмкость обратно пропорциональна корню кубическому из приложенного напряжения.

Эта зависимость от напряжения несколько уменьшается для неполярных конденсаторов, но тем не менее должна учитываться при проектировании схемы. Плоскостные конденсаторы мало меняют ёмкость с изменением температуры и обладают, по утверждению фирмы, хорошей стабильностью во времени. Для переходов с низким напряжением пробоя получены ёмкости порядка 30 000 пф/см<sup>2</sup>. Могут быть образованы также конденсаторы, выдерживающие напряжения в несколько сот вольт. Легко выполняется сочетание распределенной ёмкости и сопротивления.

Отмечается, что хотя кристаллу всегда можно придать такую форму, при которой будут выполняться необходимые функции схемы, обеспечить нужную величину ёмкости или сопротивления в отведенном пространстве не всегда удаётся. Например, может быть легко спроектирована форма кристалла для изготовления обычного усилителя звуковых частот с заземленным эмиттером. Однако такие усилители требуют наличия в схеме конденсаторов связи, ёмкость которых составляет величину порядка долей микрофарад. Такая ёмкость потребует чрезмерно большой площади полупроводниковой поверхности. Поэтому значения возможных сопротивлений и ёмкостей в схеме ограничены. При высокой плотности монтажа желательно ограничить сопротивления величиной порядка

- 86 -

20 000 ом, а ёмкости - величиной порядка 3000 пф.

Фирма еще не разработала полупроводниковый эквивалент индуктивности, но работает над этой проблемой. Полупроводниковые триоды и диоды могут быть изготовлены обычным методом диффузии.

Области перехода для полупроводниковых диодов и триодов и конденсаторов образуются соответствующим изменением формы "столиков" (меза) на пластине. Таким образом, данный тип пластины, на котором переход получен методом диффузии, может быть использован для создания схем нескольких различных типов. При этом разница между ними будет заключаться в различии процессов, с помощью которых будет создаваться форма пластины. Используя возможность взаимодействия между компонентами с распределенными постоянными, удаётся создать устройства, эквивалентных которым нет среди схем с сосредоточенными постоянными.

На очередной конференции Общества радиоинженеров фирма Texas Instruments продемонстрировала два функциональных блока для счётнорешающих устройств: мультивибратор и генератор. Каждый из блоков имеет вид пластинки кремния размерами 6,4x3,2x0,8 мм (не больше размеров спичечной головки) со сформированными на ней элементами - диодами, триодами, сопротивлениями и конденсаторами, представляющими собой органические части этой пластинки.

- 87 -

Мультивибратор содержит 12 элементов - два триода с диффузной базой, два конденсатора и восемь сопротивлений. "Плотность упаковки" - порядка 1200 элементов на 1 см<sup>3</sup>.

Фирма утверждает, что разрабатываемые ею интегральные молекулярные блоки должны отличаться высокой надёжностью в силу следующих причин:

- их изготовление представляет единый технологический процесс, допускающий контроль и получение заданных характеристик;
- каждый узел блока может быть рассчитан на заданное применение и может подвергаться функциональным испытаниям в процессе изготовления;
- характеристики каждой детали могут быть заданы в соответствии с оговоренным применением;
- применение унифицированных узлов сокращает необходимые соединения на 75-80%.

Фирма работает совместно с несколькими фирмами-изготовителями счётно-решающих устройств, разрабатывая свои устройства по их техническим требованиям.

В течение II-III кварталов 1960г предполагается изготовить опытную партию функциональных блоков для применения во вновь разрабатываемых устройствах этих фирм. Указывается, что разработанная техника применима не только для кристаллов кремния и германия, но и для других полупроводниковых материалов.



- 88 -

ГЛАВА IVВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
МОЛЕКУЛЯРНЫХ УСТРОЙСТВIV.1. Основные этапы разработки

Состояние работ по молекулярной электронике не позволяет изложить в развёрнутой форме все проблемы, относящиеся к созданию и изготовлению молекулярных устройств, так как многое требует ещё тщательного изучения.

Однако методы разработки этих новых устройств настолько отличаются от обычных, что необходимо хотя бы вкратце рассмотреть некоторые вопросы.

Уже сейчас, на этапе научно-исследовательских работ, возникает необходимость вести разработку устройств молекулярной электроники так, чтобы они возможно быстрее могли найти практическое применение в тех областях, где их использование является наиболее целесообразным.

В связи с этим одним из первых является вопрос о том, какие именно элементы надо выполнить в варианте устройств молекулярной электроники.

При решении этого вопроса должны учитываться два основных требования:

1) улучшение общих характеристик всей системы в целом при выполнении выбранных элементов на базе молекулярной электроники;

2) возможность реального осуществления выбранных схем новыми методами.

Иногда в систему входят устройства, крупногабаритные элементы которых являются их особенностью принципиального характера (наземные антенны, индикаторы с большим экраном и т.п.), или устройства, предназначенные для больших мощностей (генераторы, усилители). В этих случаях следует сперва оценить, получится ли заметный выигрыш в параметрах системы в целом при переводе части её элементов на молекулярную электронику.

В то же время нужно учитывать, что пока только довольно ограниченное число subsystemов может быть реализовано с помощью молекулярной электроники, хотя несомненно, что число подобных устройств будет непрерывно и довольно быстро расти.

После того как вопрос о целесообразности реализации выбранной subsystemы в "молекулярном" варианте решен в положительном смысле и требования, предъявляемые к ней, детально изучены, начинается процесс её проектирования. Этот процесс можно разбить на следующие этапы:

- а) разработка прототипа молекулярного устройства, т.е. схемы в виде ансамбля отдельных элементов обычного типа, выполняющей необходимые функции;
- б) изготовление макетного образца молекулярного устройства;
- в) увязка макетного образца с системой в целом;

- 90 -

г) проведение испытаний макетного образца в лабораторных и реальных условиях;

д) разработка опытного образца.

Ниже будут рассмотрены только первые два этапа, поскольку последующие этапы имеют меньше специфических особенностей, характерных для разработки молекулярных устройств.

#### IV.2. Создание прототипа молекулярного устройства

В большинстве случаев при создании молекулярных устройств **окажется** необходимым разработать обычным методом их прототип, т.е. проверить чисто схемное решение задачи.

Без такого прототипа будет трудно сформулировать развёрнутые технические требования к молекулярному устройству и осуществить правильный выбор схемного решения. В то же время прототип должен быть таким, чтобы его можно было воспроизвести в виде молекулярного устройства.

Рассмотрим в качестве конкретного примера разработку усилителя низкой частоты.

Будет считать, что перед нами поставлена задача разработать в виде устройства молекулярной электроники предварительный усилитель низкой частоты, имеющий коэффициент усиления не менее 40 дБ в полосе частот до 30 000 гц при неравномерности, не превышающей 3 дБ.

Будем также считать заданными исходный материал - германиевую пластинку с р-п переходом - и основной технологический

- 91 -

приём формирования схемы устройства - прорезание слоев в этой пластинке.

Произведем выбор схемного решения для прототипа, постепенно отбрасывая те варианты, которые невозможны или неудобны с точки зрения указанного варианта реализации.

При этом отметим основные этапы такого выбора.

1. Отбросим те схемы полупроводниковых усилителей, которые содержат трансформаторы или дроссели, т.к. схемы со значительными индуктивностями в настоящее время трудно реализуемы.

Будем искать интересующее нас решение среди схем полупроводниковых усилителей на сопротивлениях.

2. Обычные усилители на сопротивлениях имеют много конденсаторов, в том числе и значительных по величине ёмкости. Хотя переход р-п и может быть использован как ёмкость, выбор обычной схемы усложнит молекулярное устройство. Желательно выбрать схему, содержащую только транзисторы и сопротивления, т.е. схему с непосредственной связью.

3. Учитывая заданную величину усиления, среди схем с непосредственной связью следует предпочесть схемы, в которых используются транзисторы с заземленным эмиттером. Рассмотрим схему, приведенную на рис. IV. I. Эта схема очень простая, но имеет следующие серьезные недостатки: её параметры существенно изменяются с изменением температуры, кроме того, схема имеет семь внешних выводов, что неудобно при её осуществлении в виде молекулярного устройства (выводы указаны на рис. IV. I буквой "а").

- 92 -

4. С учётом замечаний по схеме рис. IV. I выбираем в качестве окончательного решения для воспроизведения схему, представленную на рис. IV. 2а. В ней первый и третий транзисторы - типа  $p-n-p$ , а второй типа  $n-p-n$ . Такая комбинация транзисторов обеспечивает большое постоянство параметров при изменениях температуры. Общее число выводов от слоев полупроводниковой пластинки в этом случае меньше, чем в предыдущем.

Выбранная схема может быть воспроизведена в виде молекулярного устройства нанесением прорезей на германиевую пластинку, состоящую из слоев  $p-n-p-n$  типа. На рис. IV. 2б показано, как должны быть сделаны эти прорезы. Возможен и другой способ реализации выбранной схемы в виде молекулярного устройства, рассмотренный в параграфе IV. 7, правда, применительно к другому устройству. Этот второй способ является более универсальным, чем первый, и может быть применен при создании более широкого класса устройств.

Однако, независимо от выбора способа реализации, подход к выбору схемы прототипа в принципе не отличается от изложенного выше.

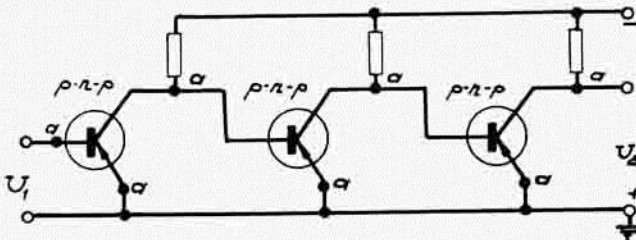


Рис. IV. I - Схема полупроводникового усилителя

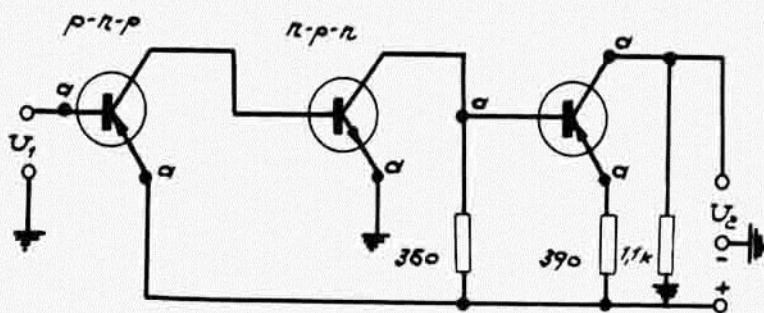


Рис. IV.2а - Другой вариант схемы полупроводникового усилителя



Рис. IV.2б - Вырезание в пластине p-n-p-n позволяет в одной пластине получить все активные элементы трехкаскадного усилителя.

### IV.3. Особенности процессов изготовления молекулярных устройств

Процессы разработки устройств молекулярной электроники тесно связаны с процессами их изготовления. Здесь больше чем где-либо производственные работы, особенно на стадии макетов и опытных образцов, являются творческими, исследовательскими.

Размеры изготавливаемых элементов и характер самого производственного процесса таковы, что решение задачи может быть достигнуто только при широкой автоматизации изготовления устройств молекулярной электроники. Методы автоматизированного изготовления сверхминиатюрной аппаратуры, построенной на принципах использования очень сложных явлений физики твёрдого тела, требуют высокой точности и тщательного, так же автоматизированного самоконтроля на всех этапах изготовления аппаратуры. Ошибка изготовления, которая в других случаях может быть устранена заменой детали, здесь, как правило, будет требовать изготовления нового устройства.

Поэтому проблема разработки методов автоматизированного изготовления рассматриваемого вида аппаратуры соизмерима по своей сложности с задачей разработки самой этой аппаратуры. Решение этой проблемы потребует больших усилий и значительных сил.

В настоящее время нет достаточных данных для того, чтобы подробно останавливаться на всех вопросах изготовления устройств молекулярной электроники. Однако есть один специальный воп-

рос, который заслуживает отдельного рассмотрения, - это вопрос о выращивании полупроводниковых кристаллов и устройств.

Использование в молекулярной электронике в качестве основного материала пластин полупроводниковых кристаллов приводит к тому, что весь процесс изготовления молекулярных устройств оказывается тесно связанным с технологией изготовления этих пластин. Обычная технология изготовления полупроводниковых пластин, например германия, заключается в выращивании сравнительно толстых слитков монокристаллов. Изготовление таких слитков требует контроля кристаллографическими методами либо с помощью использования рентгеновских лучей, поскольку необходимо получить точно ориентированные пластины, которые далее для достижения рабочей поверхности требуемого качества нужно травить и полировать.

Серьезными недостатками такого способа изготовления пластин являются значительный разброс по рабочим характеристикам, возникающий даже в том случае, когда несколько пластин изготовлено из одного и того же кристалла, а также большая трудоёмкость работ.

До последнего времени при изготовлении молекулярного устройства на базе полупроводниковой пластины зоны и прослойки между ними создавались в пластине с помощью технологии, обычной для производства полупроводниковых элементов, включая диффузию, нанесение покрытий, использование техники электронного луча, травление, облучение, резание, осуществление тонких прорезей



- 96 -

в слоях р-л, сплавление и фотопроцессы.

Теперь появились совершенно новые возможности изготовления молекулярных устройств путём выращивания из сплошной массы расплавленного полупроводника кристаллов в виде тонких лент с использованием так называемого "дендритного" процесса.

Как уже отмечалось, основная идея построения аппаратуры на базе молекулярной электроники заключается в отказе от схем из отдельных активных и пассивных элементов, образующих те или иные схемные сочетания, и переходе к созданию моноблоков, выполняющих за счёт использования свойств твёрдого тела те же функции, что и блоки, состоящие из отдельных элементов.

При таком подходе важнейшим становится вопрос о создании новых материалов, позволяющих полнее использовать их свойства при разработке функциональных блоков, а также вопрос о новых способах использования уже имеющихся материалов.

Дендритный процесс выращивания полупроводниковых кристаллов относится к подобного рода новому методу изготовления устройств из уже известных материалов.

#### IV.4. Выращивание полупроводниковых кристаллов из расплава

Выращивание кристаллов германия дендритным процессом представляет собой видоизменение уже известных методов<sup>[12]</sup> Ввиду того, что эти методы широко применяются на практике, мы не будем

оставляться на их деталях, а ограничимся рассмотрением теоретических соотношений, определяющих рост кристаллов, чтобы лучше понять явления, имеющие место при дендритном процессе.

Выращивание осуществляется с применением "затравки", вырезанной из предварительно полученного монокристалла с подобранными соответствующим образом плоскостями кристаллизации. Затравка погружается в расплавленный германий и выдерживается некоторое время при такой температуре, что сама она не расплавляется, а окружающий затравку расплав не затвердевает. Специальный подъемный механизм с контролируемой скоростью вытягивает кристалл из расплава; по мере вытягивания монокристалл непрерывно нарастает на затравке. Вначале вытягивания создается определенный перепад температуры у поверхности расплава.

Рассмотрим термодинамические условия, которые должны соблюдаться в процессе вытягивания.

Пусть  $W_1$  есть количество тепла, подведенное к концу затравки, погруженной в расплав, а  $W_2$  - количество тепла, освобождающееся на другом конце затравки.

При тепловом равновесии  $W_1 = W_2$  поверхность раздела между твердой и жидкой фазой остаётся на уровне поверхности расплава. Процесс роста кристалла может рассматриваться как квазиравновесный процесс.

Предположим, что поверхность раздела занимала определенное положение и что затем подводимое тепло внезапно уменьшилось на величину  $\delta W$ . Тогда отдаваемое на внешнем конце тепло начнёт

- 98 -

превышать подводимое тепло. Расплав начнёт переходить в твёрдое состояние, освобождая скрытую теплоту в количестве, достаточном для того, чтобы компенсировать нехватку подводимого извне тепла.

Переход в твёрдую фазу будет происходить со скоростью  $\frac{dx}{dt}$  в соответствии с соотношением

$$\delta W = -sL \frac{dV_e}{dt} = sL\mathcal{A} \frac{dx}{dt}. \quad (\text{IV.1})$$

Здесь

$L$  - скрытая теплота плавления (на единицу массы),

$s$  - удельный вес вещества расплава,

$V_e$  - объём расплава, переходящего из жидкой фазы в твёрдую,

$\mathcal{A}$  - площадь поперечного сечения стержня.

Наибольшая скорость роста кристаллов будет в том случае, когда поток тепла от расплава к стержню, находящемуся в твёрдой фазе, отсутствует, т.е. когда температурный градиент расплава, окружающего стержень, равен нулю.

В этом случае к материалу, находящемуся в твёрдой фазе, будет подводиться только скрытая теплота, освобождающаяся на поверхности раздела, и можно написать:

$$sL\mathcal{A} \frac{dx}{dt} = \mathcal{A} \cdot \kappa_s \left( \frac{dT}{dx} \right)_s, \quad (\text{IV.2})$$

- 99 -

где  $K_s$  - коэффициент теплопроводности, а  $(\frac{dT}{dx})_s$  - температурный градиент вещества в точке, соответствующей  $t^\circ$  плавления.

Таким образом, максимальная скорость роста будет

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_{max} = \frac{K_s}{SL} \cdot \left(\frac{dT}{dx}\right)_s \quad (IV.3)$$

Некоторые константы для германия приведены в таблице IV.I

Таблица IV.I

Температура	25°C	$t^\circ$ точки плавления (твёрдая фаза)	$t^\circ$ точки плавл. (жидкая фаза)
Удельный вес $S$ (гр/см <sup>3</sup> )	5,323	5,988	5,578
Теплопроводность $K_s$ (кал/1°C)	0,11 (100°C)	0,336	0,336
Температура плавления $T_m$ (в °K)			1210
Скрытая теплота плавления $L$ (кал/гр)			98,3

Соотношению (IV.3) для цилиндрического стержня радиуса  $\gamma$  можно придать следующий вид:

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_{max} = \frac{1}{SL} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\sigma K_m}{\gamma} T_m^5}, \quad (IV.4)$$

где:  $\sigma$  - коэффициент лучеиспускания,

$K_m$  - коэффициент теплопроводности в точке плавления при температуре  $T_m$ .

- 100 -

Перепишав (IV.4) в виде

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_{max} \cdot \sqrt{z} = \frac{l}{SL} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \sigma_{K_m} T_m^5}, \quad (IV.5)$$

видим, что в правой части равенства стоят величины, постоянные для данного вещества.

Для германия

$$\frac{l}{SL} \sqrt{\frac{2}{3} \sigma_{K_m} T_m^5} = 0,015 \text{ см}^{3/2} \text{ сек}^{-1}$$

Таким образом,

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_{max} = \frac{A}{\sqrt{z}}, \quad (IV.6)$$

для германия  $A = 0,015 \text{ см}^{3/2} \cdot \text{сек}^{-1}$

При  $z = 1 \text{ см}$  получим

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_{max} = 0,015 \text{ см/сек или } 0,9 \text{ см/мин.}$$

С уменьшением размеров вытягиваемого кристалла скорость роста, как видно из приведенных выше соотношений, возрастает. Отсюда следует, что при вытягивании тонких лент, как это имеет место при дендритном процессе, должна быть получена большая скорость роста.

#### IV.5. Выращивание с помощью дендритного процесса

Дендритный процесс сходен с рассмотренным выше процессом вытягивания монокристаллов, однако он имеет ряд особенностей.

- 101 -

Этот процесс характеризуется следующим [13]:

а) скорость выращивания получается достаточно высокой (от 10 до 15 см в минуту), поскольку вытягиваемая лента имеет малый объём;

б) поверхность плавки, из которой осуществляется вытягивание, подвергается переохлаждению перед началом процесса вытягивания;

в) полупроводниковые кристаллы выращиваются в виде тонких лент толщиной от 0,08 мм до 0,5 мм при ширине ленты от 2 до 3 мм;

г) поверхность выращиваемых лент получается правильно ориентированной, оптически плоской и не требующей травления или какой-либо другой технологической доводки;

д) выращивание идёт двумя параллельными лентами, поскольку в процессе выращивания используются двойные кристаллы.

Процесс выращивания осуществляется путём вытягивания кристаллов из расплава следующим образом. В качестве исходного материала - заправки - берется кусочек полупроводниковой ленты, выращенной ранее. Обычно заправку берут длиной в 25 мм, толщиной 0,25 мм и шириной 1,5 мм.

Этот кусочек материала опускают вертикально вниз до тех пор, пока кончик присадки не коснется поверхности расплавленного германия. Температура расплава должна быть несколько выше точки плавления, температура той части, которая соприкасается с заправкой, должна быть достаточно, чтобы размягчить и расплавить небольшую часть её кончика, т.е. примерно на  $2^{\circ}$  выше

- 102 -

точки плавления. После того, как кончик затравки размягчиться, высокочастотную мощность, подводимую для разогрева, внезапно уменьшают, так чтобы получить снижение  $t^{\circ}$  примерно на  $10-12^{\circ}$ . Таким образом, температура оказывается ниже точки плавления примерно на  $8-10^{\circ}\text{C}$ . При этих условиях на кончике затравки начинается процесс кристаллизации и притом только там, так как нет других центров, где мог бы осуществляться этот процесс.

Примерно через 15 сек затравку начинают поднимать со скоростью от 10 до 15 см в минуту. По мере того как затравка поднимается, вниз, как это показано на рис. IV.3, начинают расти две ленточки кристаллов.

Исследования, проведенные с помощью электронного микроскопа, показали, что получаемые таким способом кристаллы обладают достаточно плоской поверхностью. Величина неровности поверхности не превышает  $50\text{Å}$ .



Рис. IV.3 - При дендритном процессе выращивание полупроводниковых кристаллов осуществляется в виде двух тонких лент с ровной поверхностью.

- 103 -

Работы, проведенные по выращиванию полупроводниковых кристаллов, в том числе и с помощью дендритного процесса, позволяют сделать следующие общие выводы.

1. В кристаллах со структурой типа алмаза выращивание может осуществляться вытягиванием из расплава с получением монокристаллов, имеющих плоскости, ориентированные определенным образом. В тех случаях, когда температурные условия благоприятны, предпочтительный рост в направлении определенных плоскостей находит выражение во внешней форме кристалла, а именно, в совпадении граней выращиваемого кристалла с плоскостью  $\{111\}$  кристаллической решетки. Это особенно проявляется при быстром росте кристаллов, например, при дендритном процессе.

2. Скорость роста этого типа кристаллов из расплава определяется в первую очередь методом рассеяния скрытой теплоты, выделяющейся при переходе из жидкой фазы в твердую.

Другими словами, скорость роста зависит от того, как осуществляется передача тепла в кристалл, находящийся в твердой фазе, а также каково излучение тепла в окружающее пространство.

3. При обычном вытягивании максимальная скорость роста монокристалла цилиндрической формы достигается в том случае, когда температура расплава поддерживается чуть выше точки плавления. Для германия эта скорость равна примерно 1 см/мин. Повышение температуры на несколько градусов заметно снижает скорость роста.



- 104 -

4. Если перепад температуры осуществляется в сторону её снижения и кристалл, вытягиваемый из расплава, оказывается в достаточной степени переохлажденным, выделяемая скрытая теплота передаётся, в основном, в направлении расплава, а не затравки.

В этом случае рост происходит главным образом внутри расплава и получаются дендритные (древовидные) ленты, причём их малая толщина определяется малой скоростью выделения скрытой теплоты.

5. Расплав различных материалов, имеющих структуру типа алмаза или цинковой обманки, при условии переохлаждения можно привести в состояние, обуславливающее дендритный процесс роста. Для чистого германия в случае использования графитового тигля нужно обеспечить перепад температур 10–12°C.

6. Древовидный рост кристаллов идёт от затравки в сторону расплава главным образом в направлении одной или нескольких плоскостей  $\{III\}$ , т.е. в направлении наиболее плотной атомной упаковки. Преимущественным направлением является одно из трёх  $\{II_2\}$  направлений этой плоскости.

7. Опыты травления дендритных кристаллов показали, что процесс травления идёт главным образом вдоль плоскости  $\{III\}$ . Вследствие этого можно предположить, что такие кристаллы выращиваются в форме тонких пластинок, с более или менее значительной плотностью, разделённых между собой областями с меньшей плотностью.

- 105 -

Следует отметить, что кристаллы, выращенные с помощью дендритного процесса, обладают сравнительно высокой степенью однородности.

Описанный метод выращивания кристаллов позволяет осуществлять процессы диффузии, покрытия и осаждения непосредственно на кристалле в процессе его выращивания.

Дальнейшим шагом вперед в этой области является получение кристаллов с несколькими зонами. В настоящее время удаётся единым процессом, без разбивки на последовательные операции создавать устройства, имеющие три слоя зон и две прослойки. При этом открывается возможность сочетать создание многозонных кристаллов с одновременной обработкой их с целью придания устройству требуемых функциональных свойств.

Таким образом будут сразу создаваться полупроводниковые элементы, к которым достаточно присоединить выводы, чтобы получилось законченное устройство. Наиболее удобно эту технологию применять для выращивания транзисторов. В этом случае изготавливается транзисторная лента, которую далее разрезают на кусочки требуемого размера и присоединяют к ним выводы.

Для полной автоматизации производства функциональных блоков молекулярной электроники потребуются значительные усилия и довольно длительное время. Однако, по-видимому, в дальнейшем окажется возможным выращивание из сплошного полупроводникового материала целых электронных устройств.

- 106 -

Фирма Вестингауз Электрик предполагает к 1962г освоить выращивание радиоприёмников величиной с горошину, а через 3-5 лет - перейти на изготовление подобным способом миниатюрной аппаратуры высокой степени надёжности для бортовых устройств ракет и космических кораблей.

Одно из направлений исследований в этой области должно заключаться в создании материалов, позволяющих обеспечить работу молекулярных устройств в условиях высоких температур и интенсивных облучений.

#### IV.6. Изготовление функциональных устройств на базе полупроводниковых пластин

Рассмотрим вопросы создания функциональных устройств с использованием в качестве основы для этого устройства полупроводниковой пластины. Пластина может быть изготовлена с помощью дендритного процесса или каким-либо другим путём. Как указывалось выше, дендритный метод в перспективе позволяет рассчитывать на разработку способов выращивания целых электронных устройств путём единого технологического процесса. Однако подобный уровень производства еще не достигнут, а потому в данном параграфе будет рассмотрен вопрос о том, как путём внесения неоднородностей в определенные области полупроводниковой пластины можно получить функциональное устройство.

При изготовлении полупроводниковых пластин обычными методами приходится выполнять ряд операций, которые показаны на рис. IV.4.

- 107 -

Эти операции можно разбить на две категории: на выполняемые одновременно и на идущие раздельно. С точки зрения единообразия характеристик, надёжности и производительности желательно, насколько возможно, вести процесс одновременно; в этом случае обеспечивается изготовление большего числа единиц продукции в одно и то же время, при одних и тех же условиях и на одной и той же пластине.

Материал, являющийся основой молекулярного устройства, вырабатывается в виде монокристалла, режется на пластины, шлифуется и полируется так же, как это делается при изготовлении обычных полупроводниковых устройств.

В качестве материала для пластин можно использовать как германий, так и кремний.

Однако для создания подобных устройств кремний имеет преимущество с точки зрения большего удельного сопротивления материала, простоты селективного диффузионного процесса и большей однородности своей поверхности. Поэтому при дальнейшем изложении будем исходить из того, что в качестве материала для пластин берется кремний.

Для выбранных геометрических размеров удельное сопротивление исходного материала будет определять величину объёмного сопротивления законченного устройства, поэтому значение удельного сопротивления материала нужно тщательно контролировать. Сортировка полупроводниковых пластин проводится с помощью измери-

- 108 -

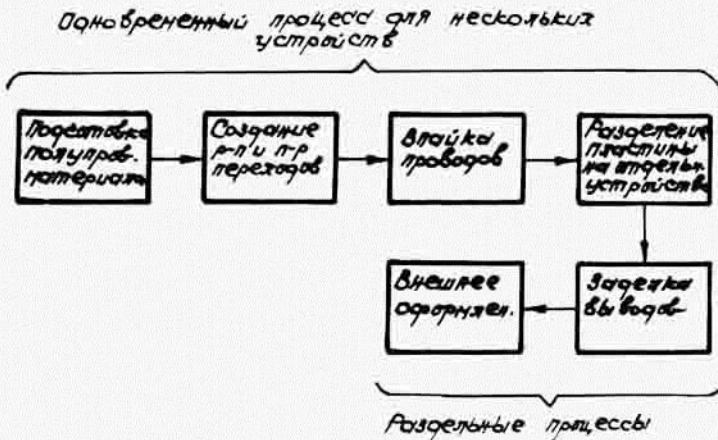


Рис. IV.4 - Основные этапы изготовления молекулярных устройств

тельного моста до начала процесса изготовления молекулярных устройств. При использовании кремния подходящей величиной можно считать величину сопротивления около 10 ом/см.

Во всех случаях создания молекулярных устройств для получения диодов или транзисторов в полупроводниковой пластине приходится формировать р-п переходы. Кроме того, в некоторых случаях эти переходы могут использоваться для создания ёмкостей или сопротивлений, как это указывалось в 14 параграфе главы II.

Для получения р-п перехода методом сплавления или диффузии в полупроводниковую пластину вносят точно дозированную величину

- 109 -

ну примеси. В случае сплавления выбранный металл, например, алюминий, осаждается в первую очередь на требуемом участке поверхности пластины. Далее пластина прогревается с тем, чтобы расплавился металл и разжижилась поверхность полупроводниковой пластины. После охлаждения разжиженная область затвердевает в виде монокристалла с той же ориентировкой плоскостей поляризации, что и в исходном полупроводнике. Вкрапленные в кристаллическую решетку примеси создают в области осаждения металла требуемую величину проводимости.

Для перехода  $p-n$  это будет область  $p$ , если исходная пластина была типа  $n$ , и наоборот: область  $n$ , если пластина была типа  $p$ . Процесс сплавления сводится к процессам разжижения и затвердевания; эти процессы протекают быстро, в связи с чем трудно регулировать глубину их проникания в толщу материала.

Процент примесей, внесенных в рекристаллизованный слой, зависит от фазовой диаграммы системы металл - полупроводник, характеризующей переход от твердой фазы в жидкую в зависимости от температуры, а также от термодинамики теплового цикла, характеризующего отклонение от состояния теплового равновесия. Эти обстоятельства ограничивают диапазон значений процента примесей, вносимых в полупроводник.

Диффузия, в отличие от сплавления, связана с относительно медленно протекающими процессами, что даёт возможность предопределять степень концентрации примесей и глубину погружения их в толщу материала. Процесс диффузии заключается в разогреве

- 110 -

кремния до температуры примерно  $1200^{\circ}\text{C}$  в атмосфере паров вещества, вводимого в качестве примеси. Для кремния типа р, с целью получения  $n$ -слоя, в качестве примеси используются: сурьма, мышьяк, висмут и фосфор, для кремния типа  $n$  - алюминий, бор, галлий, индий или таллий. Выбор типа примеси определяется необходимой глубиной слоя проникновения примеси и степенью её концентрации. Различные примеси диффундируют с различной скоростью, что позволяет в случае необходимости создавать одновременно два  $p$ - $n$  перехода, используя два типа примесей. Глубина перехода, создаваемого диффузией, должна контролироваться в кремнии с точностью от десяти тысячных до сотых долей миллиметра.

Чтобы установить степень концентрации, необходимо регулировать число примесных атомов, которые вносятся в кремний в процессе диффузии. Это можно сделать тремя способами: поместив в вакуумную установку вместе с обрабатываемой пластиной и диффузионный материал ("закрытый" метод); установив температуру, а следовательно и давление пара диффузионного материала, независимо от температуры полупроводниковой пластины ("открытый" метод); наконец, нанося диффузионный материал непосредственно на пластину до её нагрева (метод нанесения). Каждый из этих методов имеет свои достоинства. Выбор метода зависит от особенностей изготавливаемого устройства и от точности, с которой нужно получить требуемые параметры.

## - III -

На рис. IY.5<sup>A</sup> показано схематическое устройство для выполнения процесса диффузии "закрытым" методом. Кремниевые пластины помещают в кварцевый капсюль, вставляют прокладку и вводят в капсюль небольшой кварцевый сосуд, содержащий диффузионное вещество. Затем производится откачка с целью создания вакуума, кварцевая труба заделывается и помещается в печь, при этом кремниевые пластины и диффузионное вещество нагреваются до одной и той же температуры. Подобный процесс используется при изготовлении транзисторов уже в течение многих лет.

Установка для осуществления диффузии открытым методом схематически изображена на рис. IY.5<sup>B</sup>. При этом способе используется две печи. В меньшую печь помещают диффузионное вещество, а в большую - пластины, подлежащие обработке диффузионным процессом. Используемый в процессе газ - аргон, водород, азот или кислород - входит с контролируемой скоростью по кварцевой трубе в первую печь, содержащую диффузионное вещество. Это вещество нагревается печью и испаряется с контролируемой скоростью. Газ захватывает испаряемое вещество и переносит его во вторую печь к нагретым полупроводниковым пластинам, на которых оно осаждается. Пластины нагреты до более высокой температуры, чем диффузионное вещество. Температура в обеих печах контролируется с такой же точностью, как и при закрытом методе.

При методе нанесения используется обогащенный раствор диффузионного вещества, который наносится на полупроводниковые пла-



- 112 -

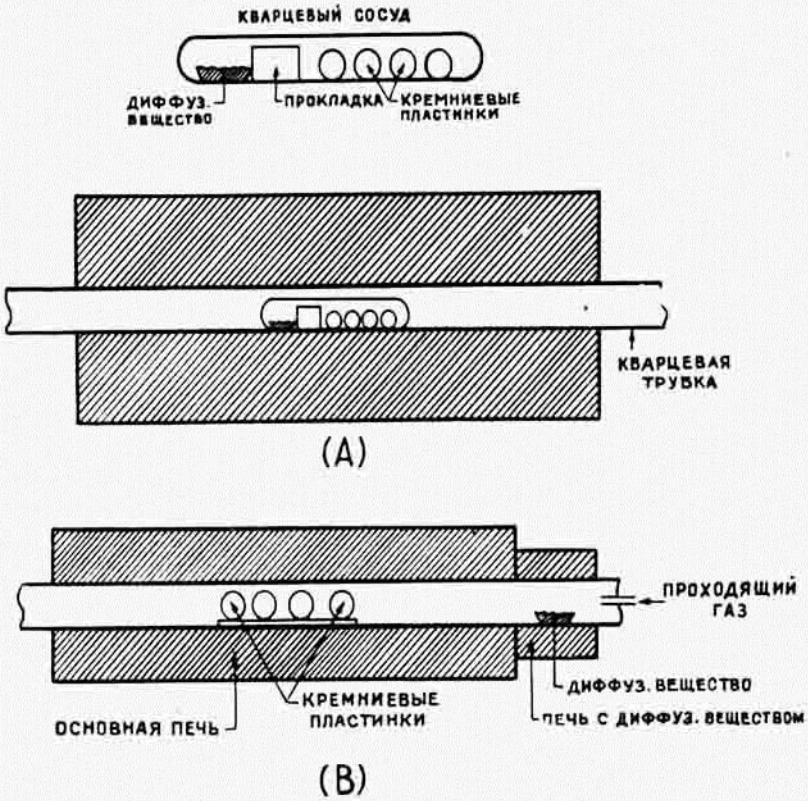


Рис. IV.5 - Установка для диффузионного процесса:  
 (А) - закрытым способом,  
 (В) - открытым способом.

- 113 -

стины. В некоторых случаях пластины погружают в раствор. Затем их помещают в печь, и процесс диффузии проходит при повышенной температуре.

При методе сплавления область, где осуществляется переход р-п и где в связи с этим нужно вести процесс диффузии, ограничивается частями поверхности, на которые предварительно был осаждён металл. При диффузионном процессе соответствующая область может быть очерчена путём создания оксидной плёнки на поверхности кремния. Если кремний нагреть в атмосфере кислорода, то на его поверхности получится слой окиси, который будет препятствовать процессу диффузии таких веществ, как бор или фосфор. Снимая там, где это требуется, слой окиси, можно выбрать площадь, которая должна быть подвергнута процессу диффузии. Выборочное снятие оксидного слоя сопровождается процессом фотохимического травления, сходного с процессом, используемым при изготовлении печатных схем. Для случая, когда требуется создать n-слой на пластине р-типа, этот процесс показан на рис. IV.6.

Обычно пластины погружают в фотохимический реактив. После высушивания на поверхности создаётся тонкая плёнка, чувствительная к ультрафиолетовому свету. Экспозиция создаётся контактным печатаньем с помощью фотонегатива, на который нанесена соответствующая конфигурация с размером изображения в масштабе 1:50 или 1:100 и с последующим уменьшением средствами фото-

- II4 -

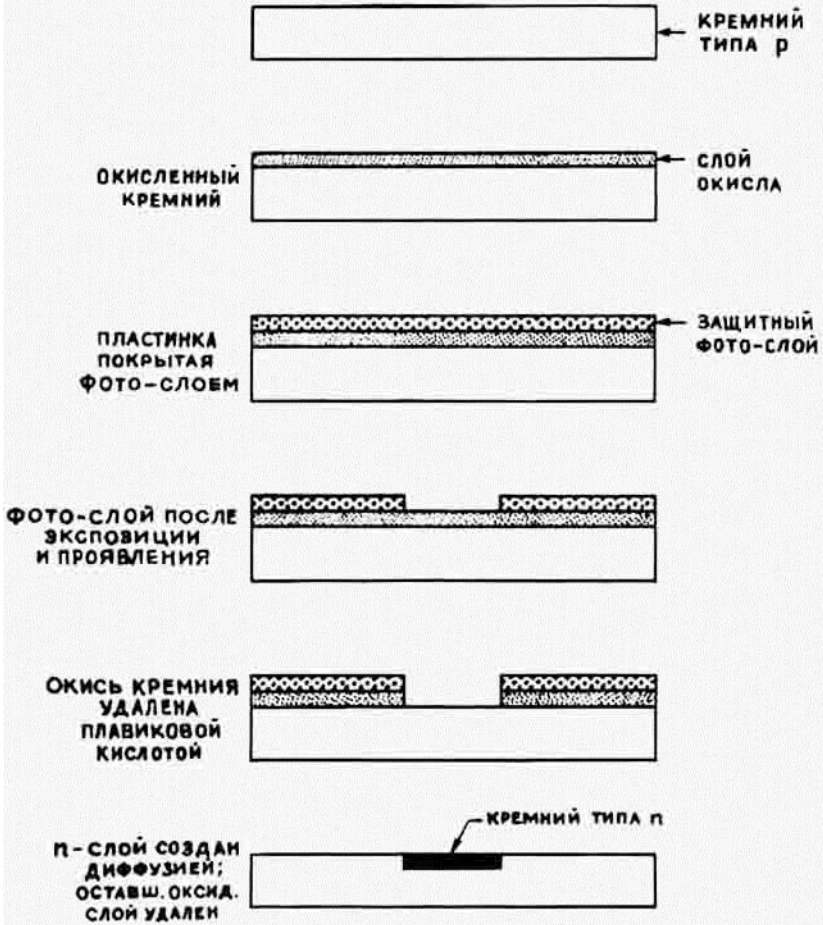


Рис. IV.6 - Создание p-n перехода с помощью оксидной маски.

- 115 -

проекции. Таким образом, для того, чтобы изменить выбранную конфигурацию, достаточно заменить фотонегатив. Типовые негативы после уменьшения имеют площадь с размерами стороны около  $2,5 \cdot 10^{-2}$  мм. При погружении в проявитель растворяются те части фотохимической плёнки, которые соответствовали непрозрачным областям негатива, в то время как части, соответствующие прозрачным областям, сохраняются.

Если теперь поместить пластины в ванну с плавиковой кислотой, то оксидный слой будет снят только с мест, не защищенных фотослоем. Плавиковая (фтористоводородная) кислота растворяет только окись кремния, не воздействуя на сам кремний или фотослой. Создание изложенным способом оксидной маски позволяет осуществлять диффузию только в определённых областях пластин, не закрытых оксидной маской, не подвергая диффузии остальные области.

Метод оксидной маски может быть использован также для изменения концентрации примесей в определённых участках пластин. Для этого некоторые участки пластин подвергаются диффузии в течение только части диффузионного цикла, в то время как другие участки в течение всего цикла.

Рассмотренные выше технологические методы обработки поверхности полупроводниковых пластин основываются на опыте производства транзисторов, в частности мезатранзисторов. Наличие такого опыта позволяет применить при изготовлении функциональных блоков уже известную технологию.

- 116 -

Применение метода диффузии для создания на общей пластине активных элементов схемы – диодов и транзисторов обладает большой гибкостью и позволяет получить полупроводниковые устройства с требуемыми характеристиками. В частности, возможно создание на одной и той же пластине нескольких транзисторов с различными данными.

#### IV.7. Пример разработки функционального устройства

В качестве примера рассмотрим схему "или", представленную на рис. IV.7а. Схема подобного типа используется в логических устройствах, в счётнорешающих приборах, а также в контрольных установках. При подаче сигнала на любой из входов схема вырабатывает сигнал на выходе.

В контрольных устройствах обслуживающей аппаратуру эта схема может, например, быть применена следующим образом. Входы схемы подключают к выходам различных частей контролируемой установки. Система отрегулирована так, что при отсутствии неисправностей в соответствующей части установки выходной сигнал контроля с этой части не подается; при наличии неисправности выдается сигнал, характеризующий отказ.

Таким образом в случае неисправности в любой из частей контролируемой системы выдается общий сигнал отказа. Если ни в одной части системы отказов нет, выходная схема не срабатывает, что соответствует сигналу готовности.

- II7 -

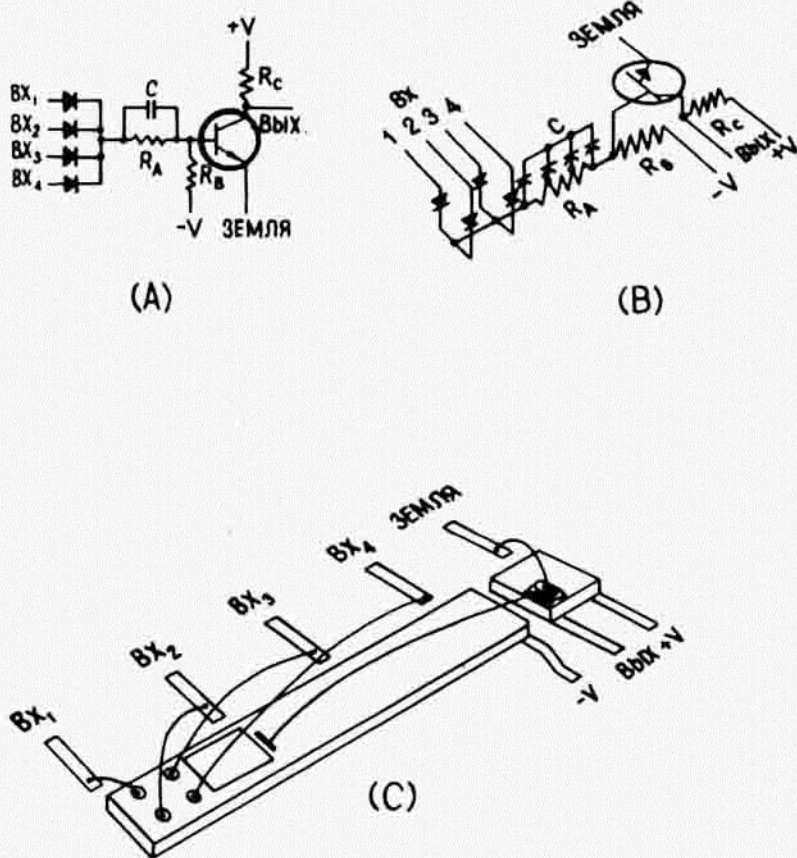


Рис. IV.7 - Пример разработки схемы молекулярного устройства: (А) - принципиальная схема устройства; (В) - объёмная схема устройства; (с) - устройство, созданное на полупроводниковой пластине.

- 118 -

Для регистрации работы схемы можно осуществить индикацию любого типа, например, при готовности может загораться зеленая индикаторная лампочка, при отказе - красная.

В рассматриваемой схеме имеется четыре диода, три сопротивления, ёмкость и транзистор. Величины сопротивлений следующие:  $R_A = 4\ 000$  ом,  $R_B = 10\ 000$  ом,  $R_C = 2\ 000$  ом.

Для удобства выполнения цепочку  $R_C$  схемы с сосредоточенными постоянными желательно заменить на цепочку с распределенными постоянными. Учитывая, что в процессе работы напряжение, подводимое к емкости, не изменяет своей полярности, ёмкость целесообразно осуществить в виде перехода типа  $p-n$ . Рассматриваемую схему можно выполнить на одной полупроводниковой пластине. Однако для устранения взаимодействия между выходом и входом предпочтительно применить две пластины.

В качестве материала выберем кремний типа  $n$ , с толщиной пластины в 0,05 мм, при удельном сопротивлении в 10 ом/см. Выполняя сопротивления схемы как объёмные сопротивления, мы при выбранном материале должны взять размеры: 0,25 мм ширины на 0,5 мм длины для  $R_A$ , 0,25 мм на 1,25 мм для  $R_B$  и 0,25 мм на 0,25 мм для  $R_C$ . Сопротивления и другие элементы схемы можно расположить, как указано на рис. 1У.7с.

При изготовлении устройства в соответствии с этим рисунком основная кремниевая пластина типа  $n$  используется в качестве катода всех диодов, материала объёмных сопротивлений и коллектора транзистора.

- 119 -

Далее в соответствующих частях пластины следует создать методом диффузии р-слой с тем, чтобы получить аноды диодов, ёмкость, находящуюся над сопротивлением  $R_B$ , и базу транзистора. Затем должен быть выполнен еще один диффузионный n-слой - для эмиттера транзистора.

Все указанные операции проводят с пластинкой сравнительно больших размеров; примерно 5 мм x 11 мм, на которой размещены одновременно 16 схем рассматриваемого вида.

После того как методом осаждения созданы нужные контакты, пластинка разделяется на части. Такой способ более продуктивен. Кроме того, при этом повторяемость параметров отдельных схем получается лучшей. Заключительным этапом является создание внутрисхемных соединений, выполненных из золотых проводников, как это показано на рис. IV.7с.

#### IV.8. Изготовление выводов и внешнее оформление молекулярного устройства

После обработки самой полупроводниковой пластины остаётся сделать выводы из "n" и "p" слоев, а также из определенных областей пластины. Значительная часть внутрисхемных соединений осуществляется через полупроводник, однако определенное число выводов всегда должно быть сделано, в частности выводы входа, выхода и подводка питания.

Операция выполнения выводов разделяется на два этапа: создание невыпрямляющих металлических контактов с полупроводником



- 120 -

и соединении выводных проводников с этими контактами.

Контакты создаются путём осаждения металла на поверхности полупроводника или впаивания металла в полупроводник при нагреве. Этот процесс аналогичен тому, который рассматривался при создании р-п переходов методом сплавления, с той разницей, что в данном случае выбирается металл, имеющий тот же характер проводимости, что и полупроводник. Таким образом создаются переходы полупроводник-металл типа р-р или п-п.

Расположение контактов будет различным в различных устройствах, а тип металла будет изменяться в зависимости от проводимости полупроводникового слоя. Для выполнения контактов может быть применен как метод электрохимического, так и метод вакуумного нанесения с использованием в обоих случаях фототехники так же, как и в случае применения фотосредств при создании слоев р-п. Единственное изменение в используемом оборудовании при переходе на новую схему будет заключаться в замене фотонегатива. Следующим шагом является разрезание пластины на части, имеющие в зависимости от вида схемы соответствующие размеры. Такие методы, как распиловка, применимы вследствие малого размера объектов лишь в случаях прямолинейных конфигураций. Возможно также резание ультразвуком, но оно требует сложной перестройки оборудования при схемных изменениях. Наиболее удобным способом является разделение на части путём травления с предварительной фотохимической обработкой поверхности. При

- 121 -

этом так же, как и при создании оксидного слоя, используется маска в виде фотослоя. Для травления используется кислота, способная растворять кремний. Пластина разрезается на части травлением по всем линиям раздела, которые не защищены фотослоем.

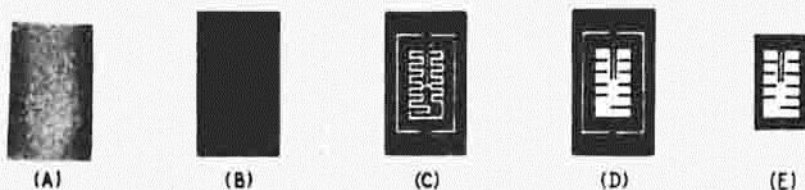


Рис. IV.8 - Этапы изготовления выводов из ковара: (А) - обработанная и очищенная металлическая пластинка; (В) - пластинка, покрытая фотослоем; (С) - фотослой после экспозиции и проявления; (Д) - после травления; (Е) - после обрезки и золочения.

Теперь каждый из элементов устройства подготовлен к присоединению выводных концов. Для подключения к толще основной пластины используются полоски из ковара. Для слоев, нанесенных методом диффузии, выводные провода соединяются с контактами, введенными в слой.

Выводные коваровые пластины изготавливаются, как показано на рис. IV.8, методом фототравления. Для различных схем могут потребоваться выводы различного типа, однако при использовании описанного метода их изготовление не представляется трудным. Корпус устройства, соответствующий доньшку обычного транзистора, выполняется путём впаивания коваровой рамки между керамическими и коваровыми кольцами. На этом этапе используется тех-

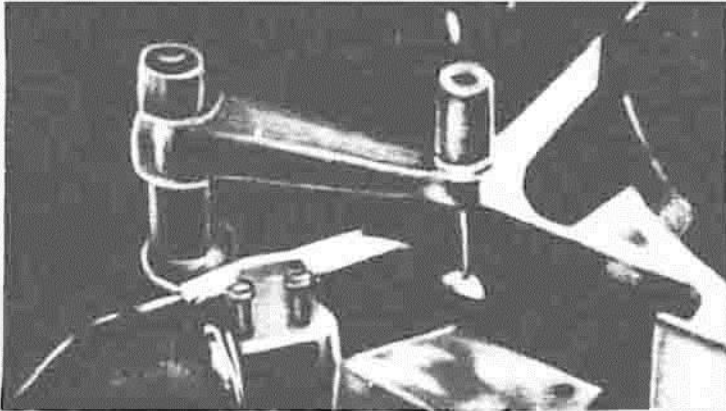


Рис. IV.9 - Установка для термического вдавливания выводов

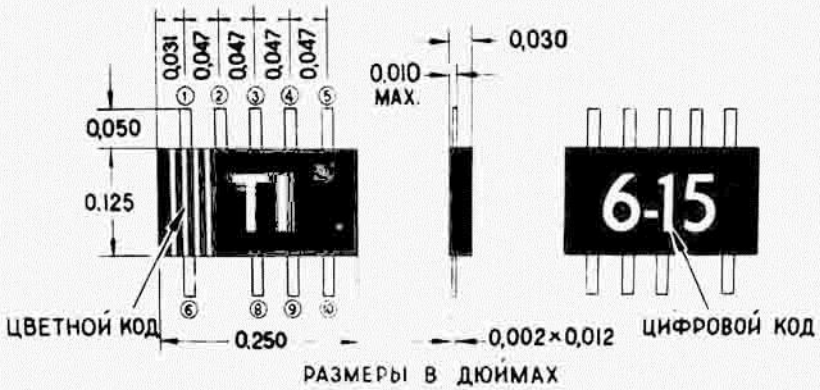


Рис. IV.10 - Молекулярное устройство "или" в закрыченном виде

- 123 -

нология, принятая при вваривании металла в стекло. Затем проводится подготовка к отжигу и заготовки помещаются в графитовую арматуру.

После отжига выводы золотят и присоединяют к полупроводниковым пластинам. При изготовлении транзисторов этот этап соответствует привариванию коллектора к доньшку транзистора.

Присоединение выводов к слоям, созданным методом диффузии, производится термическим вдавливанием с помощью устройства, показанного на рис. IV.9. Золотой проводничок помещают против контакта, впаянного в слой. Для того, чтобы вдавить каждый проводничок в соответствующий контакт, используется специальный тонкий штафт. При этом поддерживается температура около  $300^{\circ}\text{C}$ . Выводы, изготовленные таким способом, оказываются механически прочными и электрически надёжными. Подобная техника используется при изготовлении транзисторов для присоединения выводов к эмиттеру и базе. Основа, на которой собирают полупроводниковые устройства, является одновременно частью внешнего оформления. Теперь остаётся завершить внешнее оформление, сделав его герметичным. На рис. IV.10 показано законченное полупроводниковое устройство, с обозначением его размеров [8].

IV.9. "Плотность упаковки" полупроводниковой пластины  
и общая "плотность упаковки" устройства

При оценке объёмов, занимаемых устройствами молекулярной электроники, необходимо учитывать не только объём соответствующ-

- 124 -

щего полупроводникового материала, но и объёмы, относящиеся к выводам, внешнему оформлению и т.д. Вследствие чрезвычайно малого размера основного материала учёт этих дополнительных обстоятельств приобретает огромное значение. В качестве примера возьмём устройство, рассмотренное в параграфе IV.7. Общий объём, занимаемый этим устройством, составляет всего  $V = 0,025 \text{ мм}^3$ . Так как устройство эквивалентно схеме с 9 элементами, то его "плотность упаковки" составляет 370 элементов в  $1 \text{ мм}^3$ , или  $3,7 \cdot 10^5$  элементов в  $1 \text{ см}^3$  (!). Если учесть объём, занимаемый устройством, включая его выводы, эта величина падает до  $10^4$  элементов в  $1 \text{ см}^3$ . С учётом защиты от внешних воздействий и соответствующего оформления получим 600 элементов в  $1 \text{ см}^3$ . Наконец, если ряд subsystem соединить в общую систему и учесть, что для этого потребуется удвоение объёма, то получим плотность 300 элементов в  $1 \text{ см}^3$ . Последняя цифра также достаточно велика и в сотни раз превосходит "плотность упаковки" обычных электронных схем; однако она разительно отличается от первоначальной цифры в 370 000 элементов в  $1 \text{ см}^3$ .

В то же время сопоставление перечисленных плотностей говорит об огромных возможностях дальнейшего повышения плотности упаковки, и следовательно уменьшения объёмов и веса молекулярных устройств.

Аналогичные соотношения нужно иметь в виду при оценке возможностей других микроминиатюрных конструкций, например, микромодулей, хотя чем больше первоначальные габариты, тем меньше сказываются указанные факторы на общем объёме.

- 125 -

#### IV.10. Соображения по надёжности молекулярных устройств

Наиболее разительная особенность молекулярных устройств, сразу бросающаяся в глаза, заключается в их весьма малых весах и габаритах. Однако не менее важной является возможность получения весьма высокой надёжности этих устройств.

Рассмотрим основные обстоятельства, позволяющие получить высокую надёжность молекулярных устройств.

1. Очень часто неисправности электронной аппаратуры бывают вызваны структурными дефектами используемых материалов, приводящими к пробоям, обрыву или короткому замыканию в цепи. Постоянство структуры кристаллической решетки исходного материала молекулярных устройств с точно контролируемой величиной вносимых примесей исключает возможность появления подобных структурных дефектов.

2. Молекулярный моноблок выполнен из одного сплошного материала. Вследствие этого исключаются отказы, связанные с различными значениями коэффициентов линейного расширения при тепловых перепадах.

3. Использование единого моноблока сокращает примерно на 75-80% число внутриблочных паяных соединений. Помимо уменьшения числа отказов за счёт ненадёжных паяк между деталями, устраняются отказы за счёт нарушения контакта, при впаивании детали в схему контакта, между выводом сопротивлений или конденсато-

- 126 -

ров и соответствующими резистивными или металлическими плёнками.

4. Вследствие очень малой массы молекулярные устройства мало подвержены воздействию вибраций или ударов при реальных условиях использования аппаратуры. Поэтому отказы, связанные с вибрационными и ударными перегрузками, практически исключаются.

5. В молекулярных устройствах как активные, так и пассивные элементы герметически заделываются в общее миниатюрное оформление. В результате резко снижается воздействие внешних условий, в частности влажности.

6. Технологический процесс создания молекулярного устройства, эквивалентный для обычной схемы изготовлению всех пассивных элементов и электровакуумных приборов, а также сборке схемы, состоит из небольшого числа операций. Поэтому весь процесс изготовления можно максимально автоматизировать и подвергнуть точному контролю. Аналогичный контроль в обычной аппаратуре с учётом контроля за изготовлением каждой детали экономически невыгоден и технически трудно осуществим.

7. Благодаря тому, что процесс изготовления аппаратуры широко автоматизирован и строго контролируется, для анализа продукции можно применять статистические методы, ускоряющие и облегчающие нахождение возможных дефектов в изготовлении аппаратуры.

Опыт эксплуатации молекулярных устройств тока отсутствует, однако следует ожидать, что их применение позволит резко повысить надёжность радиоэлектронной аппаратуры.

- 127 -

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрение вопросов молекулярной электроники показывает, что эта область новой техники является исключительно перспективной. Можно не сомневаться в том, что в ближайшие годы молекулярные устройства найдут широкое практическое применение, по-видимому, в первую очередь в области счётных машин.

В настоящее время наметилось два пути создания молекулярных устройств с использованием полупроводниковых материалов.

Первый путь заключается в создании функциональных блоков, в которых в качестве основы используются полупроводниковые пластины, изготовленные обычными методами. Вопрос о том, каким образом можно решить задачу, идя по этому пути, рассмотрен в настоящей работе. Следует отметить, что при изготовлении устройств этого типа основные технологические процессы и технологическое оборудование в значительной степени такие же, как и при изготовлении транзисторов. Поэтому такой путь даёт реальную возможность уже сейчас непосредственно приступить к работе по созданию молекулярных устройств.

Для изготовления отдельного молекулярного устройства типа усилителя, мультивибратора, логической схемы в этом случае требуется всего 20-30 отдельных технологических операций. Число типов устройств, которые могут быть выполнены подобным способом, пока довольно ограничено. Однако по мере развёртывания



- 128 -

работ в этом направлении их число, несомненно, будет расти.

Второй путь связан с созданием молекулярных устройств в процессе выращивания полупроводниковых монокристаллов в виде тонких лент с совершенной поверхностью. Первый шаг в этом направлении сводится к созданию полупроводниковых лент, состоящих из одного слоя, с однородной структурой. Следующий шаг должен заключаться в создании р-п, р-п-р и п-р-п переходов в процессе роста кристаллов. В дальнейшем можно рассчитывать и на выращивание всего молекулярного устройства в целом, со всеми его пассивными и активными элементами.

Управление процессом выращивания может вестись по программе, которая будет определяться счётной машиной. В этом случае весь процесс создания собственно молекулярного устройства сведется к единой технологической операции. Дополнительные операции будут связаны только с созданием выводов и изготовлением внешней оболочки. Не исключена возможность того, что и эти дополнительные операции со временем удастся включить в единый процесс изготовления.

Второй путь создания молекулярных устройств еще более перспективен, однако овладение соответствующими процессами потребует значительно больших усилий и большего времени.

При создании молекулярных устройств окажется необходимым учитывать также следующие вопросы.

- 129 -

1. Воспроизводимость результатов. Решение задачи воспроизводимости потребует соблюдения ряда условий. Одним из первых условий является наличие полностью герметизированных помещений, с искусственным климатом и с содержанием пыли, по-видимому, не превосходящим 1-2 пылинки на  $1 \text{ см}^2$ .

2. Обеспечение работы молекулярных устройств в широком диапазоне температур. Хотя первоначальные работы могут вестись с кремнием и в какой-то степени с германием, в дальнейшем, очевидно, возникнет необходимость изыскать новые материалы с характеристиками, более стабильными при изменениях температуры.

3. Проблема охлаждения молекулярных устройств. Плотность упаковки молекулярных устройств - сотни и тысячи эквивалентных элементов в  $1 \text{ см}^3$ . В этих условиях вопросы отвода выделяющегося при работе тепла оказываются достаточно сложными. Потребуется разработка термодинамики молекулярных устройств и решение трудных задач охлаждения миниатюрной аппаратуры.

4. Автоматизация производственных процессов при изготовлении молекулярных устройств. Автоматизация должна предусматривать также и автоматический контроль за производственными операциями.

Все эти вопросы могут быть решены только в том случае, если наряду с разработкой новых методов проектирования и изготовления аппаратуры будут проводиться фундаментальные теоретические и экспериментальные исследования в области физики полупроводни-

- 130 -

ков применительно к молекулярным устройствам, в области новых материалов и технологических процессов изготовления аппаратуры.

В работах в области молекулярной электроники должны принимать широкое участие не только радиоинженеры, но и физики, химики, математики, технологи и специалисты по автоматическому регулированию.

**Библиография**

1. Журин В.И., Намиот Е.Д., Расчёт надёжности радиоэлектронной аппаратуры, 1959 г.
2. Aviation Week, 1959, 17/VIII.
3. IRE National Convention Record, 1959, с.6.
4. Труды шестого симпозиума по надёжности и контролю качества радиоэлектронной аппаратуры, 1960, январь II-13.
5. Aviation Week, 1957, 8/IV.
6. Proceedings of the IRE, 1959, v.47, N 5, май.
7. Иоффе А.Ф., Физика полупроводников, Изд-во АН СССР, 1957г.
8. Electronics, 1960, 13 мая.
9. Proceedings of the IRE, 1960, март.
10. Electronics, 1959, 7 августа.
11. IRE Transactions on Electronics Computers, 1959, июнь.
12. Proceedings of Royal Society (London), A 229, 1955.
13. Physical Review, 1959, 1 октября.

Объём 5,5 п.л.

Отп. на ротапринте

Зак. № 2020-26-IX-1960

лал

*Издание Отдела научно-технической информации КБ-1, 1960 г.*