

1.21. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Цель лекции: ознакомление с полупроводниками, предназначенными для работы при высоких температурах.

1.21.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Во многих современных динамично развивающихся отраслях гражданской промышленности, военной и космической техники существует потребность в электронике, способной надежно работать в жестких условиях эксплуатации, например при крайне высоких температурах. Как известно, классический подход инженеров при проектировании электроники, которая должна успешно работать в повышенном диапазоне температур, заключается в использовании активного или пассивного охлаждения. Однако в ряде случаев охлаждение оказывается весьма затруднительным или даже невозможным. Более того, в целях повышения надежности или удешевления оборудования работа при повышенной температуре иногда даже предпочтительна.

Для обеспечения надежной работы электронного оборудования при повышенной температуре необходимо контролировать целый ряд ключевых параметров, а также обеспечить решение ряда проблем. Одной из таких наиболее важных и широко известных проблем является рост тока утечки через подложку при повышенных температурах. Ток утечки в таких кристаллах удваивается при росте температуры на каждые $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, что неприемлемо во многих видах электронной аппаратуры.

Рассмотрим физические явления, происходящие в полупроводнике при повышении температуры. Как отмечалось выше, энергетические уровни электронов в полупроводниках и диэлектриках могут находиться в одной из двух зон: валентной зоне или зоне проводимости. Между этими зонами расположена запрещенная зона. Энергетические уровни электронов в запрещенной зоне находиться не могут. Отличие диэлектриков от полупроводников заключается только в ширине запрещенной зоны, считается, что у полупроводников она меньше 3 эВ .

При температуре абсолютного нуля все электроны располагаются в валентной зоне, а в зоне проводимости нет ни одного электрона, поэтому собственный полупроводник не проводит ток. При нагревании полупроводника электроны начинают переходить в зону проводимости. Чем выше температура, тем больше электронов переходит в зону проводимости, именно поэтому сопротивление полупроводника падает, а ток утечки увеличивается.

В собственном полупроводнике концентрация свободных носителей n_i определяется двумя основными параметрами: шириной запрещенной зоны E_g и температурой T :

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}},$$

где N_C , N_V — эффективная плотность состояний электронов и дырок соответственно.

Чем больше ширина запрещенной зоны E_g , тем меньше собственная концентрация свободных носителей при одной и той же температуре. Зависимость концентрации свободных носителей от температуры для некоторых полупроводников представлена на рис. 1.108. Видно, что концентрация свободных носителей при увеличении температуры быстрее всего увеличивается у кремния, а меньше всего у нитрида галлия и карбида кремния. Ниже приведена ширина запрещенной зоны и концентрация собственных носителей для граничной температуры, где $T_{гр}$ — граничная температура, при которой значение концентрации n_i сравнивается со значением концентрации основных носителей, определяемой легирующей концентрацией N_d .

Материал	Si	GaAs	GaP	SiC(4H)	GaN
E_g , эВ.....	1,1	1,4	2,8	3,0	3,4
n_i , см ⁻³	$1,6 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^1$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$9,2 \cdot 10^{-10}$
$T_{гр}$, °C	270	470	620	900	1300

Если полупроводниковому кристаллу не обеспечить эффективный теплоотвод, начинается процесс, при котором разогрев кристалла приводит к увеличению тока утечки, в результате чего кристалл еще больше разогревается и т. д., до выхода полупроводникового прибора из строя.

Одним из эффективных способов борьбы с токами утечки является использование полупроводников с широкой запрещенной зоной.

Чем шире запрещенная зона полупроводника, тем меньше вероятность перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости. Если рассмотреть исторический аспект развития электроники, особенно силовой, то можно заметить, что развитие электроники постепенно движется в направлении использования полупроводников со все более широкой запрещенной зоной. Первые полупроводниковые приборы были на основе германия, но от них быстро отказались, так как этот материал имел ширину запрещенной зоны около 0,7 эВ. Затем стали использовать кремний, у которого ширина запрещенной зоны составляла 1,12 эВ. Карбид кремния в зависимости от типа кристаллической решетки может иметь ширину запрещенной зоны 2,2...3,3 эВ, что позволяет обеспечить на порядок более высокое сопротивление исток–сток у полевого транзистора в закрытом состоянии. Для сравнения, приборы на основе кремния выдерживают температуру до 125 °C, а приборы из карбида кремния — теоретически до 600 °C (на практике до 200 °C, и только потому, что температуру больше 200 °C не выдерживают корпуса приборов). Особенностью карбида кремния также является многообразие форм кристал-

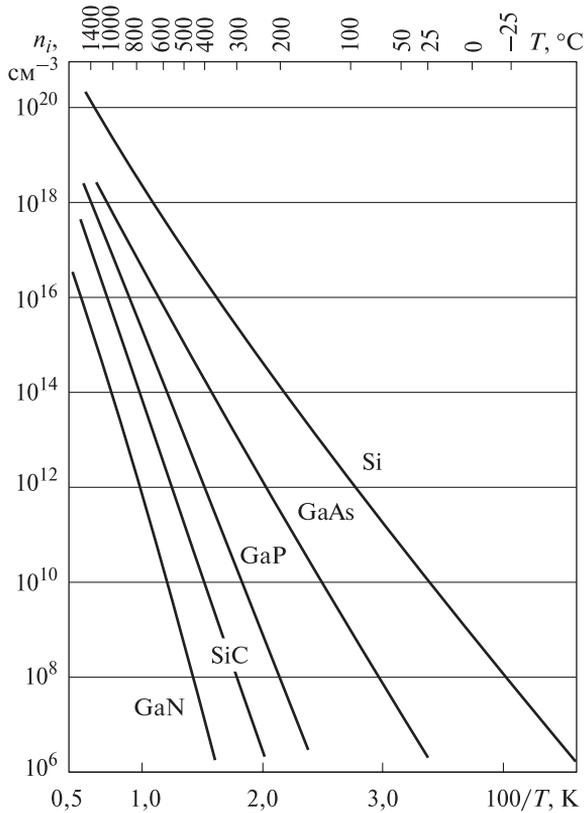


Рис. 1.108. Зависимость концентрации свободных носителей от температуры (https://studfile.net/html/528/114/html_EC5fgBIXIV.B2Ld/img-T7psPE.png)

лической решетки. Для целей электроники на практике пока применяются только два варианта формы кристаллической решетки: 4Н и 6Н. Кроме того, карбид кремния обладает в 3 раза большей теплопроводностью по сравнению с кремнием. Это обеспечивает лучший отвод теплоты от кристалла.

1.21.2. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ НА КАРБИДЕ КРЕМНИЯ

Карбид кремния SiC — бинарное полупроводниковое соединение с большой шириной запрещенной зоны: 2,2...3,3 эВ (в зависимости от модификации). Модификаций карбида кремния насчитывается около 170, но только две из них — 4Н- SiC и 6Н- SiC — применяются в настоящее время при производстве полупроводниковых приборов. Материал устойчив к окислению вплоть до температур 1400 $^{\circ}\text{C}$. При комнатной температуре SiC не взаимодействует ни с какими кислотами. Эти свойства обуславливают технологи-

ческие трудности при создании приборов твердотельной электроники на его основе.

Приборы на основе карбида кремния могут работать при высоких температурах вплоть до 600 °С, обладают стабильностью электрических характеристик при воздействии температуры и времени. Карбид кремния имеет теплопроводность в 3 раза больше, чем у Si, и в 10 раз больше, чем у GaAs, устойчив к воздействию радиации, что очень важно для создания приборов специального назначения. Эти качества определяют большую перспективность карбида кремния для изготовления полупроводниковых приборов. В настоящее время разработаны и производятся на основе карбида кремния мощные высоковольтные диоды Шоттки, мощные ВЧ- и СВЧ-транзисторы и светодиоды повышенной светоотдачи. Из сравнения ВАХ диода Шоттки на основе карбида кремния при различных температурах следует, что диод на основе карбида кремния имеет хорошие характеристики при повышенных температурах (рис. 109).

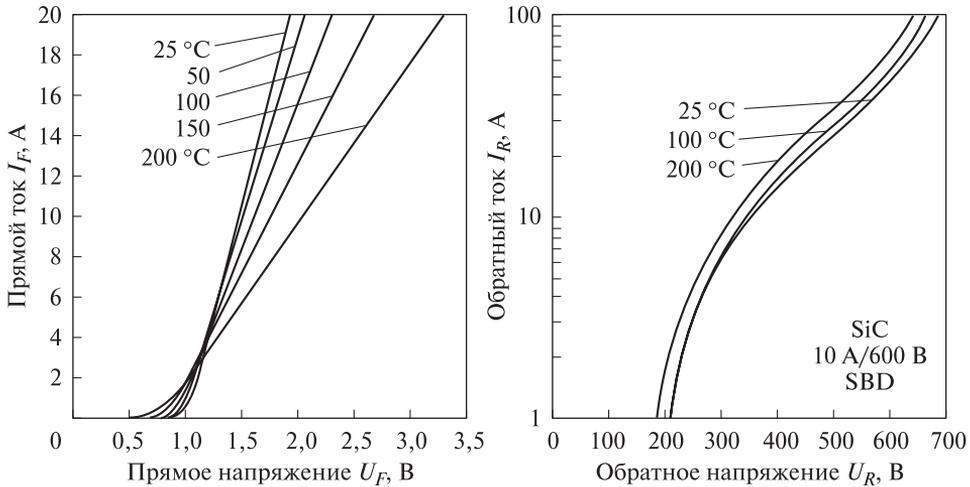


Рис. 1.109. Вольт-амперные характеристики диода Шоттки на основе карбида кремния при различных температурах (<https://www.icquest.ru/media/7539/641159813813096.jpg>, <https://www.icquest.ru/media/7540/587646695169060.jpg>)

Рассмотрим некоторые технологические проблемы, связанные с производством приборов на основе карбида кремния. Такой материал, как карбид кремния, человечество использует уже более 100 лет, в основном в качестве материала для изготовления шлифовальных инструментов вследствие очень высокой твердости, сопоставимой с алмазом. Поскольку карбид кремния является очень твердым материалом, его сложно обрабатывать. Второй проблемой является сложность его очистки от примесей, а для целей электроники необходим очень чистый карбид кремния. Технологические трудности были преодолены только в 2010-х годах. Еще одной проблемой, характерной для транзисторов из карбида кремния, является сложность управления такими приборами.

Как известно, кремниевый МОП-транзистор открывается при подаче на затвор напряжения 1...4 В относительно истока, в зависимости от марки. Если на затворе нулевое напряжение, то такой транзистор будет находиться в закрытом состоянии. Большинство транзисторов, изготовленных из карбида кремния, управляются следующим образом. Для открытия транзистора на затвор требуется подать напряжение 20...25 В относительно истока, а для закрытия требуется отрицательное напряжение: около -5 В. Данное обстоятельство существенно усложняет конструкцию узла, управляющего мощным транзистором из карбида кремния, что побудило конструкторов и исследователей искать пути решения.

В ноябре 2020 г. американская компания United SiC начала серийный выпуск МОП-транзисторов из карбида кремния, у которых напряжение открытия составляет 12 В, а напряжение закрытия равно нулю, как у кремниевых транзисторов. Преимуществом транзисторов на базе карбида кремния является и более высокое быстродействие, обусловленное тем, что они в процессе работы не входят в режим насыщения.

Более низкие токи утечки определяют меньший нагрев SiC-транзисторов, а это значит, что систему теплоотвода можно сделать компактной.

Современные транзисторы на основе карбида кремния при комнатной температуре имеют сопротивление в закрытом состоянии до 350 МОм против 15 МОм у кремниевых аналогов, а максимальное напряжение между истоком и стоком может достигать 15 кВ. Это позволяет применять такие транзисторы для коммутации в средневольтных распределительных сетях постоянного тока.

Второй высокотемпературный полупроводник — нитрид галлия GaN. Нитрид галлия имеет ширину запрещенной зоны еще большую, чем карбид кремния (табл. 1.2). Поэтому высокая рабочая температура твердотельных устройств на основе GaN так же, как и для карбида кремния, является одним из преимуществ этого материала.

Таблица 1.2

Характеристики некоторых полупроводниковых материалов

Параметр	Материал		
	GaN	Si	SiC
Ширина запрещенной зоны, эВ	3,4	1,12	3,2
Диэлектрическая проницаемость	9,5	11,4	9,7
Подвижность, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	990–2000	1500	650
Критическая напряженность, МВ/см	3,3	0,3	3,5
Дрейфовая скорость насыщения электронов, $\times 10^7$ см/с	2,5	1	2

Высокая критическая напряженность поля у GaN дает потенциальную возможность реализовать более высоковольтные приборы. Большая ширина запрещенной зоны обеспечивает высочайшую стабильность свойств при изменении температуры или воздействии радиации, что чрезвычайно важно в

первую очередь для космической и военной электроники, а также для устройств, работающих в жестких условиях. Высокая подвижность электронов и дрейфовая скорость определяют значительно меньшее сопротивление в проводящем состоянии и высокую удельную мощность по сравнению с карбидом кремния.

В результате GaN-транзисторы имеют на порядок большую удельную мощность, что должно приводить к значительному уменьшению габаритных размеров приборов по сравнению с традиционными кремниевыми транзисторами.

Из нитрида галлия изготавливают большинство типов современных светодиодов. В настоящее время электронной промышленностью также освоено поколение устройств на основе нитрида галлия — транзисторы типа НЕМТ (*High Electron Mobility Transistor*) с высокой подвижностью электронов. В целях удешевления производства их изготавливают на кремниевых подложках, а не на подложках из карбида кремния или в виде чистой нитрид-галлиевой структуры.

В России Госкорпорация «Ростех» серийно выпускает мощные GaN-транзисторы, предназначенные для передатчиков базовых станций мобильной связи. Следует отметить, что НИИ микроэлектроники (г. Воронеж, входит в состав Госкорпорации «Ростех») и Компания «Миландр» (г. Москва) также занимаются разработкой силовых транзисторов на основе нитрида галлия.

Значительное преимущество GaN-транзисторов — возможность создания компактной аппаратуры, построенной с их использованием. Поэтому они считаются перспективными для использования в электромобилях, солнечных панелях, зарядных устройствах, базовых станциях мобильной связи, системах управления трехфазными электродвигателями и т. п.

Тесты к лекции 1.21

1. Какая из проблем считается очень важной при работе полупроводников при высоких температурах?

- а) рост тока утечки через подложку при повышенных температурах;
- б) туннельный пробой $p-n$ -перехода;
- в) лавинный пробой $p-n$ -перехода.

2. Какими основными параметрами в собственном полупроводнике определяется концентрация свободных носителей?

- а) двумя основными параметрами: шириной запрещенной зоны и температурой;
- б) количеством донорных или акцепторных примесей;
- в) двумя основными параметрами: шириной зоны проводимости и шириной валентной зоны.

3. В какой последовательности у полупроводников быстрее всего увеличивается концентрация свободных носителей при увеличении температуры?

- а) кремний, карбид кремния, нитрид галлия;
- б) кремний, нитрид галлия, карбид кремния;
- в) нитрид галлия, кремний, карбид кремния.

4. Какую проблему позволяет решить использование полупроводников с широкой запрещенной зоной?

- а) уменьшить токи утечки при нагреве;
- б) уменьшить себестоимость полупроводниковых приборов;
- в) уменьшить количество донорных или акцепторных примесей.

5. Как зависит вероятность перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости от ширины запрещенной зоны?

- а) чем шире запрещенная зона полупроводника, тем меньше вероятность перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости;
- б) чем уже запрещенная зона полупроводника, тем меньше вероятность перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости;
- в) никак не зависит.

6. Какими преимуществами обладают приборы на основе нитрида галлия?

- а) возможность работать при высокой температуре;
- б) низкая себестоимость;
- в) высокая доступность.