

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ**  
Федеральное государственное образовательное бюджетное  
учреждение высшего профессионального образования  
**Московский технический университет связи и информатики**  
Кафедра электроники и микроэлектронных средств  
телекоммуникаций

*Рекомендовано УМО по образованию в области  
Инфокоммуникационных технологий и систем  
связи в качестве учебного пособия для студентов  
высших учебных заведений, обучающихся по нап-  
равлению подготовки 210700 – Инфокоммуника-  
ционные технологии и системы связи квалифика-  
ции (степени) «бакалавр» и квалификации  
(степени) «магистр».  
Протокол № 61 от 22.12.2011г.*

## **ПРИБОРЫ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ И ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА**

**в вопросах и ответах**

### **Часть 2**

#### **Полупроводниковые приборы СВЧ**

**Учебное пособие**

Москва 2012

УДК 621.38

Аристархов Г.М., Елизаров А.А., Николотов В.И. Приборы сверхвысоких частот и оптического диапазона в вопросах и ответах. Ч. 2. Полупроводниковые приборы СВЧ: Учебное пособие / МТУСИ. – М., 2012. – 49 с.

Учебное пособие содержит тестовые задания по современным СВЧ приборам: детекторным диодам, варикапам, р-и-п диодам, диодам с барьером Шотки, диодам Ганна, лавинно-пролетным диодам, биполярным транзисторам, полевым транзисторам, в т.ч. на гетеропереходах.

Пособие предназначено для промежуточного контроля знаний студентов 3 курса, для проведения контроля остаточных знаний на старших курсах, а также для самоконтроля при самостоятельном (внеаудиторном) изучении дисциплины «Приборы СВЧ и оптического диапазона».

Ил. 8.

Рецензенты: В.Н.Акимов, канд.техн.наук, доцент (МТУСИ)  
В.И.Нефедов, докт.техн.наук, профессор  
(МГТУ МИРЭА)  
В.Н.Нефедов, докт.техн.наук, профессор  
(МИЭМ) (ТУ)

© Московский технический университет  
связи и информатики, 2012 г.

## Содержание

Предисловие .....	4
Особенности полупроводниковых приборов сверхвысоких частот.....	4
Классификация полупроводниковых диодов СВЧ.....	6
<b>1. Переключательные диоды и варикапы .....</b>	<b>12</b>
1.1. Тестовые задания по диодам с р-и-п структурой .....	12
1.2. Тестовые задания по диодам с барьером Шотки.....	18
1.3. Тестовые задания по варикапам .....	23
<b>2. Лавинно-пролетные диоды .....</b>	<b>25</b>
2.1. Тестовые задания по лавинно-пролетным диодам.....	25
<b>3. Диод Ганна.....</b>	<b>29</b>
3.1. Тестовые задания по диодам Ганна .....	29
<b>4. Биполярные СВЧ транзисторы.....</b>	<b>33</b>
4.1. Тестовые задания по биполярным СВЧ транзисторам .....	33
<b>5. Полевые СВЧ транзисторы .....</b>	<b>38</b>
5.1. Тестовые задания по полевым транзисторам с барьером Шотки.....	38

## **Предисловие**

Полупроводниковые приборы занимают особое место в технике СВЧ. Благодаря именно их применению стало возможным развитие современных спутниковых и мобильных систем связи, средств радионавигации и радиолокации, активных фазированных антенных решеток, а также создание сверхбыстро действующих суперкомпьютеров. Столь широкое и эффективное их применение в различных областях науки и техники предопределено рядом несомненных достоинств полупроводниковых приборов СВЧ, среди которых в первую очередь следует отметить их высокую надежность и эксплуатационные свойства, сверхмалые размеры и возможность их технологической интеграции с целью реализации высоконадежных функционально сложных монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ. В настоящее время приемопередающие модули, например, мобильных телефонов реализуются в виде всего лишь одной или двух МИС СВЧ.

Полупроводниковые приборы СВЧ различаются по функциональному назначению, принципам действия, структурам, используемым материалам и технологии изготовления. При этом схемотехническое решение определяет реализацию того или иного режима работы прибора и оптимизация электрических параметров устройства в целом достигается выбором (разработкой) структуры и технологии изготовления СВЧ прибора под данное решение и наоборот. То есть прибор и СВЧ схема неразрывно взаимосвязаны. Таким образом, создание и дальнейшее совершенствование полупроводниковых СВЧ приборов сопряжено с интеграцией знаний различных областей науки и техники.

Данное учебное пособие подготовлено по разделу «Полупроводниковые приборы СВЧ» дисциплины «Приборы СВЧ и оптического диапазона» в форме тестовых заданий, что будет способствовать, по мнению авторов, усвоению содержания дисциплины и самоконтролю знаний при самостоятельной работе студентов. Желаем успехов в изучении столь динамично развивающейся элементной базы современных средств телекоммуникаций СВЧ диапазона.

## **Особенности полупроводниковых приборов сверхвысоких частот**

Полупроводниковые приборы, предназначенные для работы в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ), оказываются в условиях, которые принципиально отличаются от условий работы низкочастотной электроники. Эти

обстоятельства связаны прежде всего со специфическими свойствами диапазона сверхвысоких частот.

Первым важным физическим фактором, характеризующим электронику СВЧ, является соизмеримость периода колебаний со временем пролета носителей заряда между электродами полупроводникового прибора. Это время в большинстве приборов обычно имеет величину порядка  $10^{-8} \dots 10^{-9}$  с. Следовательно, уже при частотах  $10^8 \dots 10^9$  Гц, т.е. в диапазонах метровых и дециметровых длин волн, время пролета оказывается приблизительно равным периоду колебаний. В диапазонах сантиметровых и миллиметровых длин волн время пролета может превышать период колебаний на порядок и более. Любой полупроводниковый и электровакуумный прибор на сверхвысоких частотах перестает быть безынерционным прибором, каким он по существу является в условиях низкочастотной электроники. Инерция носителей заряда резко нарушает или затрудняет эффективное усиление (другие преобразования), которые успешно выполняются приборами на сравнительно низких частотах.

Второе основное затруднение при повышении рабочей частоты носит схемный, конструктивно-технический характер. Для повышения резонансной частоты любой колебательной цепи необходимо уменьшить ее паразитные емкости и индуктивности. В результате этого уже на волнах метрового диапазона индуктивности выводов и междуэлектродные емкости оказываются соизмеримыми с параметрами внешней цепи. Дальнейшее укорочение рабочей длины волны требует соответственного уменьшения емкостей и индуктивностей внутри прибора.

Трудности возрастают ввиду того, что длина волны становится соизмеримой с геометрическими размерами деталей (элементов) внешней цепи, а также с размерами электродов и выводов самого прибора. Обычно активный прибор включается в электрическую цепь с сосредоточенными параметрами. Принципиальные недостатки, присущие таким цепям, требуют пересмотра путей конструирования активных приборов при переходе к дециметровому и особенно сантиметровому и миллиметровому диапазонам волн.

Одним из путей преодоления отмеченных затруднений является миниатюризация и микроминиатюризация приборов – сокращение междуэлектродных расстояний и уменьшение геометрических размеров и выводов приборов. При этом, с одной стороны, удается уменьшить время пролета носителей заряда между электродами прибора. С другой стороны, миниатюризация позволяет уменьшить внутриприборные индуктивности и емкости, а также ослабить излучение из контура, составной частью которого

является активный прибор. Уменьшение паразитных индуктивностей можно достичь также путем использования выводов, выполненных в виде металлических дисков, цилиндров, плоских пластин («вертолетная конструкция»).

В результате миниатюризации и выбора более рациональной конструкции удается, не меняя принципов действия приборов, создавать приборы малой мощности, способные работать вплоть до сантиметрового диапазона длин волн. Лавинно-пролетные диоды, диоды Ганна могут компактно размещаться внутри волноводных секций и рационально использоваться в сочетании с коаксиальными линиями передачи энергии. Специфические особенности техники СВЧ привели к тому, что прибор, как правило, включает в себя колебательную систему и другие элементы, функции которых относились ранее к классической радиотехнике. Раздельное рассмотрение активного прибора как такового и цепи (или схемы), существующей независимо и обособленно от активного прибора, на сверхвысоких частотах оказывается совершенно неприемлемым. Поэтому разработка приборов СВЧ требует знаний не только в области волноводов, полых резонаторов и других элементов техники сверхвысоких частот.

#### Классификация полупроводниковых диодов СВЧ

Полупроводниковые диоды СВЧ предназначены для работы в диапазонах сантиметровых, миллиметровых длин волн. Такие диоды могут быть классифицированы по различным критериям:

- функциональному назначению и физическим процессам, на использовании которых основана работа СВЧ диода и др.
- полупроводниковым материалам для изготовления диодов,
- методам изготовления р-п переходов.

1. *Смесительный СВЧ диод – полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования СВЧ колебаний* посредством смешивания их с более мощными СВЧ колебаниями другой частоты. Действие смесительного СВЧ диода  *основано на нелинейности его вольт-амперной характеристики*, приводящей к появлению в токе диода колебаний с суммарными и разностными частотами. В качестве смесительного СВЧ диода получил широкое применение диод с барьером Шотки. Используется в супергетеродинных радиолокационных приемниках в качестве нелинейного элемента, на котором в результате взаимодействия СВЧ сигнала и сигнала

гетеродина получают сигнал с разностной частотой, называемой *промежуточной частотой*.

2. *Детекторный СВЧ диод – полупроводниковый диод, предназначенный для детектирования СВЧ сигналов малой мощности*. Работа детекторных СВЧ диодов основана на нелинейности ВАХ диодов и выделении из спектра частоты тока постоянной составляющей. Если СВЧ сигнал модулирован по амплитуде низкочастотным сигналом, то при детектировании помимо постоянной составляющей тока *появляется низкочастотный сигнал, повторяющий огибающую СВЧ сигнала*. В качестве детекторного СВЧ диода чаще всего используют полупроводниковые диоды с точечным контактом – точечный диод, плоскостные диоды с барьером Шотки, тунNELНЫЕ диоды, обращенные диоды. Для детекторных СВЧ диодов характерны малые емкости и высокая рабочая частота.

3. *Параметрический СВЧ диод – полупроводниковый диод, предназначенный для использования в параметрических усилителях* в качестве элемента с электрически управляемой емкостью. Параметрический СВЧ диод обеспечивает *усиление маломощных сигналов с достаточно низким уровнем шума*.

4. *Переключательный СВЧ диод – полупроводниковый диод, предназначенный для управления в линиях передачи уровнем мощности или фазой СВЧ сигнала*. Действие переключательного СВЧ диода основано на резком изменении его электрического сопротивления при переключении полярности управляющего напряжения. Переключательный СВЧ диод изготавливают на основе р-п перехода, контакта металл-полупроводник, р-п структуры.

В настоящее время полупроводниковые диоды с р-п структурой находят широкое применение в качестве переключательных элементов в СВЧ устройствах формирования и обработки сигналов. Это обусловлено тем, что при работе в переключательных режимах *диоды с р-п структурой* по сравнению с диодами, имеющими р-п структуру, *обладают заметными преимуществами* и лишены недостатков *электронно-дырочных переходов при переключении СВЧ сигналов*.

К недостаткам *обычных р-п переходов* относится следующее. Диоды СВЧ изготавливают из полупроводника с малым удельным сопротивлением (с большой концентрацией примеси в базе), и они имеют точечный р-п переход очень малых размеров. Этим достигается быстрая рекомбинация носителей зарядов в базе и малая емкость перехода. Однако применение полупроводника с

большой концентрацией примеси приводит, во-первых, к повышению контактной разности потенциалов, а следовательно, и к **увеличению прямого напряжения**, во-вторых, — к уменьшению толщины р-п перехода, а значит, к **уменьшению величины пробивного напряжения** (т.е. опасности возникновения раннего электрического пробоя).

Напряжение пробоя у СВЧ диодов составляют единицы вольт. Из-за очень малой площади р-п перехода максимально допустимый прямой ток мал (15...20 мА). Указанные **недостатки обычных СВЧ диодов** особенно сильно сказываются при их использовании в качестве переключательных элементов, так как в **значительной мере ограничивают мощность переключаемых СВЧ сигналов**.

Перечисленные недостатки электронно-дырочных СВЧ диодов отсутствуют у СВЧ диодов с р-и-п структурой.

Переключательный СВЧ диод с р-и-п структурой представляет собой две тонкие сильно легированные области р<sup>+</sup>-типа и п<sup>+</sup>-типа, разделенные достаточно широкой (0,01...0,5 мм) областью i-типа с проводимостью, близкой к собственному полупроводнику. Удельная барьерная емкость С<sub>б</sub> на порядок меньше, чем в р-п структурах. Площадь диода обычно не превышает 1 мм<sup>2</sup>; такие р-и-п структуры имеют меньшие потери, лучшее охлаждение и большую рассеиваемую и коммутируемую мощности СВЧ сигналов  $P_{\text{рас}} \sim \text{ед. Вт}$ .

Конструкция р-и-п диодов СВЧ использует:

- Si полупроводники р<sup>+</sup>-типа, п<sup>+</sup>-типа, i-типа с большим сопротивлением,
- малоиндуктивные выводы (ленточные),
- керамику,
- наиболее распространены конструкции СВЧ диодов – коаксиального и патронного типов.

При использовании бескорпусных СВЧ диодов:

- уменьшаются паразитные параметры С<sub>корп</sub>, L<sub>корп</sub>,
- появляется удобство монтажа в микрополосковых конструкциях,
- мощность рассеяния ед. Вт.

Рассмотрим работу СВЧ диодов с р-и-п структурой и некоторые их особенности, отличные от диодов с р-п структурой.

В состоянии электрического равновесия (без внешнего напряжения, когда  $U_{\text{вне}}=0$ ) в р-и-п структуре образуются два перехода: р-и и i-п (рис.1). При

одинаковой концентрации акцепторных примесей р-типа и донорных примесей

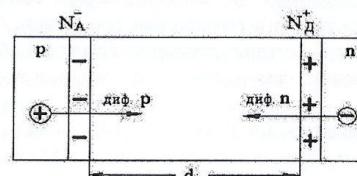


Рис. 1

п-типа в структуре возникают два диффузионных процесса, направленные в i-область: дырки из р-области диффундируют через переход р-и в область i-типа, аналогично, электроны диффундируют через переход i-п в соседнюю i-область (в равном количестве).

В результате встречных

диффузий вблизи границ i-области возникают неподвижные ионы-акцепторы ( $N_A^-$ ) и неподвижные ионы-доноры ( $N_D^+$ ). Распределение напряженности электрического поля в i-области практически можно считать однородным (в отличие от обычного р-п перехода). Таким образом, i-область с низкой концентрацией носителей зарядов ( $\sigma_i \approx 0$ ), но обладающую диэлектрической проницаемостью, можно принять за конденсатор, «пластинами» которого являются узкие (из-за большой концентрации примесных носителей заряда в р<sup>+</sup>- и п<sup>+</sup>-областях) слои неподвижных ионов-акцепторов  $N_A^-$  и ионов-доноров  $N_D^+$ . Барьерная емкость  $C_b = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d_i}$  р-и-п диода определяется размерами i-слоя (с большим сопротивлением) и при достаточно широкой i-области от приложенного постоянного напряжения практически не зависит (в отличие от р-п структуры, где  $C_b = f(U_{\text{вне}})$ ).

В состоянии динамического равновесия в р-и-п структуре образуются потенциальные барьеры в переходах, обусловленные неподвижными ионами-акцепторами и ионами-донорами.

Если к р<sup>+</sup>-области приложить плюс внешнего напряжения, а к п<sup>+</sup>-области минус от внешнего напряжения источника (прямое напряжение  $U_{\text{пр}}$ ), то потенциальные барьеры понизятся и одновременно возникнут инжекционные встречные потоки дырок из р<sup>+</sup>-области и электронов из п<sup>+</sup>-области в i-область, в которой они будут рекомбинировать между собой. При этом прямой диффузионный ток  $I_{\text{пр}}$  достигает большой величины, а прямое сопротивление  $r_{\text{пр}}$  р-и-п структуры резко падает. При обратном напряжении  $U_{\text{обр}}$  (минус – к р<sup>+</sup>-области, плюс – к п<sup>+</sup>-области) потенциальные барьеры повысятся, и ток диффузии станет равным нулю. Происходит экстракция носителей зарядов из i-области в соседние области, и через р-и-п структуру будет протекать весьма

небольшой тепловой ток неосновных носителей. Уменьшение концентрации основных носителей заряда приводит к дополнительному возрастанию сопротивления i-области по сравнению с равновесным состоянием. Поэтому для p-i-n диодов характерны очень большие отношения прямого и обратного сопротивлений, что является важной характеристикой диодов, используемых в переключательных режимах.

В качестве переключательных (импульсных) СВЧ диодов широко применяются также диодные структуры с барьерами Шотки и Мотта. В этих приборах процессы прямой проводимости определяются только основными носителями заряда. Таким образом, у рассматриваемых диодов отсутствует диффузионная емкость, связанных с накоплением и рассасыванием избыточного заряда насыщенных носителей в базе, что и определяет их хорошие высокочастотные свойства.

Отличие барьера Мотта от барьера Шотки состоит в том, что тонкий i-слой создан между металлом M и сильно легированным полупроводником n+, так что образуется структура M-i-n+. В высокоомном i-слое падает все приложенное к диоду напряжение, поэтому толщина объединенного слоя в n+-области очень мала и не зависит от напряжения. И поэтому барьерная емкость C<sub>b</sub> практически не зависит от напряжения и сопротивления базы.

Наибольшую рабочую частоту имеют диоды с барьером Мотта и Шотки, которые в отличие от диодов с p-n переходом, почти не накапливают неосновных носителей заряда в базе диода при прохождении прямого тока и поэтому имеют малое время восстановления t<sub>вос</sub> (около 100 пс).

Модель СВЧ диода с p-i-n структурой (для U<sub>пр</sub>>0, C<sub>D</sub>≠0).

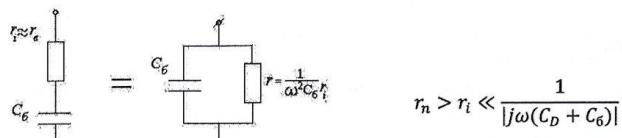


Рис. 2

Открытый диод – это активное сопротивление r<sub>i</sub>≈r<sub>b</sub>≈1 Ом.

Идеальный ключ:

- открытое состояние R<sub>акт</sub> мало ( $\approx$ Ом),
- закрытое состояние R<sub>акт</sub>  $\approx$  n. кОм.

##### 5. Умножительный СВЧ диод – полупроводниковый диод,

**используемый для умножения частоты сигнала.** Действие умножительного СВЧ диода основано на использовании **нелинейной емкости**. При воздействии на умножительный СВЧ диод гармонического сигнала в токе появляются гармоники, кратные основной частоте. Необходимая гармоника выделяется с помощью фильтра, путем настройки объемного резонатора на частоту гармоники необходимой кратности. К умножительным СВЧ диодам относят некоторые плоскостные диоды с определенным распределением легирующей примеси, диод с барьером Шотки и диоды со структурой металл-окисел-полупроводник.

## 1. Переключательные диоды и варикапы

### 1.1. Тестовые задания по диодам с p-i-n структурой

1.1.1. Диоды с p-i-n структурой состоят из трех полупроводниковых областей, отличающихся типом электропроводности и величиной концентрации примесей:

область р-типа:

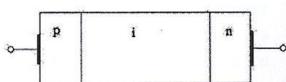
- а) сильно легирована  $N_{акт}$ -примесью;
- б) слабо легирована  $N_{акт}$ -примесью;

область n-типа:

- а) сильно легирована  $N_{дон}$ -примесью;
- б) слабо легирована  $N_{дон}$ -примесью;

область i-типа:

- а) сильно легирована;
- б) слабо легирована;
- в) близка к собственной (беспримесной).



Верно: ?

1.1.2. Диоды с p-i-n структурой состоят из трех полупроводниковых областей, отличающихся величиной электрической проводимости:

область р-типа:

- а)  $\sigma_p < \sigma_i$ ;
- б)  $\sigma_p > \sigma_i$ ;
- в)  $\sigma_p \gg \sigma_i$ ;
- г)  $\sigma_p \ll \sigma_i$ ;

область n-типа:

- а)  $\sigma_n > \sigma_i$ ;
- б)  $\sigma_n \gg \sigma_i$ ;
- в)  $\sigma_n < \sigma_i$ ;
- г)  $\sigma_n \ll \sigma_i$ ;

область i-типа:

- а)  $\sigma_p < \sigma_i > \sigma_n$ ;
- б)  $\sigma_p \gg \sigma_i \ll \sigma_n$ ;
- в)  $\sigma_p > \sigma_i < \sigma_n$ .

Верно: ?

1.1.3. Диоды с p-i-n структурой состоят из трех полупроводниковых областей, отличающихся величиной сопротивления области:

область р-типа:

- а)  $r_p \ll r_i$ ;

- б)  $r_p < r_i$ ;

- в)  $r_p > r_i$ ;

область n-типа:

- а)  $r_n \ll r_i$ ;

- б)  $r_n < r_i$ ;

- в)  $r_n > r_i$ ;

область i-типа:

- а)  $r_p \ll r_i \gg r_n$ ;

- б)  $r_p < r_i > r_n$ ;

- в)  $r_p > r_i < r_n$ .

Верно: ?

1.1.4. При приложении к p-i-n диоду прямого напряжения происходит ...

а) перенос носителей заряда из области, в которой они были основными, в область, в которой они становятся неосновными, через пониженный энергетический барьер p-i (инжекция);

б) перенос носителей заряда из области, в которой они были основными, в область, в которой они становятся неосновными, через пониженный энергетический барьер i-p (инжекция);

в) одновременная инжекция (встречная) носителей заряда дырок из p-области и электронов из n-области в i-область.

Верно: ?

1.1.5. При приложении к p-i-n диоду прямого напряжения высота потенциального барьера ...

- а)  $\phi(p-i)$  – уменьшается;
- б)  $\phi(p-i)$  – увеличивается;
- в)  $\phi(p-i)$  – не изменяется;
- г)  $\phi(i-n)$  – уменьшается;
- д)  $\phi(i-n)$  – увеличивается;
- е)  $\phi(i-n)$  – не изменяется.

Верно: ?

1.1.6. При приложении к p-i-n диоду прямого напряжения сопротивление перехода ...

- а)  $r(p-i)$  – уменьшается;
- б)  $r(p-i)$  – увеличивается;
- в)  $r(p-i)$  – не изменяется;
- г)  $r(i-n)$  – уменьшается;

13

12

- д)  $r(i-n)$  – увеличивается;
- е)  $r(i-n)$  – не изменяется.

Верно: ?

1.1.7. При приложении к р-і-п диоду прямого напряжения концентрация инжектированных носителей заряда в і-области ...

- а) уменьшается;
- б) увеличивается;
- в) не изменяется.

Верно: ?

1.1.8. При приложении к р-і-п диоду прямого напряжения омическое сопротивление і-области ...

- а) уменьшается;
- б) увеличивается;
- в) не изменяется.

Верно: ?

1.1.9. В результате приложения к р-і-п диоду прямого напряжения возникающий в структуре прямой диффузионный ток  $I_{n1}$ :

- а) уменьшается;
- б) увеличивается;
- в) не изменяется;
- г) значительно возрастает;
- д) несущественно изменяется.

Верно: ?

1.1.10. При приложении к р-і-п диоду обратного напряжения происходит ...

- а) перенос носителей заряда из і-области в соседнюю р-область с протеканием ничтожно малого теплового тока через і-р-переход;
- б) перенос носителей заряда из і-области в соседнюю п-область с протеканием ничтожно малого теплового тока через і-п-переход;
- в) одновременная экстракция носителей заряда из і-области в обе соседние области, что приводит к уменьшению концентрации и протеканию через структуру небольшого теплового тока.

Верно: ?

1.1.11. При приложении к р-і-п диоду прямого напряжения величина сопротивления  $r_{np}$  полупроводниковой структуры...

- а) значительно возрастает;
- б) значительно уменьшается;

- в) незначительно уменьшается;
- г) незначительно возрастает.

Верно: ?

1.1.12. Диод с р-і-п структурой (по сравнению с диодной р-п структурой) ...

- а) обладает односторонней проводимостью электрического тока;
- б) не обладает односторонней проводимостью электрического тока;
- в) обладает нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ);
- г) не обладает нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ);
- д) обладает нелинейной зависимостью  $r_{np} \neq f(U)$  – вольт-омной характеристикой (ВОХ);
- е) не имеет нелинейной зависимости  $r_{обр} = f(U) - BOX$ ;
- ж) обладает явной нелинейной зависимостью  $C_b \neq f(U_{обр})$ ;
- з) практически не обладает сильной зависимостью  $C_b \neq f(U_{обр})$ .

Верно: ?

1.1.13. Барьерная емкость диода с р-і-п структурой образуется ...

- а) основными зарядами;
- б) неосновными зарядами;
- в) взаимодействием основных и неосновных зарядов;
- г) положительными ионами-донорами и отрицательными ионами-акцепторами («обкладки» конденсатора), разделенными достаточно широкой і-областью с большим сопротивлением (выполняющей роль изолятора).

Верно: ?

1.1.14. Барьерная емкость диода с р-і-п структурой,  $W_6 = 0,01 \dots 0,5$  мм, обладая большой толщиной і-области по сравнению с обычной р-п структурой, представляет ...

- а) меньшую емкость, практически не зависящую от приложенного напряжения;
- б) большую емкость с сильной зависимостью от приложенного напряжения.

Верно: ?

1.1.15. В диоде с р-і-п структурой наличие большой толщины ( $W_6 \sim 0,01 \dots 0,5$  мм) і-области при малой величине барьерной емкости позволяет эффективно работать в диапазоне см..мм длин волн ( $10^8 \dots 10^9$  Гц) при...

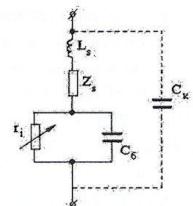
- а) повышенных значениях напряжения пробоя  $U_{проб}$ ;
- б) умеренных значениях напряжения пробоя;
- в) высоких уровнях СВЧ-мощности;

г) ограниченных уровнях мощности СВЧ-преобразований.

Верно: ?

1.1.16. Важнейшими особенностями СВЧ-диодов с р-i-п структурой, обеспечивающими более эффективную работу в переключательных режимах (по сравнению с ВЧ-диодами с р-п структурой), являются...

- а) большая величина  $\frac{I_{np}}{I_{обр}}$ ;
- б) меньшая величина  $\frac{I_{np}}{I_{обр}}$ ;
- в) большая величина  $\frac{r_{np}}{r_{обр}}$ ;
- г) меньшая величина  $\frac{r_{np}}{r_{обр}}$ ;
- д) большая величина  $C_{бар}$ ;
- е) меньшая величина  $C_{бар}$ ;
- ж) большая величина  $U_{проб}$ ;
- з) меньшая величина  $U_{проб}$ .



Верно: ?

1.1.17. На упрощенной эквивалентной схеме диода с р-i-п структурой указать смысл каждого элемента схемы...

- а)  $r_i = \frac{dU}{di} \sim n \cdot 1,0 \text{ Ом}$ ;
- б)  $C_6 = \frac{dQ}{dU} < C_k, C_6 \sim n \cdot 0,1 \text{ пФ}$ ;
- в)  $Z_s \sim (n \cdot 0,1 \dots n \cdot 1,0) \text{ Ом}$ ;
- г)  $L_k \sim 0,1 \text{ нГ}$ ;
- д)  $C_k \sim n \cdot 0,1 \text{ пФ}$ .

Верно: ?

1.1.18. Конструктивными особенностями СВЧ-диодов с р-i-п структурой, обеспечивающими эффективную работу на сверхвысоких частотах, являются...

- а) минимальные значения удельной барьерной емкости  $C_{бmin}$ ;
- б)  $C_b > C_{бmin}$ ;
- в) площадь диода  $S_{di} \leq 1 \text{ мм}^2$ ;
- г)  $S_d > S_{di}$ ;
- д) минимальные паразитные индуктивности  $L_{smin}$ ;
- е)  $L_s > L_{smin}$ ;
- ж) минимальные паразитные емкости корпуса  $C_{kmin}$ ;
- з)  $C_s > C_{kmin}$ ;

и) бескорпусные кристаллы;

к) активные кристаллы в корпусе;

л) применяемые материалы с min потерями  $\delta_{nmin}$ ;

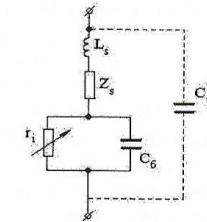
м)  $\delta_{потер} > \delta_{nmin}$ ;

н) коаксиальные.

Верно: ?

1.1.19. На упрощенной эквивалентной схеме диода с р-i-п структурой указать смысл каждого элемента схемы...

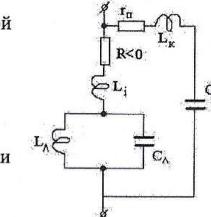
- а)  $R = -\frac{dU}{di} \sim n \cdot 1,0 \text{ Ом}$ ;
- б)  $C_A = \frac{dQ}{dU} < C_k, C_A \sim n \cdot 0,1 \text{ пФ}$ ;
- в)  $r_n \sim (n \cdot 0,1 \dots n \cdot 1,0) \text{ Ом}$ ;
- г)  $L_k \sim 0,1 \text{ нГ}$ ;
- д)  $C_k \sim n \cdot 0,1 \text{ пФ}$ ;
- е)  $L_i$ ;
- ж)  $L_A$ .



Верно: ?

1.1.20. Конструктивными особенностями СВЧ-диодов с р-i-п структурой, обеспечивающими эффективную работу на сверхвысоких частотах, являются...

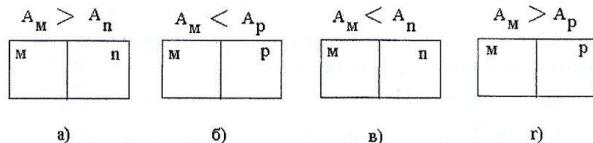
- а) минимальные значения удельной барьерной емкости  $C_{бmin}$ ;
- б)  $C_b > C_{бmin}$ ;
- в) площадь диода  $S_{di} \leq 1 \text{ мм}^2$ ;
- г)  $S_d > S_{di}$ ;
- д) минимальные паразитные индуктивности  $L_{min}$ ;
- е)  $L_k > L_{kmin}$ ;
- ж) минимальные паразитные емкости корпуса  $C_{kmin}$ ;
- з)  $C_s > C_{kmin}$ ;
- и) бескорпусные кристаллы;
- к) активные кристаллы в корпусе;
- л) применяемые материалы с min потерями  $\delta_{nmin}$ ;
- м)  $\delta_{потер} > \delta_{nmin}$ ;
- н) коаксиальные.



Верно: ?

## 1.2. Тестовые задания по диодам с барьером Шотки

1.2.1. Диод с барьером Шотки (ДБШ) представляет собой контакт металла-полупроводник с потенциальным барьером в приконтактной области полупроводника.



На схематических изображениях контактов металла-полупроводник укажите структуры ДБШ...

где  $A_m$  – работа выхода, которую необходимо затратить для преодоления кулоновских сил притяжения свободного электрона к атомам кристаллической решетки и удаление его из металла в вакуум вблизи поверхности металла;

$A_n, A_p$  – работу выхода, которую необходимо затратить для преодоления сил притяжения электрона (дырки) к соответствующим атомам кристаллической решетки и удаление электрона (дырки) из полупроводника в вакуум вблизи поверхности полупроводника;

$$A_m - A_n = \varphi_k = \text{ПБШ},$$

$$A_p - A_m = \varphi_k = \text{ПБШ}.$$

Верно: ?

1.2.2. В диоде с барьером Шотки, образованном контактом металла-полупроводник п-типа, потенциальный барьер в приконтактной области возникает в результате перехода...

- а) электронов из п-полупроводника в металл;
- б) электронов из металла в п-полупроводник.

Верно: ?

1.2.3. В диоде с барьером Шотки, образованном контактом металла-полупроводник п-типа, потенциальный барьер, созданный вблизи с металлом нескомпенсированными положительными ионами-донорами, представляет для основных носителей заряда – электронов полупроводника...

- а) тормозящее электрическое поле;
- б) ускоряющее электрическое поле.

Верно: ?

1.2.4. В диоде с барьером Шотки, образованном контактом металла-

полупроводник п-типа, в результате ухода свободных электронов в металл в полупроводнике образуется приконтактный слой...

- а) обедненный основными носителями заряда – свободными электронами;
- б) обогащенный основными носителями заряда – свободными электронами.

Верно: ?

1.2.5. В диоде с барьером Шотки, образованном контактом металла-полупроводник, в области пространственного заряда (ОПЗ) образуется запирающий слой, имеющий...

- а) высокое удельное сопротивление контакта металл-полупроводник;
- б) небольшое сопротивление на границе сред в ОПЗ.

Верно: ?

1.2.6. В ДБШ при приложении к металлу минус, а к полупроводнику – плюс внешнего напряжения, под действием электрического поля, созданного внешним источником, свободные электроны в полупроводнике смеются от приконтактного слоя...

- а) в сторону металла;
- б) в глубину полупроводника;
- в) ширина запирающего слоя уменьшается;
- г) ширина запирающего слоя увеличивается;
- д) сопротивление области контакт-металл-полупроводник уменьшается;
- е) сопротивление области контакт-металл-полупроводник увеличивается;
- ж) высота потенциального барьера уменьшается;
- з) высота потенциального барьера (запирающего электрического поля) существенно возрастает;
- и) такое включение контакта металл-полупроводник п-типа является прямым;
- к) включение контакта металл-полупроводник является обратным.

Верно: ?

1.2.7. При приложении к металлу плюс, а к полупроводнику п-типа – минус от внешнего источника напряжения (прямое включение диода с барьером Шотки) ширина запирающего слоя...

- а) уменьшается;
- б) увеличивается;
- высота потенциального барьера...

а) уменьшается, приконтактный слой обогащается основными носителями (электронами);

- б) увеличивается, ОПЗ обедняется основными носителями;  
величина сопротивления приконтактного слоя...

- а) уменьшается и обеспечивает прохождение тока в ДБШ;  
б) увеличивается и прекращает протекание тока.

Верно: ?

1.2.8. В случаях, когда в полупроводнике вблизи границы раздела металла и полупроводника образуется запирающий слой, контакт металл-полупроводник...

- а) обладает выпрямляющим свойством – односторонней проводимостью прямого электрического тока,  
б) не обладает выпрямляющим свойством – односторонней проводимостью электрического тока (основных электронов).

Верно: ?

1.2.9. Свойства контакта металла-полупроводник определяются типом электропроводности полупроводника и соответствием работ выхода из металла  $A_m$  и полупроводника  $A_n$ , ( $A_p$ ).

В контакте металла с полупроводником n-типа запирающий слой образуется при...

- а)  $A_m > A_n$ ;  
б)  $A_m < A_n$ .

В контакте металла с полупроводником p-типа запирающий слой образуется при...

- а)  $A_m > A_p$ ;  
б)  $A_m < A_p$ .

Верно: ?

1.2.10. В выпрямляющих контактах металла ( $A_m$ )-полупроводник n-типа ( $A_m > A_n$ ) (полупроводник p-типа ( $A_m < A_p$ )), т.е. в ДБШ, при прямом напряжении внешнего источника явление переноса носителей заряда из области, где они были основными, в область, где они становятся неосновными (явление инжекции)...

1. а) возникает в таких структурах контакта металла-полупроводник;  
б) отсутствует в таких контактах металла-полупроводник;
2. накопление основных носителей заряда в таких структурах металла-полупроводник...
  - а) имеет место образование диффузионной емкости;
  - б) имеет место отсутствие диффузионной емкости ( $C_D \approx 0$ );

3. инерционность таких структур (по сравнению с электронно-дырочными p-n переходами)...

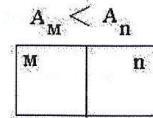
- а) значительно меньшая (на несколько порядков выше быстродействие);  
б) существенно большая (на несколько порядков меньше быстродействие);

1.2.11. Благодаря каким свойствам выпрямляющего контакта металл-полупроводник [выбрать из пунктов 1, 2, 3] применение диодов с барьером Шотки на сверхвысоких частотах намного эффективней по сравнению с высокочастотными диодами с p-n переходами.

Верно: ?

1.2.12. В контакте металл-полупроводник p-типа в приконтактном слое полупроводника концентрация основных носителей заряда...

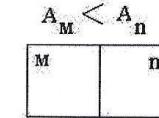
- а) увеличивается;  
б) уменьшается;  
в) возникает выпрямляющий эффект;  
г) отсутствует выпрямляющий эффект.



Верно: ?

1.2.13. В контакте металл-полупроводник n-типа на границе двух сред возникает...

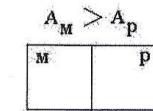
- а) обогащение основными носителями зарядов приконтактного слоя полупроводника;  
б) обеднение основными носителями зарядов приконтактного слоя полупроводника;  
в) в приконтактном слое полупроводника возникает потенциальный барьер;  
г) в приконтактном слое полупроводника отсутствует потенциальный барьер;  
д) отсутствует выпрямляющий эффект;  
е) присутствует выпрямляющий эффект.



Верно: ?

1.2.14. В контакте металл-полупроводник p-типа в приконтактном слое полупроводника концентрация основных носителей заряда...

- а) увеличивается – обогащение КОН;  
б) уменьшается – обеднение;



- в) возникает запирающий слой;
- г) отсутствует запирающий слой;
- д) возникает потенциальный барьер на границе двух сред;
- е) отсутствует потенциальный барьер на границе двух сред;
- ж) возникает выпрямляющий эффект;
- з) отсутствует выпрямляющий эффект.

Верно: ?

1.2.15. Электрические контакты металл-полупроводник, в которых отсутствуют запирающие слои (потенциальные барьеры), обладают...

- а) линейной вольт-амперной характеристикой;
- б) нелинейной вольт-амперной характеристикой;
- в) линейной вольт-омной характеристикой контакта;
- г) нелинейной вольт-омной характеристикой контакта.

Верно: ?

### 1.3. Тестовые задания по варикапам

1.3.1. Варикап – это полупроводниковый диод, принцип работы которого основан на использовании нелинейной функциональной зависимости ...

- а)  $C_b = f(U_{обр})$  ;
- б)  $r_{обр} = f(U_{обр})$  ;
- в )  $C_d = f(U_{обр})$  ;
- г)  $(C_b + C_d) = f(U_{обр})$ .

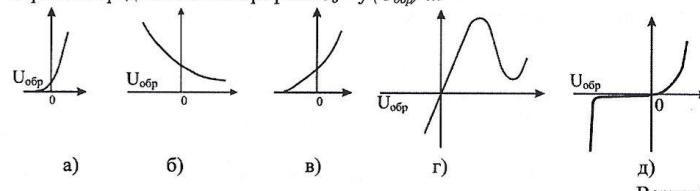
Верно: ?

1.3.2. Барьерная емкость в полупроводниковой структуре варикапа образуется в результате взаимодействия зарядов ...

- а) основных электронов и основных дырок ;
- б) неосновных электронов и неосновных дырок;
- в) ионов-акцепторов и ионов-доноров.

Верно: ?

1.3.3. Зависимость электрически управляемой нелинейной емкости варикапа представлена на графике  $C_b = f(U_{обр})$  ...



Верно: ?

1.3.4. Величина барьерной емкости  $C_b$  зависит от приложенного к р-п-переходу электрического обратного напряжения  $U_{обр}$ . При увеличении  $|U_{обр}|$  величина  $C_b$  ...

- а) увеличивается;
- б) уменьшается;
- в) остается неизменной.

Верно: ?

1.3.5. Величина барьерной емкости  $C_b$  зависит от концентрации акцепторной  $N_A$  и донорной примесей, которыми легирован р-п-переход.

При увеличении концентрации примесей  $N_A$ ,  $N_d$ , содержащихся в р-п-переходе, величина барьерной емкости  $C_b$  ...

- а) уменьшается ;

- б) увеличивается;  
в) не изменяется.

Верно: ?

При уменьшении концентрации примесей  $N_A$ ,  $N_D$ , содержащихся в р-п-переходе, величина барьерной емкости  $C_b$  ...

- а) увеличивается;  
б) не изменяется;  
в) уменьшается.

Верно: ?

1.3.6. Принципиальные свойства варикапа определяются статической характеристикой р-п-перехода ...

- а) вольт-омной;  
б) вольт-фарадной;  
в) вольт-амперной.

Верно: ?

1.3.7. При приложении переменного напряжения к р-п-переходу дифференциальная барьерная емкость  $C_b$  определяется отношением изменений зарядов  $dQ$  к изменению напряжений  $dU$ , вызвавшего его;  $dQ$  – представляет изменение зарядов ...

- а) основных носителей (подвижных);  
б) неосновных носителей (подвижных);  
в) ионов-акцепторов и ионов-доноров (неподвижных).

Верно: ?

1.3.8. Одной из разновидностей варикапа является варактор, который также представляет полупроводниковый диод с нелинейной электрически управляемой емкостью, но отличающийся от варикапа...

- а) величиной емкости р-п-перехода: ( $n \cdot 0,1 \dots n \cdot 10$ ) пФ;  
б) режимом работы  $U_{обр}$ ,  $U=0$ ,  $U_{обр}^B$ ;  
в) рабочим диапазоном частот (КВ, УКВ, СВЧ);  
г) основным применением:

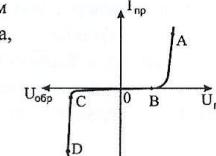
- 1) автоматической подстройкой частоты колебательных контуров,  
2) параметрическим преобразованием СВЧ сигналов,  
3) умножением частоты в широком диапазоне частот.

## 2. Лавинно-пролетные диоды

### 2.1. Тестовые задания по лавинно-пролетным диодам

2.1.1. Рабочая область ВАХ лавинно-пролетного диода, в которой может быть обеспечена в схемах с его применением генерация (усиление) лавинно-пролетного диода, ограничена участком ...

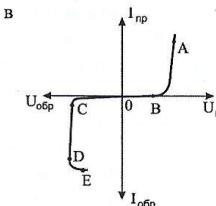
- а) АВ;  
б) В0;  
в) 0С;  
г) СD;  
д) DE.



Верно: ?

2.1.2. Рабочая точка в режиме генерации лавинно-пролетного диода находится на вольт-амперной характеристике в пределах участка ...

- а) АВ;  
б) В0;  
в) 0С;  
г) СD;  
д) DE.



Верно: ?

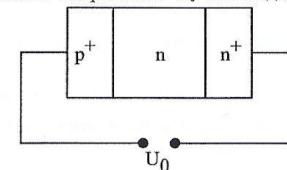
2.1.3. Рабочие точки в лавинно-пролетном диоде определяются движением ...

- а) основных носителей заряда;  
б) неосновных носителей заряда;  
в) основных и неосновных носителей;  
г) ионами примесей.

Верно: ?

2.1.4. К полупроводниковой структуре лавинно-пролетного диода в статическом режиме от источника постоянного напряжения  $U_0$  необходимо приложить ...

- к области  $p^+$**   
а) положительный потенциал;  
б) отрицательный потенциал;  
**к области  $n^+$**



- а) положительный потенциал;  
б) отрицательный потенциал.

Верно: ?

2.1.5. Для изготовления структур лавинно-пролетных диодов используют, в основном, полупроводниковые материалы ...

- а) GaAs;  
б) AlGaAs / GaAs;  
в) InGaAs / InP;  
г) Si.

Верно: ?

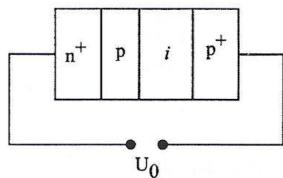
2.1.6. На статической вольт-амперной характеристике лавинно-пролетного диода рабочая точка находится в области ...

- а) инжекции;  
б) экстракции;  
в) в начале координат.

Верно: ?

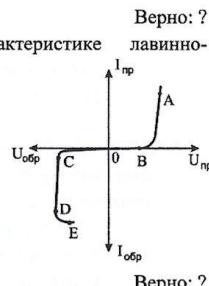
2.1.7. К полупроводниковой структуре лавинно-пролетного диода в статическом режиме от источника постоянного напряжения  $U_0$  необходимо приложить ...

- к области  $n^+$   
а) положительный потенциал;  
б) отрицательный потенциал;  
к области  $p^+$   
а) положительный потенциал;  
б) отрицательный потенциал;



2.1.8. На статической вольт-амперной характеристике лавинно-пролетного диода участок CD характеризуется ...

- а) явлением обратимого пробоя;  
б) явлением необратимого пробоя;  
в) отсутствием явления пробоя.

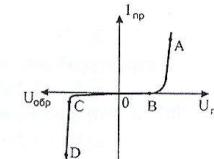


Верно: ?

2.1.9. На статической ВАХ кремниевого ЛПД наиболее опасным для

прибора является участок ...

- а) AB;  
б) BO ;  
в) OC ;  
г) CD ;  
д) DE.



Верно: ?

2.1.10. Отрицательная динамическая проводимость лавинно-пролетного диода возникает (наблюдается) в ...

- а) статическом режиме ;  
б) квазистатическом режиме ;  
в) электростатическом режиме ;  
г) динамическом режиме ;  
д) электродинамическом режиме.

Верно: ?

2.1.11. В различных полупроводниковых структурах лавинно-пролетных диодов распределение напряженности электрического поля зависит (определяется) от совокупности двух факторов ...

- а) протяженности структуры ;  
б) попечного сечения структуры ;  
в) концентрации примесей ;  
г) подвижности носителей ;  
д) сопротивления областей ;  
е) скорости носителей.

Верно: ?

2.1.12. В различных полупроводниковых структурах лавинно-пролетных диодов две особенности являются общими ...

- а) равномерное распределение напряженности электрического поля в областях с различным типом электропроводности и на их электронно-дырочных переходах;  
б) неравномерное распределение напряженности электрического поля вдоль структуры лавинно-пролетного диода;  
в) наличие треугольного распределения электрического поля внутри электронно-дырочного перехода;  
г) значительное время пролета носителей через область дрейфа.

Верно: ?

2.1.13. Для лавинно-пролетного диода с арсенид-галлиевой структурой величина пороговой напряженности электрического поля  $E_p$  ...

- а)  $E_p > 3,2 \text{ кВ/см}$ ;
- б)  $E_p < 3,2 \text{ кВ/см}$ ;
- в)  $E_p = 3,2 \text{ кВ/см}$ .

Верно: ?

2.1.14. В лавинно-пролетном диоде для возникновения отрицательной динамической проводимости необходимым и достаточным условием является совокупность двух факторов ...

- а) наличие обратного напряжения;
- б) наличие обратного тока (лавинного);
- в) напряжение пробоя;
- г) наличие наведенного тока;
- д) инерционность в развитии процесса лавинного размножения носителей заряда;
- е) запаздывание возникновения наведенного тока относительно тока носителей.

Верно: ?

2.1.15. Основой принципа действия лавинно-пролетного диода является наличие отрицательного дифференциального сопротивления  $R_i < 0$ , возникновение которого обусловлено двумя физическими процессами ...

- а) ударная ионизация атомов кристаллической решетки полупроводника (при  $E \geq 10^5 \text{ В/см}$ ), вызывающая лавинное размножение носителей заряда;
- б) возбуждение акустических колебаний кристаллической решетки (при  $E < 10^3 \text{ В/см}$ );
- в) пролетный эффект носителей заряда в области дрейфа, приводящий к возникновению наведенного тока во внешней цепи;
- г) лавинное размножение носителей заряда при необратимом пробое;
- д) туннельный пробой при напряженности электрического поля  $E \geq 10^6 \text{ В/см}$ .

### 3. Диод Ганна

#### 3.1. Тестовые задания по диодам Ганна

3.1.1. Эффект Ганна наблюдается в полупроводниках GaAs, InP с электропроводностью ...

- а) i-типа (собственной);
- б) n-типа (донорной);
- в) p-типа (акцепторной).

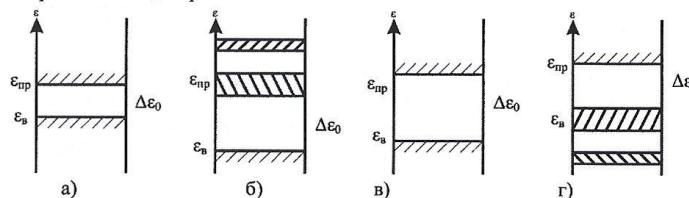
Верно: ?

3.1.2. Ширина запрещенной зоны  $\Delta\epsilon_0$  арсенид-галлиевого полупроводника n-типа составляет величину ...

- а)  $\Delta\epsilon_0 \approx 0,7 \text{ эВ}$ ;
- б)  $\Delta\epsilon_0 \approx 1,1 \text{ эВ}$ ;
- в)  $\Delta\epsilon_0 \approx 1,4 \text{ эВ}$ .

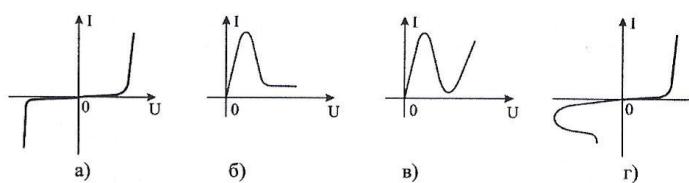
Верно: ?

3.1.3. Диоды с междолинным переходом электронов представлены зоной энергетической диаграммы ...



Верно: ?

3.1.4. Вольт-амперная характеристика диода Ганна (в бездоменном режиме) соответствует графику ...



Верно: ?

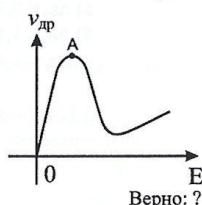
3.1.5. Диод Ганна представляет собой полупроводниковый кристалл...

- а) собственной (беспримесной) электропроводности;
- б) примесной (за счет элементов III гр. системы Д.И. Менделеева);
- в) примесной (за счет элементов V гр. системы Д.И. Менделеева);
- г) преимущественно однородный;
- д) преимущественно неоднородный;
- е) слабо легированный примесями;
- ж) сильно легированный примесями.

Верно: ?

3.1.6. На участке 0A графика функциональной зависимости  $v_{dp} = f(E)$  диода Ганна дрейфовая скорость «легких» электронов нижней долины  $v_{dp1}$  по сравнению со скоростью «тяжелых» электронов верхней долины  $v_{dp2}$  оказывается ...

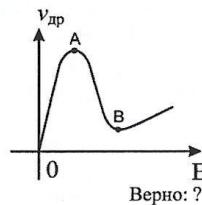
- а)  $v_{dp1} > v_{dp2}$ ;
- б)  $v_{dp1} < v_{dp2}$ ;
- в)  $v_{dp1} >> v_{dp2}$ ;
- г)  $v_{dp1} \ll v_{dp2}$ ;
- д)  $v_{dp1} = v_{dp2}$ .



Верно: ?

3.1.7. На участке АВ графика функциональной зависимости  $v_{dp} = f(E)$  диода Ганна дрейфовая скорость «легких» электронов нижней долины  $v_{dp1}$  по сравнению со скоростью «тяжелых» электронов верхней долины  $v_{dp2}$  оказывается ...

- а)  $v_{dp1} > v_{dp2}$ ;
- б)  $v_{dp1} < v_{dp2}$ ;
- в)  $v_{dp1} = v_{dp2}$ .

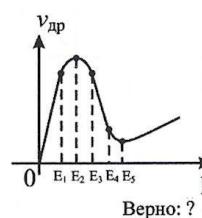


Верно: ?

3.1.8. На графике поле-скоростная характеристика диода Ганна пороговая напряженность электрического поля  $E_n$  соответствует ...

- а)  $E_1$ ;
- б)  $E_2$ ;
- в)  $E_3$ ;
- г)  $E_4$ ;
- д)  $E_5$ ,

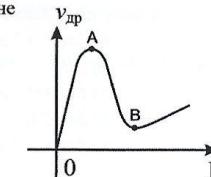
где  $E_1, E_2, E_3, E_4, E_5$  - напряженность внешнего электрического поля.



Верно: ?

3.1.9. На участке АВ графика функциональной зависимости  $v_{dp} = f(E)$  диода Ганна подвижность электронов в верхней долине  $\mu_2$  соответствует ...

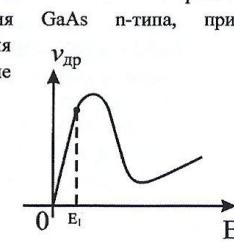
- а)  $\mu_2 > 0$ ;
- б)  $\mu_2 < 0$ ;
- в)  $\mu_2 = 0$ ;
- г)  $\mu_2 > \mu_1$ ;
- д)  $\mu_2 < \mu_1$ .



Верно: ?

3.1.10. В кристалле арсенида галлия напряженности внешнего электрического поля  $0 < E < E_1$ , концентрации электронов в нижней долине  $n_1(E)$  и в верхней долине  $n_2(E)$  соответствуют ...

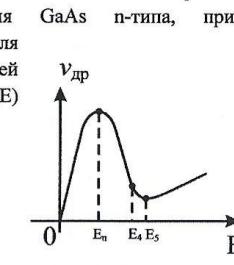
- а)  $n_1(E) > n_2(E)$ ;
- б)  $n_1(E) \gg n_2(E)$ ;
- в)  $n_1(E) < n_2(E)$ ;
- г)  $n_1(E) \ll n_2(E)$ ;
- д)  $n_1(E) = n_2(E)$ .



Верно: ?

3.1.11. В кристалле арсенида галлия напряженности внешнего электрического поля  $E_n < E_4 < E_5$ , концентрации электронов в нижней долине  $n_1(E)$  и в верхней долине  $n_2(E)$  соответствуют ...

- а)  $n_1(E) > n_2(E)$ ;
- б)  $n_1(E) = n_2(E)$ ;
- в)  $n_1(E) = 0$ ;
- г)  $n_2(E) = 0$ ;
- д)  $n_2(E) > n_1(E)$ .



Верно: ?

3.1.12. Для арсенид-галлиевого диода интенсивный междолинный переход электронов начинается при воздействии внешнего электрического поля, напряженность которого  $E$  достигает значения ...

- а)  $E_n < 3$  кВ/см;
- б)  $E_n = 3,2$  кВ/см;
- в)  $E_n > 4$  кВ/см.

Верно: ?

3.1.13. Ширина запрещенной зоны  $\Delta\epsilon_0$  в полупроводнике GaAs принимает значение ...

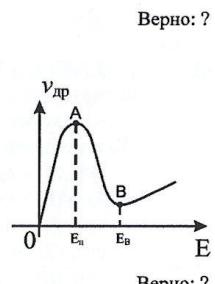
- а)  $\Delta\epsilon_0 \geq 0,7$  эВ;
- б)  $\Delta\epsilon_0 \geq 1,1$  эВ;
- в)  $\Delta\epsilon_0 \leq 0,7$  эВ;
- г)  $\Delta\epsilon_0 \leq 1,1$  эВ;
- д)  $\Delta\epsilon_0 = 1,4$  эВ.

3.1.14. На участке АВ характеристики скорость ( $V_{dr}$ ) — напряженность поля ( $E$ ) диода Ганна подвижность «тяжелых» электронов  $\mu_2$  в верхней долине принимает значение ...

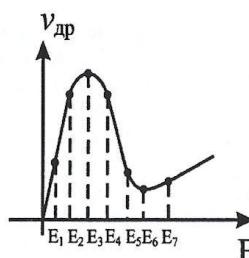
- а)  $\mu_2 > 0$ ;
- б)  $\mu_2 < 0$ ;
- в)  $\mu_2 = 0$ ;
- г)  $\mu_2 < \mu_1$ .

3.1.15. Отрицательная дифференциальная подвижность в диоде Ганна возникает при превращении напряженности электрического поля  $E$  ...

- а)  $E > E_1$ ;
- б)  $E > E_2$ ;
- в)  $E > E_3$ ;
- г)  $E > E_4$ ;
- д)  $E > E_5$ ;
- е)  $E > E_6$ ;
- ж)  $E > E_7$ .



Верно: ?



Верно: ?

#### 4. Биполярные СВЧ транзисторы

4.1. Тестовые задания по биполярным СВЧ транзисторам

4.1.1. Возможность использования низкочастотных транзисторов в СВЧ диапазоне ограничена следующими физическими факторами:

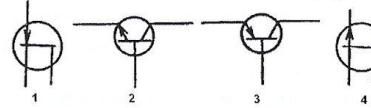
- а) временем переноса носителей заряда;
- б) углом вылета носителей заряда из области базы;
- в) скоростью изменения накопленного заряда;
- г) конструкцией выводов электродов и соответствующих им паразитных емкостей и индуктивностей;
- д) схемой включения и соответствующих ей паразитных емкостей и индуктивностей.

Верно: ?

К основным факторам, определяющим быстродействие биполярного транзистора, следует отнести, во-первых, время пролета электронов, инжектированных из эмиттера, через базовую область, и через обедненный слой коллекторного перехода; во-вторых, время перезаряда емкости эмиттерного перехода - время задержки сигнала при передаче с выводов транзистора непосредственно на переход эмиттер-база.

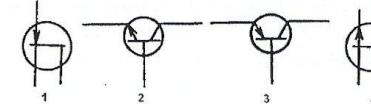
Поскольку увеличение легирования / области базы ограничено необходимостью обеспечения высокой эффективности эмиттера, а площадь эмиттерного перехода - допустимым током эмиттера, то основным варьируемым параметром, определяющим быстродействие транзистора, является толщина базы.

4.1.2. Укажите условное обозначение в схемах транзистора типа  $p-n-p$ .



Верно: ?

4.1.3. Укажите условное обозначение в схемах транзистора типа  $n-p-n$ .



Верно: ?

4.1.4. Для использования в СВЧ диапазоне наиболее эффективным является использование транзисторных структур типа:

- а)  $p-n-p$ , поскольку дырки не влияют на задержку при усилении сигнала;  
 б)  $n-p-n$ , поскольку подвижность электронов выше, чем дырок, что позволяет увеличить быстродействие;  
 в)  $p-i-p$ , поскольку собственный полупроводник имеет меньшие потери, что позволяет снизить коэффициент шума;  
 г)  $p^+-n-p$ , поскольку высокая концентрация дырок позволяет увеличить выходную мощность;  
 д)  $n-i-n^+$ , поскольку сочетание собственного полупроводника и высокой концентрации электронов позволяет расширить рабочий диапазон частот.

Верно: ?

4.1.5. Сверхтонкая база биполярного СВЧ транзистора (десятые доли микрометра) обеспечивает:

- а) увеличение выходной мощности;  
 б) уменьшение времени переноса носителей заряда;  
 в) увеличение обратного напряжения коллекторного перехода;  
 г) увеличение коэффициента усиления;  
 д) уменьшение коэффициента шума.

Верно: ?

4.1.6. Наличие сверхтонкой базы в биполярном СВЧ транзисторе приводит, с одной стороны, к увеличению поперечного сопротивления базовой области и росту времени перезарядки емкости эмиттерного перехода, а с другой стороны – к уменьшению времени пролета электронов в базовой области. Это техническое противоречие решается:

- а) использованием структуры с диффузионным переносом в область базы;  
 б) использованием структуры с диффузией из эмиттера в коллектор;  
 в) использованием структуры с дрейфовым переносом в область базы;  
 г) использованием структуры с дрейфовым переносом из коллектора в эмиттер;  
 д) использованием структуры с гетеропереходом.

Верно: ?

Уменьшить время пролета базы транзистора без увеличения поперечного сопротивления базовой области полупроводника можно за счет неоднородного легирования этой области (рис. 4.1).

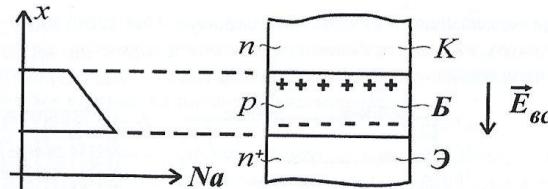


Рис. 4.1

Концентрация акцепторной примеси около эмиттера выше, чем около коллектора. Из-за диффузии свободных дырок в базе к коллекторному переходу, в базе возникает «встроенное» электрическое поле  $\vec{E}_{sc}$ , обеспечивающее ускоренный дрейф электронов и уменьшающее время пролета базы. Так повышается быстродействие транзистора.

4.1.7. Дрейфовая скорость насыщения, кроме напряженности «встроенного» электрического поля, определяется также подвижностью свободных носителей в материале, из которого изготовлен транзистор. С этой точки зрения наиболее перспективным материалом является:

- а) кремний Si;  
 б) германий Ge;  
 в) арсенид галлия GaAs;  
 г) сплав Ge-Si;  
 д) сплав Au-Ge.

Верно: ?

4.1.8. Эффект вытеснения (сжатия) тока эмиттера в биполярных СВЧ транзисторах вызван:

- а) наличием сосредоточенного сопротивления в цепи эмиттера;  
 б) отсутствием нагрузочного сопротивления в цепи коллектора;  
 в) увеличением емкости эмиттерного перехода;  
 г) наличием распределенного поперечного сопротивления базовой области;  
 д) уменьшением индуктивности коллекторного перехода.

Верно: ?

Для обеспечения более однородного распределения тока эмиттерный и базовый электроды выполняют в форме гребенок (рис. 4.2). Для повышения коэффициента усиления по току  $\beta$  в схеме с общим эмиттером, ток эмиттера должен определяться потоком электронов, инжектированных в базу, и иметь как

можно меньшую дырочную составляющую. Это повышение эффективности эмиттера достигается более сильным легированием (на несколько порядков) эмиттерной области по сравнению с базовой областью полупроводника.

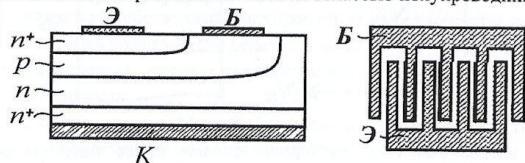


Рис. 4.2

4.1.9. Особенностью гетероструктурного биполярного СВЧ транзистора является:

- использование полупроводника с узкой запрещенной зоной для области базы;
- использование широкозонного полупроводника для области эмиттера;
- использование собственного полупроводника для области коллектора;
- использование узкозонных полупроводников для областей эмиттера и базы;
- использование широкозонного полупроводника для областей базы и коллектора.

Верно: ?

Зонная диаграмма гетероструктурного биполярного СВЧ транзистора с эмиттерной областью из широкозонного полупроводника, например из GaAlAs при базе из GaAs, показана на рис. 4.3. Пунктиром показана зонная диаграмма обычного биполярного транзистора из GaAs. Энергетический барьер для дырок, движущихся из базы в эмиттер, увеличивается, дырочный ток резко уменьшается. Таким образом, эффективность эмиттера остается большой даже при сильном легировании базовой области полупроводника.

Острый выступ дна зоны проводимости соответствует сильному импульсному разгону электронов, инжектированных из эмиттера в базу. Это приводит к уменьшению времени пролета базы и дополнительно повышает быстродействие.

4.1.10. Варионные биполярные транзисторы СВЧ позволяют уменьшить время пролета базы электронами, инжектированными из эмиттера. Вариация ширины запрещенной зоны при этом обеспечивается:

- резким изменением скорости электронов, пролетающих запрещенную зону;

- плавным изменением угла пролета электронов в запрещенной зоне;
- резким изменением собственной проводимости полупроводника;
- резким изменением примесной проводимости полупроводника;
- плавным изменением состава полупроводника.

Верно: ?

Вариация ширины запрещенной зоны в полупроводнике, например, в структуре  $Ga(1-x)Al_xAs$  при изменении  $X$ , представлена на зонной диаграмме (рис. 4.4). Ширина запрещенной зоны уменьшается в направлении от эмиттера к коллектору.

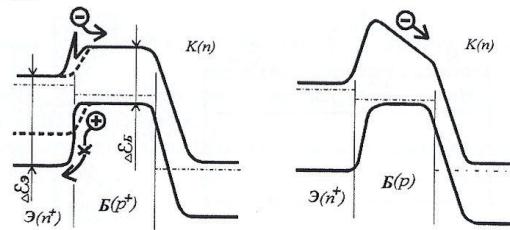


Рис. 4.3

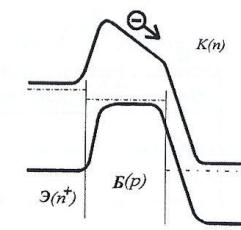


Рис. 4.4

Наклон дна зоны проводимости в базе обуславливает ускорение электронов при пролете базы, значительно превосходящее ускорение в дрейфовых биполярных СВЧ транзисторах. Таким образом, уменьшается время пролета электронами базовой области и повышается быстродействие транзистора.

## 5. Полевые СВЧ транзисторы

### 5.1. Тестовые задания по полевым транзисторам с барьером Шотки

В диапазонах СВЧ и КВЧ наиболее перспективными для использования являются полевые транзисторы с барьером Шотки (ПТШ) из n-GaAs. Это объясняется тем, что арсенид галлия обладает высокой подвижностью электронов. Кроме того, простота технологии изготовления барьера Шотки позволяет обеспечить улучшенный теплоотвод и минимальные размеры вывода затвора. Структура ПТШ показана на рис. 5.1.

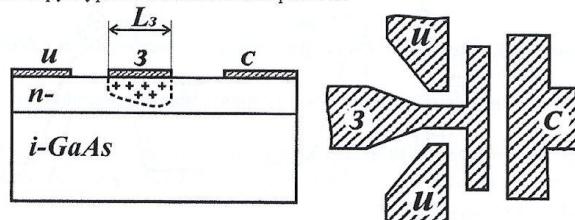


Рис. 5.1

5.1.1. Для уменьшения времени пролета электронов под выводом затвора следует:

- а) увеличивать толщину подложки транзистора;
- б) уменьшать горизонтальный размер транзистора – длину затвора  $L_3$ ;
- в) увеличивать толщину проводников, образующих выводы транзистора;
- г) повышать подвижность электронов в активном слое;
- д) снижать концентрацию электронов под выводом затвора.

Верно: ?

5.1.2. В качестве затвора ПТШ используется обратное смещение контакта металл-полупроводник, называемого барьером Шотки и имеющего выпрямляющие свойства. Для изготовления затвора применяются многослойные системы:

- а) Ti-Pt-Au;
- б) GaAs-Si;
- в) Ge-Ti;
- г) Al-Ge;
- д) Cr-Ni-Au.

Верно: ?

5.1.3. Для формирования контактов истока и стока ПТШ используются невыпрямляющие комбинации металла с полупроводником, называемые омическими контактами и имеющие линейную вольт-амперную характеристику. В этом случае применяются соединения:

- а) Au-Te;
- б) Au-Te-Ge;
- в) Ge-Ti;
- г) Au-Ge;
- д) Ti-Pt-Au.

Верно: ?

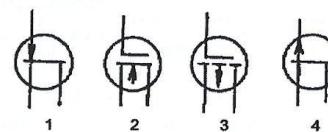
5.1.4. Для уменьшения времени перезаряда емкости барьера Шотки следует:

- а) снижать концентрацию электронов под выводом затвора, используя собственный полупроводник;
- б) повышать сопротивление барьера Шотки, увеличивая толщину подложки;
- в) снижать емкость барьера Шотки, уменьшая длину затвора  $L_3$ ;
- г) повышать индуктивность барьера Шотки, увеличивая длину затвора  $L_3$ ;
- д) увеличивать проводимость активного слоя, повышая концентрацию свободных электронов.

Верно: ?

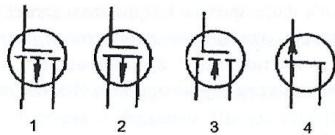
Быстродействие ПТШ определяется временем пролета электронов под затвором и временем перезарядки емкости барьера Шотки – временем задержки сигнала при передаче с выводов транзистора непосредственно на управляющий барьер Шотки.

5.1.5. Укажите условное обозначение в схемах транзистора с управляющим переходом с n-каналом.



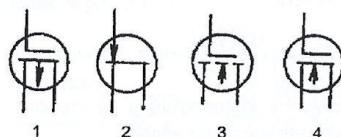
Верно: ?

5.1.6. Укажите условное обозначение в схемах транзистора с изолированным затвором обогащенного типа с p-каналом (с индуцированным каналом).



Верно: ?

5.1.7. Укажите условное обозначение в схемах транзистора с изолированным затвором обедненного типа с *n*-каналом (с встроенным каналом).



Верно: ?

5.1.8. Для повышения крутизны характеристики ППШ  $g = \partial I_C / \partial U_{ZH}$  следует:

- а) повышать концентрацию донорной примеси в активном слое;
- б) повышать концентрацию акцепторной примеси в активном слое;
- в) снижать концентрацию донорной примеси в активном слое;
- г) повышать подвижность электронов в активном слое;
- д) снижать концентрацию акцепторной примеси в активном слое.

Верно: ?

5.1.9. Эффективность ППШ определяется произведением:

- а) выходной мощности на КПД;
- б) выходной мощности на квадрат частоты;
- в) КПД на квадрат коэффициента усиления;
- г) КПД на коэффициент шума;
- д) коэффициента усиления на частоту.

Верно: ?

Для улучшения характеристик и параметров ППШ требуется обеспечивать:

- минимальную длину затвора  $L_3$ , что обеспечивается современной технологией и составляет доли микрометра;
- высокую подвижность электронов, что достигается поиском и совершенствованием полупроводниковых материалов, а также может быть дополнительно повышена охлаждением полупроводника;

– увеличение проводимости активного слоя путем повышения концентрации донорной примеси, что находится в противоречии с требованием высокой подвижности: чем больше концентрация донорной примеси, тем больше нарушений кристаллической решетки полупроводника, следовательно, меньше подвижность электронов.

Применение гетероперехода в полевых транзисторах разрешает техническое противоречие между повышением проводимости активного слоя и повышением подвижности электронов в нем. В настоящее время широко применяются гетероструктурные полевые транзисторы, называемые:

- полевыми транзисторами с высокой подвижностью электронов (HEMT),
- полевыми транзисторами с модулированным легированием (MODFET),
- полевыми транзисторами с двумерным электронным газом (TEGFET),
- селективно-легированными гетеропереходными транзисторами (SDHT).

5.1.10. Преимуществами гетероструктурных полевых транзисторов по сравнению с обычными ППШ являются:

- а) возможность повышения концентрации примеси в канале;
- б) возможность улучшенного охлаждения структуры кристалла;
- в) возможность снижения потерь на излучение;
- г) возможность расширения рабочего диапазона частот;
- д) возможность снижения коэффициента шума.

Верно: ?

Структура и зонная диаграмма гетероструктурного полевого транзистора представлена на рис. 5.2.

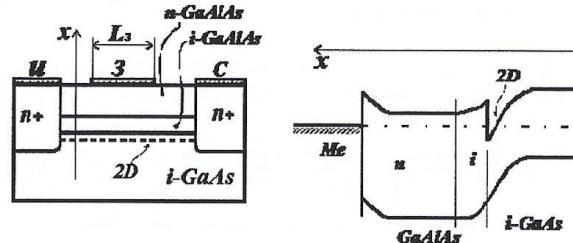


Рис. 5.2

5.1.11. При работе гетероструктурного полевого транзистора электроны из легированной области широкозонного полупроводника *n*-GaAlAs

переходят в очень тонкий слой 2D (рис. 5.2) у поверхности чистого полуизолирующего GaAs и образуют так называемый двумерный электронный газ с высокой концентрацией свободных электронов. Электроны в этом газе могут:

- а) свободно двигаться только в плоскости перехода;
- б) свободно колебаться перпендикулярно плоскости перехода;
- в) свободно двигаться только перпендикулярно плоскости перехода;
- г) свободно двигаться в любом направлении;
- д) свободно колебаться в плоскости перехода.

Верно: ?

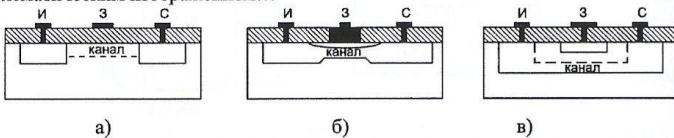
5.1.12. Тонкий слой собственного полупроводника i-GaAlAs (рис. 5.2) используется в гетероструктурном полевом транзисторе для:

- а) предотвращения образования объемного заряда в 2D-слое;
- б) обеспечения требуемого сопротивления 2D-слоя;
- в) предотвращения рассеяния электронов двумерного газа в 2D-слое;
- г) предотвращения увеличения скорости электронов двумерного газа в 2D-слое;
- д) обеспечения улучшенного теплоотвода от 2D-слоя.

Верно: ?

При изменении напряжения на затворе гетероструктурного полевого транзистора изменяется ширина обедненного слоя под барьером Шотки, меняя количество электронов, переходящих из n-GaAlAs в слой 2D (рис. 5.2). Следовательно, изменяется концентрация электронов в треугольной потенциальной яме 2D, вызывая изменение тока стока при наличии напряжения сток-исток. Этот процесс называется модуляцией легирования приповерхностного слоя полуизолирующего GaAs.

5.1.13. Полевой транзистор на основе GaAs, имеющий затвор в виде барьера Шотки – контакт металл-полупроводник (ПТШ), представлен схематическим изображением...



Верно: ?

5.1.14. В полевом транзисторе с барьером Шотки принцип

управления выходным током стока (схема ОИ) основан на модуляции толщины проводящего канала между истоком и стоком путем изменения ширины ОПЗ полупроводника, которое осуществляется ...

- а) изменением входной мощности;
- б) изменением входного тока;
- в) изменением напряжения, приложенного к затвору.

Верно: ?

5.1.15. В полевом транзисторе с барьером Шотки контакт металл-полупроводник омический (невыпрямляющий), используемый для metallизации и образования истока и стока, формируется в зависимости от типа электропроводности полупроводника путем подбора металла с необходимой работой выхода  $A_m$ .

Для создания омического контакта (небольшое сопротивление, отсутствие инжекции неосновных носителей, линейная ВАХ) металл-полупроводник p-типа необходимо подобрать соотношение работы выхода металла  $A_m$  и проводника  $A_n$  ...

- а)  $A_m < A_n$  ;
- б)  $A_m > A_n$  ;
- в)  $A_m = A_n$  ;
- г)  $A_m \gg A_n$  .

Верно: ?

5.1.16. В полевом транзисторе с барьером Шотки омический (nevypyramlyayushchiy) kontakt metal-polyuprovodnik, используемый для metallизации и образования истока и стока, формируется в зависимости от типа электропроводности полупроводника путем подбора металла с необходимой работой выхода  $A_m$ .

Для создания омического контакта (небольшое сопротивление, отсутствие инжекции неосновных носителей, линейная ВАХ) металл-полупроводник p-типа необходимо подобрать соотношение работы выхода металла  $A_m$  и проводника  $A_n$  ...

- а)  $A_m > A_n$  ;
- б)  $A_m = A_n$  ;
- в)  $A_m < A_n$  ;
- г)  $A_m \ll A_n$  .

Верно: ?

5.1.17. В полевом транзисторе с барьером Шотки для получения омических контактов с меньшей величиной сопротивления и более линейной

BAX областей исток и сток в полупроводнике n-типа целесообразно ...

- a) увеличение концентрации легирующей примеси в полупроводнике;
- b) уменьшение концентрации легирующей примеси в полупроводнике.

Верно: ?

5.1.18. В полевом транзисторе с барьером Шотки для получения омических контактов с меньшей величиной сопротивления и более линейной BAX областей исток и сток в полупроводнике p-типа целесообразно ...

- a) увеличение концентрации легирующей примеси в полупроводнике;
- b) уменьшение концентрации легирующей примеси в полупроводнике.

Верно: ?

5.1.19. В полевом транзисторе с барьером Шотки для получения выпрямляющего контакта металл-полупроводник n-типа (диод Шотки) с нелинейной BAX необходимо обеспечить соотношение работы выхода металла  $A_m$  по отношению к работе выхода полупроводника  $A_n$  следующим неравенством ...

- a)  $A_m > A_n$  ;
- b)  $A_m < A_n$  ;
- c)  $A_m \ll A_n$  ;
- d)  $A_m = A_n$  .

Верно: ?

5.1.20. В полевом транзисторе с барьером Шотки для получения выпрямляющего контакта металл-полупроводник p-типа (диод Шотки) с нелинейной BAX необходимо обеспечить соотношение работы выхода металла  $A_m$  по отношению к работе выхода полупроводника  $A_n$  следующим неравенством

- a)  $A_m < A_n$  ;
- b)  $A_m > A_n$  ;
- c)  $A_m \gg A_n$  ;
- d)  $A_m = A_n$  .

Верно: ?

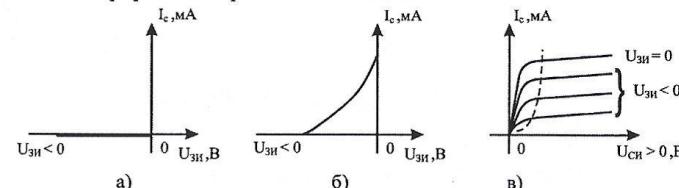
5.1.21. В некоторых полевых транзисторах, изготовленных на основе кремния (Si), в качестве управляющего электрода используется p-n-переход. Полевые транзисторы на основе арсенида галлия (GaAs) могут иметь затворы типа p-n-перехода и затворы на основе барьера Шотки контакт металл-полупроводник. Однако для работы на сверхвысоких частотах, главным образом, предпочтение отдается полевым транзисторам с барьером Шотки на основе арсенида галлия (GaAs).

Приборы с барьером Шотки (ПТШ) по сравнению с p-n-переходами имеют следующие принципиальные преимущества ...

- a) подвижность свободных носителей в GaAs, больше, чем в Si;
- b) подвижность свободных носителей в GaAs, меньше, чем в Si;
- c) ПТШ, изготовленные на основе GaAs, обладают более высоким быстродействием, чем кремниевые;
- d) ПТШ, изготовленные на основе GaAs, обладают меньшим быстродействием, чем кремниевые;
- e) материал GaAs по сравнению с Si обеспечивает изготовление подложки с невысоким удельным сопротивлением;
- f) полупроводники GaAs n-типа в отличие от большинства других полупроводников (в том числе Si) обладает междолинным переносом электронов в зоне проводимости, что обуславливает объемную неустойчивость заряда (эффект Ганна), на основе которой возможно создание СВЧ-генераторов.

Верно: ?

5.1.22. Передаточной характеристикой полевого транзистора называются графически выраженные зависимости ...



Верно: ?

5.1.23. Эффективность управления током стока в полевом транзисторе оценивается параметрами ...

- a) — , б) — , г) — .

Верно: ?

5.1.24. Как называется напряжение на затворе  $U_{zi}=U_{zi}$  отс., при котором ток стока в полевом транзисторе достигает значения ...

- a)  $I_c = 0$  , б)  $I_c > 0$  , в)  $I_c \gg 0$  , г)  $I_c < 0$  есть  $U_{zi}$  отсечки,

Верно: ?

5.1.25. Эффективность влияния напряжения сток-исток на ток стока в полевом транзисторе характеризуется параметром ...

- a) — , б) — , г) — .

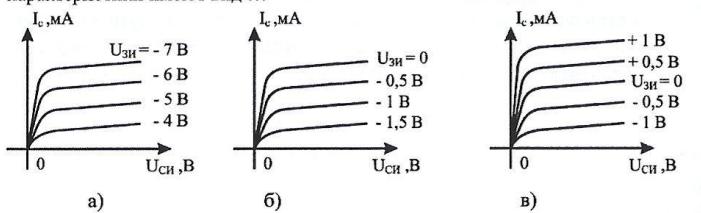
Верно: ?

5.1.26. Выходные характеристики полевого транзистора с барьером Шотки отражают функциональную зависимость ...

- a) ;  
б) ;  
в) — .

Верно: ?

5.1.27. В полевом транзисторе с барьером Шотки стоковые характеристики имеют вид ...



Верно: ?

5.1.28. ПТШ - это прибор управляемый:

- а) током;  
б) напряжением;  
в) током и напряжением.

Верно: ?

5.1.29. Статическая ВАХ прямой передачи ПТШ - это зависимость:

- а) тока стока от напряжения сток-исток;  
б) тока стока от напряжения сток-затвор;  
в) тока стока от напряжения затвор-исток.

Верно: ?

5.1.30. Статическая выходная ВАХ ПТШ - это зависимость:

- а) тока стока от напряжения сток-исток;  
б) тока стока от напряжения сток-затвор;  
в) тока стока от напряжения затвор-исток.

Верно: ?

5.1.31. В качестве затвора ПТШ используется контакт металла-полупроводник (диод Шотки) ...

- а) при прямом смещении;  
б) при обратном смещении;  
г) при прямом и обратном смещении.

Верно: ?

5.1.32. Напряжение отсечки затвор-исток — это напряжение, при котором:

- а) ток стока практически равен нулю;  
б) ток стока достигает насыщения;  
в) область положительного объемного заряда (обедненная область) вблизи стока перекрывает канал ПТШ.

Верно: ?

5.1.33. Режим насыщения ПТШ соответствует ...

- а) насыщению тока стока;  
б) насыщению тока затвора;  
в) насыщению дрейфовой скорости основных носителей в канале.

Верно: ?

5.1.34. Дрейфовая скорость носителей в канале ПТШ тем выше, чем ...

- а) выше концентрация основных носителей;  
б) ниже концентрация основных носителей;  
в) выше напряженность электрического поля в канале некоторого порогового значения.

Верно: ?

5.1.35. Усилительные свойства ПТШ характеризуются:

- а) коэффициентом передачи по току;  
б) коэффициентом передачи по напряжению;  
в) крутизной.

Верно: ?

План УМД на 2012/2013 уч.г.  
С. 7, п. 46.

Григорий Маркович Аристархов  
Андрей Альбертович Елизаров  
Виталий Иванович Николотов

**ПРИБОРЫ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ  
И ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА**

в вопросах и ответах

**Часть 2**

**Полупроводниковые приборы СВЧ**

**Учебное пособие**

---

Подписано в печать 07.03.12 Формат 60x90 1/16.  
Объём 3,1 усл.п.л. Тираж 100 экз. Изд. № 3. Заказ 74.  
Цена договорная.

---

ООО «ТиРу». Москва, Приютский пер., д. 3.