

*Направление подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»  
Профиль «Промышленная электроника»  
Методическое обеспечение дисциплины Б1.В.13 «Силовые узлы устройств  
промышленной электроники»*



**Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
в г. Смоленске**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО  
ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ «СИЛОВЫЕ УЗЛЫ УСТРОЙСТВ ПРОМЫШЛЕННОЙ  
ЭЛЕКТРОНИКИ»**

---

**Направление подготовки (специальность): 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»**

**Профиль: «Промышленная электроника»**

**Уровень высшего образования: бакалавриат**

**Нормативный срок обучения: 4 года**

**Форма обучения: очная**

**Год набора: 2021**

**Смоленск 2021**

Направление подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»  
Профиль «Промышленная электроника»  
Методическое обеспечение дисциплины Б1.В.13 «Силовые узлы устройств  
промышленной электроники»



**Методические материалы составил:**

Доцент кафедры  
электроники и микропроцессорной техники

Образцов Сергей Александрович  
ФИО

«25» июня 2021 г.

**Заведующий кафедрой** электроники и микропроцессорной техники

подпись

Якименко Игорь Владимирович  
ФИО

«02» июля 2021 г.

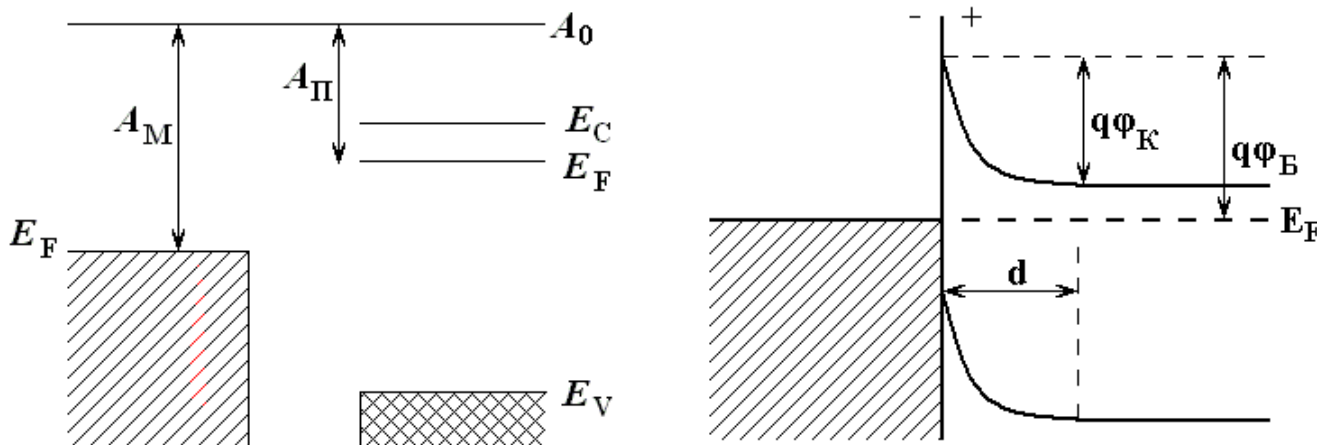
## 1. Лекционный курс.

Лекции по дисциплине «Силовые полупроводниковые приборы и интеллектуальные модули» проводятся в традиционном формате. Пример лекции представлен ниже.

### Диоды Шоттки

Для создания диодов Шоттки используется переход металл-полупроводник.

Рассмотрим энергетические диаграммы контакта полупроводника с металлом, термодинамическая работа выхода которого больше, чем из полупроводника  $A_M > A_{II}$ . В этом случае поток электронов из полупроводника в металл выше, чем из металла в полупроводник  $j_p > j_m$ . Поэтому металл заряжается отрицательно, а полупроводник n-типа положительно, и возникает контактная разность потенциалов  $\varphi_K$ , выравнивающая потоки  $j_p$  и  $j_m$  и уровни Ферми в металле и полупроводнике.



$$q \cdot \varphi_K = A_M - A_{II} \quad \text{— контактная разность потенциалов.}$$

Контактная разность потенциалов создает изгиб зон в приповерхностной области полупроводника. Вследствие этого концентрация электронов в приповерхностной области уменьшается и ее сопротивление увеличивается. Слой с повышенным сопротивлением называется запирающим. Его ширина  $d$ .

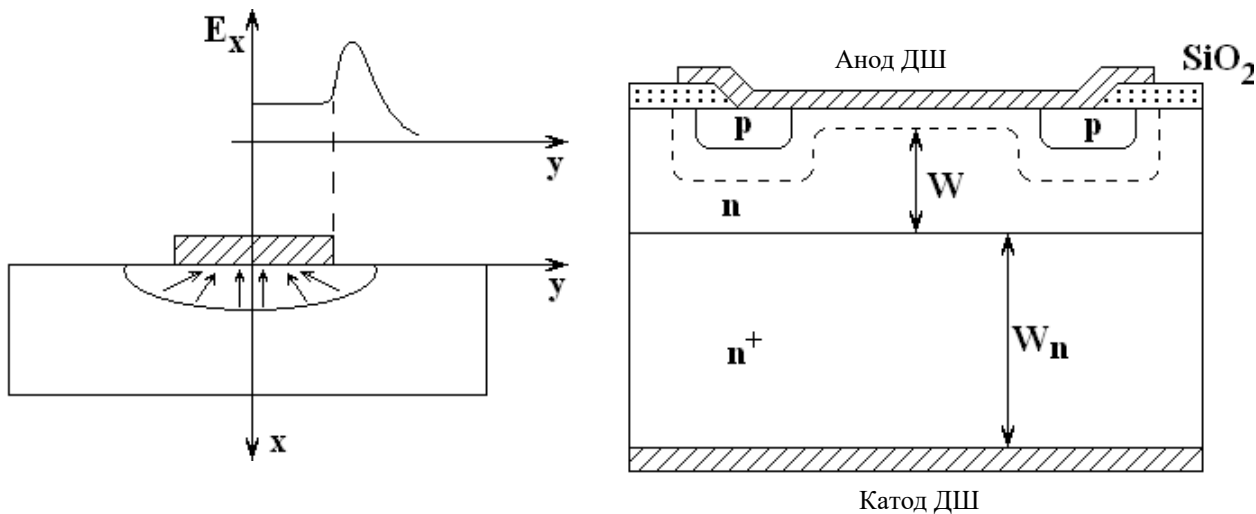
Диоды Шоттки отличаются тем, что их работа основана на переносе основных носителей. При прямом смещении электроны из полупроводника переходят в металл. Их энергия на  $q\varphi_K$  больше энергии электронов в металле. Электроны из полупроводника быстро (примерно за  $10^{-12}$  с) теряют на соударениях свою избыточную энергию и не могут возвратиться в полупроводник. В диодах Шоттки не происходит накопления заряда неосновных носителей, обуславливающего снижение быстродействия. Поэтому маломощные диоды Шоттки применяются в качестве СВЧ-выпрямительных, импульсных, смесительных диодов. Типичные времена восстановления обратного сопротивления ДШ на основе Au-Si порядка 10пс и менее.

**Силовые ДШ**, изготавливаемые на основе кремния n-типа имеют рабочие токи до нескольких сотен ампер, высокое быстродействие, низкие рабочие напряжения (несколько десятков вольт).

Низкие рабочие напряжения ДШ прежде всего связаны с наличием «краевых» эффектов при лавинном пробое перехода, которые имеют место на периферии лавинного контакта.

В простейшей конструкции ДШ силовые линии электрического поля, замыкающиеся на положительных зарядах ионов доноров, вблизи края металла резко сгущаются, что определяет резкое нарастание краевого поля. Этот эффект наиболее выражен при слабом легировании полупроводника (Для  $\uparrow U_{op}$ .  $N_d \downarrow \rightarrow E$  на краях  $\uparrow \rightarrow U^{**} \downarrow$ ) и приводит к краевому лавинному пробое при очень низких напряжениях (единицы Вольт). Для ослабления краевого эффекта и увеличения напряжения пробоя было предложено множество конструкций ДШ. Наиболее удачная конструкция с охранным p-n переходом. Так при глубине залегания p-области в несколько микрон удастся повысить напряжение пробоя в ДШ до нескольких десятков вольт. Дальнейшее увеличение напряжения пробоя требует создания более

широкого и глубокого охранного p-n перехода. Однако при больших прямых токах такой переход сам начинает инжектировать неосновные носители – дырки – в область n-диода. Это ведет к накоплению большого избыточного заряда, что в совокупности с дополнительной емкостью охранного p-n перехода ухудшает быстродействие ДШ.



Основная причина инерционности ДШ связана с перераспределением заряда вблизи границы ООЗ при изменении внешнего напряжения  $U$ , т.е. с изменением “толщины” барьера  $d$ . Количественно такая нелинейная емкость, называемая барьерной, определяется соотношением:

$$C_{\text{БАР}} = \frac{dQ}{dU} = S \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{d} = S \cdot \sqrt{\frac{q \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot N_D}{2 \cdot (\varphi_K - U)}} \quad , \text{ где}$$

$$\varphi_K = \frac{A_M - A_{II}}{q}$$

$C_{\text{БАР}}$  сильно возрастает при прямых смещениях  $U > 0$  и при  $U \approx \varphi_K$  теряет смысл.

При  $U < 0$   $C_{\text{БАР}}$  уменьшается.

Диоды Шоттки изготавливаются групповым методом на пластинах большого диаметра. Для обеспечения необходимой механической прочности толщина пластины должна быть  $150 \div 200$  мкм. Однако толщина активной области ДШ на  $U_{\text{РАБ}} \cong 50\text{В}$  не должна превышать 10 мкм. Конструкция такого ДШ представлена на рисунке.

Активный слой обычно составляет 2-10 мкм, а высоколегированный  $n^+$  слой подложки обеспечивает необходимую механическую прочность благодаря толщине  $150 \div 200$  мкм. Наличие такой подложки значительно  $\Gamma_B$  дш и облегчает создание омического контакта с металлизацией катода.

В заключение следует отметить, что обратные токи ДШ на 3-4 порядка выше, чем у Si диодов с p-n переходом. Но при этом прямые напряжения более чем в 2 раза меньше.

В настоящее время ДШ наиболее эффективны как низковольтные быстродействующие диоды на большие токи. Хотя нередко появляются сообщения о создании высоковольтных ДШ.

*Направление подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»  
Профиль «Промышленная электроника»  
Методическое обеспечение дисциплины Б1.В.13 «Силовые узлы устройств  
промышленной электроники»*



Ссылка для скачивания лекций размещена на странице дисциплины на сайте кафедры электроники и микропроцессорной техники: <https://www.eimt.ru/bakalavriat-2019/suupe>.

## **2. Лабораторные работы.**

Лабораторные работы проводятся на специализированных стендах в лаборатории преобразовательной техники Б-312. Задания на лабораторные работы представлены на странице дисциплины на сайте кафедры электроники и микропроцессорной техники: <https://www.eimt.ru/bakalavriat-2019/suupe>.