

Э.А. Керимов

## Физические основы работы фотодиодов с барьером Шоттки

Инфракрасные фотоприемники на основе диодов Шоттки по форме спектральной характеристики отличаются от обычных собственных или примесных приемников ИК-излучения. Квантовый выход приемников, основанных на внутреннем фотоэффекте (фоторезисторы или  $p-n$  фотодиоды), близок к единице и вообще не зависит от энергии кванта при энергии больше порогового значения. Для фотоприемников на барьере Шоттки (БШ) квантовый выход монотонно увеличивается вместе с энергией кванта при энергиях больше пороговой.

*Ключевые слова:* внутренняя эмиссия; диод Шоттки; промежуточный слой; энергетическая диаграмма; квантовый выход; фоточувствительность.

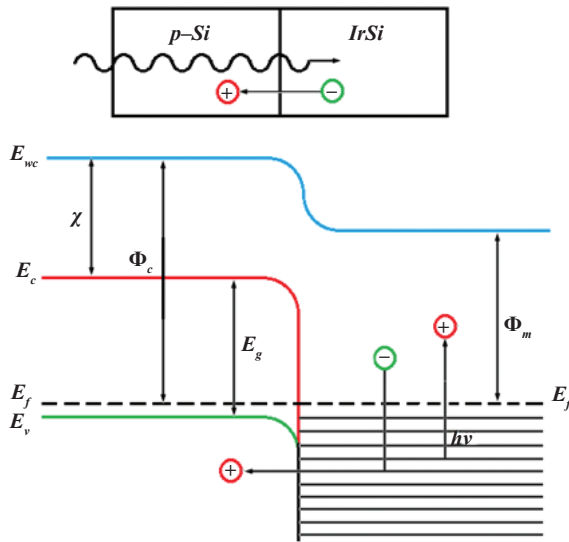
При контакте металла с полупроводником в зависимости от соотношения между величинами работы выхода электрона в металле  $\Phi_m$  и в полупроводнике  $\chi + V_n$  электроны в результате внутренней эмиссии могут переходить из металла в полупроводник или наоборот. На рисунке 1 приведена зонная диаграмма контакта силицид металла — кремний  $p$ -типа для случая  $\Phi_m < \chi + V_n$ . В этом случае часть электронов из металла (силицида) переходит в полупроводник ( $Si$ ) до тех пор, пока не наступит термодинамическое равновесие и уровни Ферми в металле и полупроводнике не выровняются. Вблизи границы раздела в полупроводнике образуется область, обедненная носителями заряда, а также возникает область объемного заряда некомпенсированных отрицательных ионов акцепторов. Их электрическое поле препятствует дальнейшей эмиссии электронов из металла в полупроводник, и энергетические зоны полупроводника искривляются вниз. Если толщина промежуточного слоя между металлом и полупроводником сравнима с межатомными расстояниями, то величина искривления — высота потенциального барьера — равна контактной разности потенциалов:

$$\Psi_{MS} = \Phi_S - \Phi_M + (E_f - E_V) = \chi + E_g - \Phi_M. \quad (1)$$

Второй член здесь представляет собой разность между работой выхода металла и электронным средством полупроводника.

Под воздействием ИК-излучения в такой структуре могут иметь место электронные переходы двух типов. Если энергия падающего фотона  $h\nu \geq E_g$ , то при его поглощении в полупроводнике происходит генерация электронно-дырочных пар. В этом случае, как и в обычном фотодиоде на  $p-n$ -переходе,

происходит разделение носителей разного знака полем перехода и возникает фотоэлектродвижущая сила.



**Рис. 1.** Энергетическая диаграмма, демонстрирующая работу ФДБШ (фотодиоды с барьером Шоттки) на основе  $IrSi-p-Si$

Очевидно, что длинноволновая граница такого процесса не может быть меньше ширины запрещенной зоны полупроводника, и с этой точки ФДБШ (фотодиод с барьером Шоттки) не отличается от  $p-n$ -фотодиодов или собственных фоторезисторов. Если  $h\nu < E_g$ , то поглощение ИК-излучения в пленке металла возбуждает валентные электроны в состояния выше уровня Ферми, приводя к появлению дырок, некоторые из которых имеют энергию больше высоты барьера  $\Psi_{ms}$ . Затем либо дырка эмитируется из металла в полупроводник, либо электрон переходит из полупроводника в металл, заполняя пустое пространство.

Для преодоления барьера при переходе из металла в полупроводник энергия возбужденной дырки должна быть больше высоты барьера. Длинноволновую границу такого процесса можно менять, подбирая соответствующий металл. Поэтому с точки зрения создания фотоприемников ИК-излучения на кремнии наибольший интерес представляют фотоэмиссии из металла в полупроводник. Эксперименты и теоретические расчеты показывают, что спектральная зависимость квантового выхода  $Y$  внутренней фотоэмиссии из металла в полупроводник может быть описана так называемой уточненной формулой Фаулера [1–2]:

$$Y = C_1 \frac{(h\nu - hv_0)^2}{h\nu}, \quad (2)$$

где  $C_1$  — коэффициент квантовой фотоэмиссии, который определяется геометрическими, оптическими и физическими свойствами контакта Шоттки. На рисунках 2 и 3 показана зависимость квантового выхода, наблюдаемая для фотодиодов на основе контактов  $IrSi-p-Si$  и  $PtSi-p-Si$ .

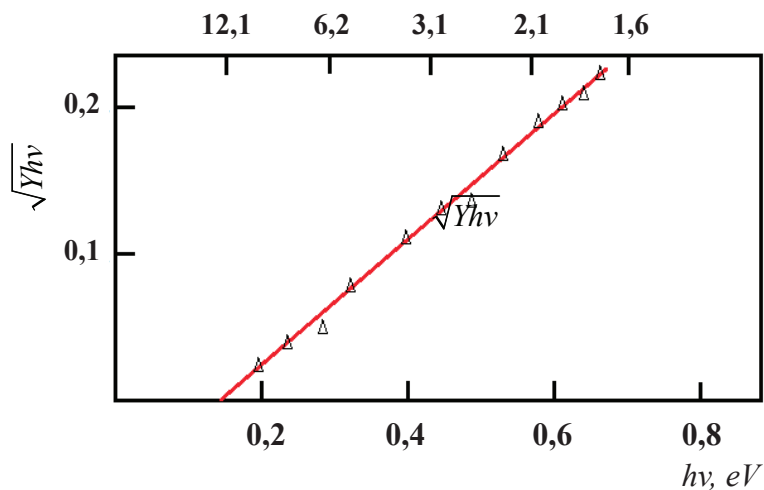


Рис. 2. Зависимость фотоотклика от энергии кванта света для фотодиода на основе *IrSi-p-Si*

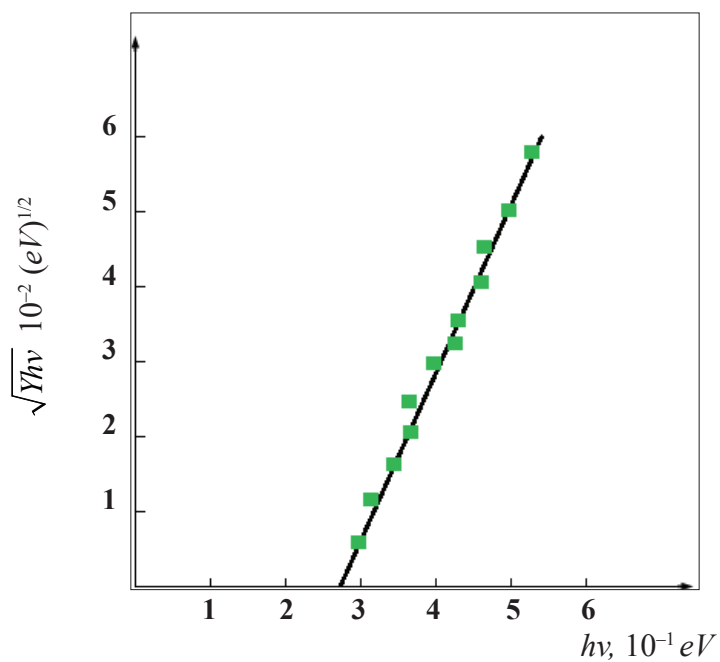


Рис. 3. Зависимость фотоотклика от энергии кванта света для фотодиода на основе *PtSi-p-Si*

В таблице 1 приведены значения соответствующих длинноволновых границ фотоэффекта  $\lambda_0$  в ФДБШ на основе контакта силицид металла — кремний.

Таблица 1

**Значения соответствующих длинноволновых границ фотоэффекта**

Силицид	$\Psi_{MS}$ , эВ	$\lambda_0$ , мкм
<i>TiSi<sub>2</sub></i>	0,52	2,40
<i>TiSi<sub>2</sub></i>	0,47	2,64
<i>NiSi</i>	0,46	4,70
<i>Pt<sub>2</sub>Si</i>	0,85	3,65
<i>PtSi</i>	0,20	6,00
<i>Pd<sub>2</sub>Si</i>	0,34	3,6
<i>IrSi</i>	0,14	8,00

Основные процессы, происходящие в ФДБШ, сводятся к поглощению фотонов в слое силицида и внутренней фотоэмиссии носителей из металла в полупроводник. Поэтому квантовый выход и фоточувствительность этих ФД (фотодиодов) определяются в основном электронными и оптическими процессами в силициде металла, а не в полупроводнике. Это означает, что фоточувствительность ФДБШ в первом приближении не зависит от таких параметров полупроводника, как степень легирования и уровень компенсации примесей, а также от времени жизни неосновных носителей тока. Тем самым исключаются основные причины, вызывающие неравномерность чувствительности в многоэлементных матрицах.

Кроме того, поскольку кремниевая подложка не участвует в процессе фотогенерации носителей заряда, то к ней предъявляются значительно менее жесткие требования по электрическим параметрам, и для изготовления ФДБШ может применяться тот же кремний, который используется для производства интегральных микросхем. По сравнению с обычными фотоприемниками ФДБШ имеют значительно меньшую обнаружительную способность при длинах волн, близких к длинноволновой границе. Отличается также и их зависимость от положения длинноволновой границы фоточувствительности: если для обычных фотоприемников сдвиг пороговой длины волн  $\lambda_0$  за длинноволновую границу окна пропускания в лучшем случае не снижает обнаружительной способности, то для ФДБШ максимальная величина интегральной обнаружительной способности достигается только в том случае, когда  $\lambda_0$  больше, чем длинноволновая граница соответствующего окна пропускания. Так, для окна 3–5 мкм максимальная величина интегральной обнаружительной способности соответствует  $\lambda = 7$  мкм. Эта особенность ФДБШ обусловлена особым видом спектральной зависимости квантового выхода, когда увеличение длинноволновой границы приводит к росту квантовой эффективности в заданном интервале длин волн, чего не наблюдается в обычных приемниках.

*Литература*

1. Бовина Л.А., Болтарь К.О., Сатинов Л.Д., Соляков В.Н., Стафеев В.И., Петров И.Н. Отрицательная проводимость в КРТ фотодиодах // Материалы по физике полупроводников. Т. 1. 1993. С. 133–135.

2. Курбатов Ю.Н. Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра. М.: МФТИ, 1999. 320 с.

*Literatura*

1. Bovina L.A., Boltar' K.O., Satinov L.D., Solyakov V.N., Stafeev V.I., Petrov I.N. Otricatel'naya provodimost' v KRT fotodiodax // Materialy' po fizike poluprovodnikov. T. 1. 1993. S. 133–135.

2. Kurbatov Yu.N. Optoe'lektronika vidimogo i infrakrasnogo diapazonov spektra. M.: MFTI, 1999. 320 s.

*E.A. Kerimov*

**Physical Bases of Work of Photodiodes  
with Barrier of Schottky**

Infrared photodetectors based on Schottky diodes in the form of the spectral characteristic differ from conventional own or impurity IR detectors. The quantum yield of receivers based on the internal photoelectric effect (photoresists or  $p-n$  photodiodes) is close to unity and does not depend at all on the photon energy at an energy greater than the threshold value. For Schottky barrier (BS) photodetectors quantum yield increases monotonically with the photon energy at energies greater than the threshold.

*Keywords:* internal emission; Schottky diode; intermediate layer; power diagram; quantum exit; photosensitivity.