

Д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ, к. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА,  
к. т. н. Р. А. САИДОВА, Ф. А. ГИЯСОВА

Узбекистан, г. Ташкент, НПО «Физика–Солнце»  
E-mail: karimov@uzsci.net

Дата поступления в редакцию  
27.08 2007 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН  
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

## АНОМАЛЬНЫЙ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В СТРУКТУРЕ С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ–МОТТА

*Обнаруженный фотовольтаический эффект сопровождается сменой знака фототока при переходе из области собственного поглощения к примесному в легированной кислородом двухбазовой структуре  $Ag-N^0AlGaAs-n^+GaAs-n^0GaInAs-Au$ , представляющей интерес для волоконно-оптических систем.*

Интерес к структурам, чувствительным в инфракрасной (ИК) области спектра, обусловлен возрастающей потребностью в них при разработке различных информационных систем. Поиски путей повышения эффективности ИК-фотоприемников набирают темпы. В последние годы большое внимание уделяется исследованиям фотозлектрических характеристик структур с блокированной проводимостью [1] и с изотипными переходами [2].

На изотипных  $N-n$ -гетеропереходах узкозонный полупроводник играет роль металла [3], что позволяет реализовать в них те процессы, которые свойственны структурам с барьером Шоттки.

Аналогичным образом объясняются фотовольтаические эффекты, обнаруженные в структурах с блокированной проводимостью. В известных структурах с изотипными переходами типа  $n^+-GaSb-n^0-GaInAsSb-n^+-GaAlAsSb$  фоточувствительность в длинноволновой области спектра (1–2 мкм) достигается при определенных рабочих напряжениях, что вызывает увеличение шумовых токов.

В работе [1] были предложены ВІВ-структуры (Blocked Impurity Band) с блокированной проводимостью  $p^+-i-p-p^+$  в качестве примесного фотоприемника дальнего инфракрасного диапазона, работающего при гелиевых температурах. Его основное преимущество перед классическим примесным фотоприемником — в сочетании высокой квантовой эффективности при высоком уровне легирования фоточувствительного слоя с пониженным уровнем шума, обусловленным наличием блокирующего слоя. Это позволило создать матричные фотоприемные устройства, работающие в спектральном диапазоне 0,4–40 мкм [4].

Рассматривая переходы «металл–полупроводник», следует отметить, что классический диод Шоттки содержит высокоомную базовую область, сформированную на сильнолегированной подложке, что

может привести в результате к образованию между ними изотипного барьера, а изотипные гетеробарьеры могут рассматриваться как двойные барьеры Шоттки [5]. Однако реальные структуры с двойными барьерами могут существенно отличаться от теоретических моделей в зависимости от параметров базовой области, т. к. при определенной ее толщине емкость барьера перестает зависеть от рабочего напряжения, что является результатом создания барьера Мотта.

Исследуемая структура  $Ag-N^0AlGaAs-n^+GaAs-n^0GaInAs-Au$  содержит два барьера (один из них — Мотта, а другой — Шоттки) с соответствующими базовыми областями, сформированными на обеих поверхностях общей подложки. При создании такой структуры мы преследовали цель получения фотозлектрического усиления за счет наличия двух барьеров [6] и фотовольтаического эффекта благодаря формированию базовой области из высокоомного материала.

В настоящей работе приводятся результаты исследования обнаруженного при комнатной температуре фотовольтаического эффекта, который сопровождается сменой знака фототока при переходе из области собственного поглощения к примесному в широком диапазоне спектра (0,4–2 мкм) в легированной кислородом двухбазовой структуре  $Ag-N^0AlGaAs-n^+GaAs-n^0GaInAs-Au$ .

### Основные параметры исследуемых двухбазовых структур

Исследуемые структуры получены выращиванием гетерослоев методом жидкофазной эпитаксии [7]:  $N^0AlGaAs$  — на одну поверхность и  $n^0GaInAs$  — на вторую поверхность сильнолегированной подложки из монокристаллического  $n^+GaAs:Te$  с концентрацией носителей  $n \approx 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и толщиной 350–400 мкм. При выращивании эпитаксиальных слоев  $N^0AlGaAs$  и  $n^0GaInAs$  в качестве источника использовали  $n^0GaAs$ , легированный кислородом, с концентрацией носителей  $4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . В обоих случаях толщина эпитаксиальных слоев составляла 2–3 мкм. Со стороны широкозонного гетерослоя был сформирован выпрямляющий полупрозрачный потенциальный барьер (70 Å) из  $Ag$ , а со стороны узкозонного гетерослоя — из  $Au$ . Таким образом, была получена двухбазовая  $Ag-N^0AlGaAs-n^+GaAs-n^0GaInAs-$

Au-структура, типичная геометрическая конструкция которой приведена на рис. 1.

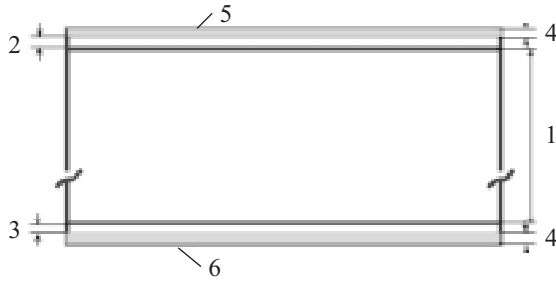


Рис. 1. Конструкция двухбазовой структуры: 1 — nGaAs (концентрация  $2,10^{18} \text{ см}^{-3}$ , толщина 400 мкм); 2 — nGaInAs (концентрация  $4,10^{15} \text{ см}^{-3}$ , толщина 1,5 мкм); 3 — nAlGaAs (концентрация  $4,10^{15} \text{ см}^{-3}$ , толщина 2 мкм); 4 — слой объемного заряда; 5 — Au-барьер Шоттки; 6 — Ag-барьер Мотта

Здесь следует отметить, что формирование потенциальных барьеров на обе поверхности обеспечивает двухстороннюю фоточувствительность структуры, а различие состава материала подбарьерных областей позволяет задавать спектральный диапазон со стороны возбуждаемой поверхности. В зависимости от длины волны освещения коэффициент поглощения фотонов различен, и генерация носителей будет происходить в различных областях структуры. Так, коротковолновое излучение поглощается на меньшей глубине в приповерхностной области, а длинноволновое — чем длиннее, тем глубже будет проникать, достигая квазинейтральных областей базы. В результате фотоносители будут эффективно разделяться в областях, отраженных на спектральных характеристиках, т. е. на основе спектральных характеристик можно определить энергетические параметры базовой области структуры.

При освещении Ag-N<sup>0</sup>AlGaAs-n<sup>+</sup>GaAs-n<sup>0</sup>GaInAs-Au-структуры со стороны n<sup>0</sup>GaInAs-Au-перехода на спектральной характеристике при длине волны 0,94 мкм появляется один пик (рис. 2), который соответствует оптической ширине запрещенной зоны n<sup>0</sup>GaInAs, равной 1,32 эВ.

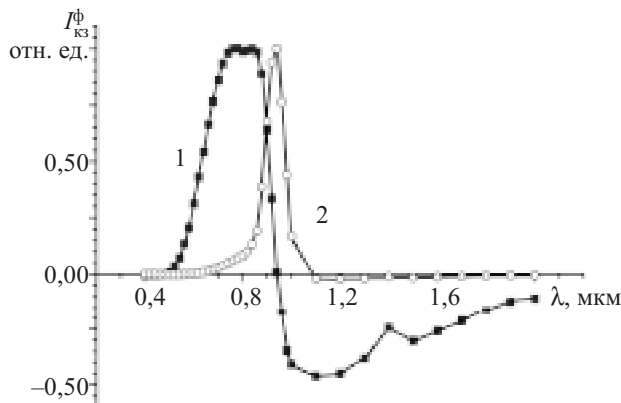


Рис. 2. Спектральная характеристика Ag-N<sup>0</sup>AlGaAs-n<sup>+</sup>GaAs-n<sup>0</sup>GaInAs-Au-структуры при комнатной температуре в режиме тока короткого замыкания при освещении со стороны перехода Ag-N<sup>0</sup>AlGaAs (1) и со стороны перехода n<sup>0</sup>GaInAs-Au (2)

Отсюда на основании экспериментального значения ширины запрещенной зоны путем расчета, приведенного в работе [8, с. 18—21], можно определить расчетное значение состава твердого раствора InGaAs. Подставляя значение  $E_g=1,32 \text{ эВ}$  в формулу (1), получим

$$E_g(\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As})=0,36+1,064x=1,32 \text{ эВ}, \quad (1)$$

откуда

$$x=(1,32-0,36)/1,064=0,9. \quad (2)$$

Соответственно имеем следующий состав: Ga<sub>0,9</sub>In<sub>0,1</sub>As.

Что касается содержания Al, то его количество по технологическим данным равно  $y=0,2$  [9, с. 259—262]. На основании экспериментального значения ширины запрещенной зоны путем расчета, приведенного в работе, можно определить расчетное значение состава твердого раствора Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As. Подставляя в формулу (3) значение  $E_g=1,67 \text{ эВ}$ , соответствующее оптической ширине запрещенной зоны гетерослоя AlGaAs (рис. 2), получим

$$E_g(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As})=1,424+1,247x=1,67 \text{ эВ}, \quad (3)$$

откуда

$$x=(1,67-1,424)/1,247=0,197 \approx 0,2. \quad (4)$$

Соответственно имеем следующий состав: Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>As.

Высота потенциальных барьеров «металл—полупроводник» определяется из зависимости корня квадратного фотоотклика, пересчитанного на один фотон, от энергии фотона [10, с. 303—304]. Согласно данным, определенным из спектральных характеристик (рис. 2) для переходов Ag-N<sup>0</sup>AlGaAs и nGaInAs-Au, соответственно имеем  $\phi^{m-N}=0,62 \text{ эВ}$ ,  $\phi^{n-m}=0,6 \text{ эВ}$ .

Как видим, ширина запрещенной зоны областей в одном направлении убывает, начиная от N<sup>0</sup>Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>As до Ga<sub>0,9</sub>In<sub>0,1</sub>As, а именно, ширина запрещенной зоны базовой области N<sup>0</sup>Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>As равна 1,67 эВ, низкоомной подложки n<sup>+</sup>GaAs — 1,43 эВ и узкозонной базовой области Ga<sub>0,9</sub>In<sub>0,1</sub>As — 1,32 эВ.

Остальные параметры, необходимые для полного анализа физических процессов, протекающих в Ag-N<sup>0</sup>AlGaAs-n<sup>+</sup>GaAs-n<sup>0</sup>GaInAs-Au-структуре, можно получить из физических параметров материалов, составляющих структуру.

Так, контактная разность потенциалов, создающая слой объемного заряда между металлом и полупроводником, равна разности между высотой барьера  $\phi$  и зазором между зоной проводимости и уровнем Ферми.

$$U_K^{m-N} = \phi^{m-N} - (E_{CN} - F_N),$$

где  $E_{CN}$  — энергия зоны проводимости;  
 $F_N$  — положение уровня Ферми.

В зависимости от концентрации носителей положение уровня Ферми более точно можно определить графическим способом на основе данных, приведенных в работе [11, с. 56—61]. В частности, для Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>As с концентрацией носителей  $1,10^{15} \text{ см}^{-3}$  его значение равно 0,26 эВ, а для Ga<sub>0,9</sub>In<sub>0,1</sub>As (с уче-

том ширины запрещенной зоны) — 0,24 эВ. Тогда контактные разности потенциалов будут равны:

$$U_K^{m-N} = \varphi^{m-N} - 0,26 \text{ эВ} = 0,36 \text{ эВ};$$

$$U_K^{n-m} = \varphi^{n-m} - 0,24 \text{ эВ} = 0,36 \text{ эВ},$$

т. е. это предельные напряжения, прилагаемые в прямом направлении, когда переход «металл—полупроводник» становится прозрачным.

Создаваемые на границе гетеропереходов разрывы в зоне проводимости и в валентной зоне определяются разностью электронного сродства каждой из областей. В нашем случае имеем два изотипных гетероперехода  $N^0Al_{0,2}Ga_{0,8}As-n^+GaAs$  и  $n^+GaAs-n^0Ga_{0,9}In_{0,1}As$ . Для данного состава алюминия ( $x=0,2$ ) разрыв в зоне проводимости определяется из выражения [8]:

$$\begin{aligned} \Delta E_C &= 0,85(E_g^N - E_g^{n+}) = \\ &= 0,85(1,67 - 1,43) = 0,204 \text{ эВ}, \end{aligned} \quad (5)$$

а в валентной зоне

$$\begin{aligned} \Delta E_V &= (E_g^N - E_g^{n+}) - 0,204 = \\ &= 0,24 - 0,204 = 0,036 \text{ эВ}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для гетероперехода  $n^+GaAs-n^0Ga_{0,9}In_{0,1}As$  соответственно имеем разрыв в зоне проводимости, определяемый разностью электронных сродств ( $\chi$ ) GaAs и  $Ga_{0,9}In_{0,1}As$ :

$$\Delta E_C = |\chi^{n+} - \chi^n| = |4,05 - 4,1| = 0,05 \text{ эВ},$$

а в валентной зоне

$$\Delta E_V = (E_g^{n+} - E_g^n) - 0,05 = 0,11 - 0,05 = 0,06 \text{ эВ}.$$

Энергетическая зонная диаграмма  $Ag-N^0AlGaAs-n^+GaAs-n^0GaInAs-Au$ -структуры, построенная на основе полученных данных, приведена на **рис. 3**.

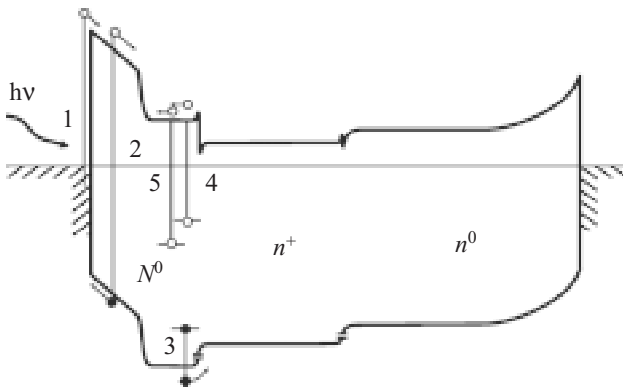


Рис. 3. Энергетическая зонная диаграмма  $Ag-N^0AlGaAs-n^+GaAs-n^0GaInAs-Au$ -структуры в равновесном состоянии

В соответствии с поведением изотипных  $N-n$ -гетеропереходов, узкозонная область ведет себя как полупроводник  $p$ -типа [9]. На этих  $N-n$ -гетеропереходах смещающему прямому направлению соответствует отрицательный потенциал на  $(-)$  $Ag-N^0Al_{0,2}Ga_{0,8}As$ -стороне, когда барьер  $Ag-N^0AlGaAs$  принимает запираемое положение. Эквивалентную

схему исследуемой структуры можно представить в виде  $m-N^0-p$ -перехода, состоящего из прямо включенных двух барьеров с двумя последовательно соединенными через  $n^+$ -подложку базовыми областями.

В связи с тем, что концентрация носителей  $n^+GaAs$  подложки на три порядка выше, чем в эпитаксиальных слоях, а сопротивление очень мало, то подложка в структуре становится связующим звеном между гетерослоями. В процессах токопереноса его толщина практически не играет роли, т. к. все приложенное извне напряжение падает на гетерослоях и в потенциальных барьерах «металл—полупроводник». Общая толщина, которая участвует в физических процессах, равна сумме толщин гетерослоев.

Ниже приведены результаты исследования фотовольтаического эффекта в спектральном диапазоне 0,4—2 мкм, обнаруженного при комнатной температуре в двухбазовой  $Ag-N^0AlGaAs-n^+GaAs-n^0GaInAs-Au$ -структуре.

### Фотовольтаический эффект в двухбазовой структуре

При исследовании спектральных характеристик двухбазовой  $Ag-N^0AlGaAs-n^+GaAs-n^0GaInAs-Au$ -структуры в режиме тока короткого замыкания обнаружен фотовольтаический эффект, т. е. без подачи рабочего напряжения в замкнутой цепи создается фототок при возбуждении монохроматическим и интегральным излучением. Особенность обнаруженного эффекта состоит в том, что при освещении со стороны  $Ag-N^0AlGaAs$  с увеличением длины волны монохроматического излучения от 0,4 до 2 мкм фототок меняет знак. Если в области собственного поглощения (0,5—0,9 мкм) фототок имеет положительный знак, то в примесной области поглощения (от 0,96 до 2 мкм) фототок приобретает отрицательную полярность с пиками при 1,1 и 1,55 мкм (**рис. 4**). Наблюдаемые пики при 1,1 мкм можно идентифицировать с энергетическими уровнями центров собственных дефектов эпитаксиальных слоев базовой области, а пики при 1,55 мкм связаны с уровнями кислорода (0,8—0,82 мкм). При возбуждении структуры со стороны  $nGaInAs-Ag$  максимум фототока короткого замыкания достигается в области спектра 0,94 мкм, соответствующей ширине запрещенной зоны  $GaInAs$  (1,32 эВ). Однако в примесной области фототоки имеют низкие значения.

С повышением температуры от комнатной до 80°C значения фототока в области собственного поглощения остаются неизменными, а в примесной области поглощения — увеличиваются пропорционально температуре (**рис. 4**, кривые 2 и 4). Неизменность величины фототока в области собственного поглощения можно объяснить независимостью физических процессов (прежде всего — толщины слоя объемного заряда  $Ag-N^0AlGaAs$ -барьера) от температуры. Смену знака спектрального фототока можно объяснить сменой области фотогенерации носителей в соответствии с длиной волны оптического излучения. Так, излучение с длиной волны от 0,4 до 0,94 мкм генерирует фотоносители в приповерхностной области и в области объемного заряда облучаемого барьера



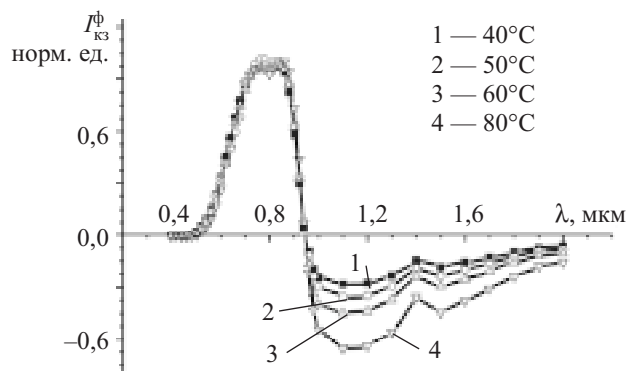


Рис. 4. Спектральная характеристика  $Ag-N^0AlGaAs-n^+GaAs-n^0GaInAs-Au$ -структуры при различных температурах в режиме тока короткого замыкания при освещении со стороны  $Ag-N^0AlGaAs$

(рис. 4, кривые 1 и 2). В дальнейшем излучение достигает квазинейтральной области базы и гетерограницы  $N^0AlGaAs-n^+GaAs$ , где фотоотклик имеет противоположный знак (рис. 3, позиции 3, 4 и 5). Позиция 3 соответствует возбуждению носителей с уровня собственной дефектов гетерослоя, а позиция 4 — разделению фотоносителей в области объемного заряда на гетерогранице  $N^0AlGaAs-n^+GaAs$  и, наконец, позиция 5 отражает возбуждение фотоносителей с примесных уровней кислорода. В результате имеем смену знака фототока в режиме короткого замыкания в зависимости от длины волны возбуждающего оптического излучения.

Таким образом, в легированной кислородом двухбазовой  $Ag-N^0AlGaAs-n^+GaAs-n^0GaInAs-Au$ -структуре при комнатной температуре обнаруживается фотовольтаический эффект, который сопровождается сменой знака фототока при переходе из области

собственного поглощения к примесному в диапазоне спектра от 0,4 до 2 мкм. Структура представляет интерес как бесшумный фотоприемник для волоконно-оптических систем.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Есаев Д. Г., Сеница С. П., Чернявский Е. В. Вольт-амперные характеристики фотоприемников с блокированной прыжковой проводимостью на основе Si:As // ФТП.— 1999.— Т. 33, вып. 5.— С. 614—618.
2. Слободчиков С. В., Салихов Х. М., Яковлев Ю. П., Самурков Б. Е. О механизмах усиления фототока в изотипных гетероструктурах  $n^+-GaSb-n^0-GaInAsSb-n^+-GaAlAsSb$  // Письма в ЖТФ.— 1998.— Т. 24, № 10.— С. 37—42.
3. Ахметоглы М. А., Андреев И. А., Куницына Е. В. и др. Электрические свойства изотипных гетеропереходов  $n^+-GaSb-n^0-GaInAsSb-n^+-GaAlAsSb$  // ФТП.— 2007.— Т. 41, вып. 2.— С. 154—159.
4. Pat. 4568960 USA. Blocked impurity band detectors / M. D. Petroff, M. G. Stapelbroek.— 1986.
5. Van Opdorp C., Kanerva H. K. J. Current-voltage characteristics and capacitance of isotype heterojunctions // J. Solid-State Electron.— 1967.— Vol. 10, N 5.— P. 401—421.
6. Каримов А. В., Едгорова Д. М. Одно- и двухбарьерные структуры для оптоэлектроники // Электроника.— 2005.— № 11.— С. 5—13.
7. Karimov A. V., Yodgorova D. M. Features of growth epitaxial layers of firm solutions on a basis of indium's and aluminium's arsenide // Semiconductor Physics Quantum Electronics Optoelectronics.— 2004.— N 4.— P. 382—385.
8. Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах / Кн. 2.— М.: Мир, 1981.
9. Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах / Кн. 1.— М.: Мир, 1981.
10. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов / Кн. 1.— М.: Мир, 1984.
11. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника.— М.: Высш. школа, 1991.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

15-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов  
**«МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОРМАТИКА — 2008»**  
 23—25 апреля 2008 г.

**Научные направления работы конференции**

1. Нанотехнологии в электронике.
2. Материалы микро-, опто- и наноэлектроники.
3. Проектирование и технология электронных компонентов.
4. Микро- и наносистемная техника.
5. Опто- и акустоэлектроника.
6. Математические модели и алгоритмы в информатике.
7. Автоматизированные информационные системы.
8. Информационно-управляющие и вычислительные системы и приборы.

9. Телекоммуникационные системы и связь.
10. Биомедицинская электроника.
11. Экологические аспекты микро- и наноэлектроники.
12. Менеджмент и маркетинг наукоемких производств.

**Адрес Оргкомитета**

124498, Москва, г. Зеленоград, проезд 4806, д. 5, МИЭТ, ОНТИ.  
 Тел. (495) 532-98-30  
 E-mail: id@rnd.miee.ru

Ответственный секретарь Оргкомитета  
 Харач Валентина Павловна