

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 фотоэлектрических 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^+ 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 фотоэлектрического 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**.

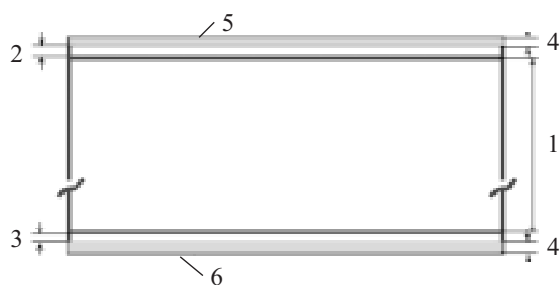


Рис. 1. Конструкция двухбазовой структуры:

1 — $n\text{GaAs}$ (концентрация $2,10^{18} \text{ см}^{-3}$, толщина 400 мкм); 2 — $n\text{GaInAs}$ (концентрация $4,10^{15} \text{ см}^{-3}$, толщина 1,5 мкм); 3 — $n\text{AlGaAs}$ (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 $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}-n^+\text{GaAs}-n^0\text{GaInAs}-\text{Au}$ -структуры со стороны $n^0\text{GaInAs}-\text{Au}$ -перехода на спектральной характеристике при длине волны 0,94 мкм появляется один пик (**рис. 2**), который соответствует оптической ширине запрещенной зоны $n^0\text{GaInAs}$, равной 1,32 эВ.

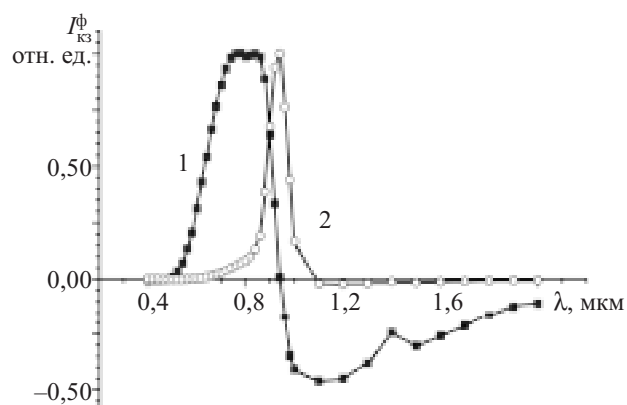


Рис. 2. Спектральная характеристика $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}-n^+\text{GaAs}-n^0\text{GaInAs}-\text{Au}$ -структуры при комнатной температуре в режиме тока короткого замыкания при освещении со стороны перехода $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}$ (1) и со стороны перехода $n^0\text{GaInAs}-\text{Au}$ (2)

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: $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$.

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 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. 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: $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$.

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 $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}$ и $n\text{GaInAs}-\text{Au}$, 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 $N^0\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ до $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$, а именно, ширина запрещенной зоны базовой области $N^0\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ равна 1,67 эВ, низкоомной подложки $n^+\text{GaAs}$ — 1,43 эВ и узкозонной базовой области $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$ — 1,32 эВ.

Остальные параметры, необходимые для полного анализа физических процессов, протекающих в $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}-n^+\text{GaAs}-n^0\text{GaInAs}-\text{Au}$ -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 ϕ 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 $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ с концентрацией носителей $1,10^{15} \text{ см}^{-3}$ его значение равно 0,26 эВ, а для $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$ (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 $N^0\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}-n^+\text{GaAs}$ и $n^+\text{GaAs}-n^0\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$. 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 $n^+\text{GaAs}-n^0\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$ соответственно имеем разрыв в зоне проводимости, определяемый разностью электронных сродств (χ) GaAs и $\text{Ga}_{0,9}\text{In}_{0,1}\text{As}$:

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

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 $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}-n^+\text{GaAs}-n^0\text{GaInAs}-\text{Au}$ -структуры, построенная на основе полученных данных, приведена на **рис. 3**.

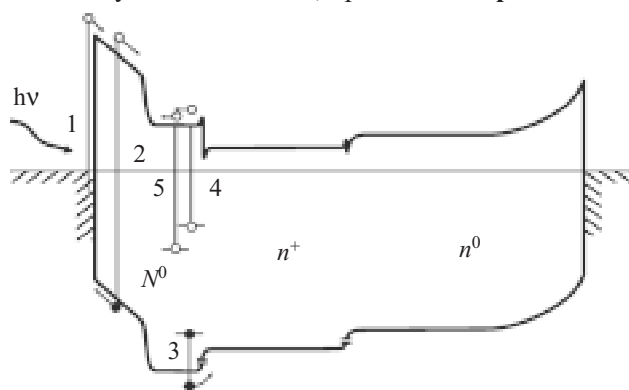


Рис. 3. Энергетическая зонная диаграмма $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}-n^+\text{GaAs}-n^0\text{GaInAs}-\text{Au}$ -структуры в равновесном состоянии

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 $(-)\text{Ag}-N^0\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ -стороне, когда барьер $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}$ 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 $n^+\text{GaAs}$ 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 $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}-n^+\text{GaAs}-n^0\text{GaInAs}-\text{Au}$ -структуре.

Фотовольтаический эффект в двухбазовой структуре

При исследовании спектральных характеристик двухбазовой $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}-n^+\text{GaAs}-n^0\text{GaInAs}-\text{Au}$ -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 $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}$ 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 $n\text{GaInAs}-\text{Ag}$ 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 $\text{Ag}-N^0\text{AlGaAs}$ -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

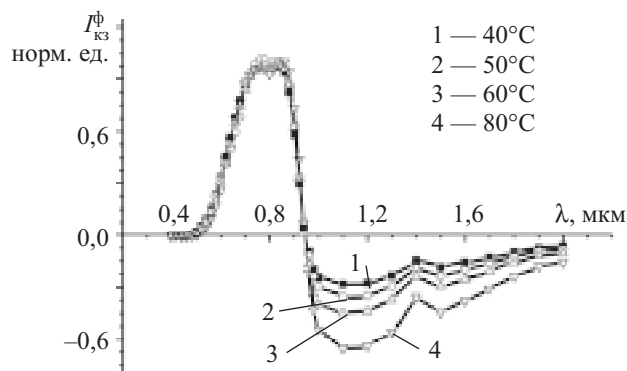


Рис. 4. Спектральная характеристика $\text{Ag-N}^0\text{AlGaAs-n}^+\text{GaAs-n}^0\text{GaInAs-Au}$ -структуры при различных температурах в режиме тока короткого замыкания при освещении со стороны $\text{Ag-N}^0\text{AlGaAs}$

(рис. 4, кривые 1 и 2). В дальнейшем излучение достигает квазинейтральной области базы и гетерограницы $\text{N}^0\text{AlGaAs-n}^+\text{GaAs}$, где фотоотклик имеет противоположный знак (рис. 3, позиции 3, 4 и 5). Позиция 3 соответствует возбуждению носителей с уровня собственных дефектов гетерослоя, а позиция 4 — разделению фотоносителей в области объемного заряда на гетерогранице $\text{N}^0\text{AlGaAs-n}^+\text{GaAs}$ 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 $\text{Ag-N}^0\text{AlGaAs-n}^+\text{GaAs-n}^0\text{GaInAs-Au}$ -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., Саморуков Б. Е. О механизмах усиления фототока в изотипных гетероструктурах $\text{n}^+\text{-GaSb-n}^0\text{-GaInAsSb-n}^+\text{-GaAlAsSb}$ // 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 $\text{n}^+\text{-GaSb-n}^0\text{-GaInAsSb-n}^+\text{-GaAlAsSb}$ // 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 нанoeлектроники.
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 нанoeлектроники.
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