

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМНОВЫХ  
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ  
МНОГОБАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ.**

**Б.М. Абдукаххоров\*, Д.М. Ёдгорова, Д.Б. Истамов**

Базовый докторант в Физико-техническом институте АН РУз, Ташкент.

E-mail: [abduqaxxorov.baxodir@mail.ru](mailto:abduqaxxorov.baxodir@mail.ru) УДК 621.382.23, 621.382.52 тел (+99897 235-11-37)

**Аннотация.** В данной статье рассматриваются темновые электрофизические характеристики многобарьерных фоточувствительных структур на основе арсенида галлия. Приводится анализ их вольтамперных и вольт-емкостных характеристик, что помогает выявить механизмы пробоя, которые не укладываются в существующие теории туннельного или лавинного пробоя. Также описаны особенности разработки новых фотоприемников, обладающих высокой чувствительностью и низким темновым током, что делает их перспективными для применения в оптических системах связи.

**Ключевые слова:** Темновой ток, многобарьерные структуры, арсенид галлия, вольтамперная характеристика, вольт-фарадная характеристика, фотоэлектрическое усиление, оптическая система связи, жидкофазная эпитаксия.

**GALLIY ARSENID ASOSIDAGI KO'PBARERLI FOTOSEZUVCHAN  
STRUKTURALARNING QORONG'ILIKDAGI ELEKTROFIZIK  
XUSUSIYATLARINING EKSPERIMENTAL TADQIQOTLARI**

B.M. Abduqaxxorov\*. D.M. Yodgorova, D.B. Istamov

Fizika-texnika instituti tayanch doktoranti

E-mail: [abduqaxxorov.baxodir@mail.ru](mailto:abduqaxxorov.baxodir@mail.ru) UO'K 621.382.23, 621.382.52 tel (+99897 235-11-37)

**Annotatsiya:** Mazkur maqolada galliy arsenidi asosida yaratilgan ko'pbarerli fotosezgir strukturalarning qorong'likdagi elektro-fizik xususiyatlari ko'rib chiqiladi. Ushbu strukturalarning volt-amper va volt-faradey xarakteristikalari tahlil qilinadi, bu esa tunnel va lavina teshilishining mavjud nazariyalariga to'g'ri kelmaydigan teshilish mexanizmlarini aniqlashga yordam beradi. Shuningdek, yuqori sezgirlikka va past temnoviy tokka ega yangi fotopriemniklarni ishlab chiqish xususiyatlari bayon qilinib, bu qurilmalar optik aloqa tizimlarida qo'llanilishi uchun istiqbolli ekanligi ta'kidlanadi.

**Kalit so'zlar:** Qorong'ulik tok, ko'p to'siqli tuzilmalar, galliy arsenide, volt-amper xususiyati, volt-farad xususiyati, fotoelektrik kuchaytirish, optik aloqa tizimi, suyuq fazasida epitaksis.

**EXPERIMENTAL STUDIES OF DARK ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS  
OF PHOTSENSITIVE MULTI-BARRIER STRUCTURES BASED ON GALLIUM  
ARSENIDE**

B.M. Abduqaxxorov\*. D.M. Yodgorova, D.B. Istamov

Doctoral student of the Institute of Physics and Technology

E-mail: [abduqaxxorov.baxodir@mail.ru](mailto:abduqaxxorov.baxodir@mail.ru) UDC 621.382.23, 621.382.52 tel (+99897 235-11-37)

**Annotation:** This article examines the dark electro-physical characteristics of multi-barrier photosensitive structures based on gallium arsenide. The analysis of their current-voltage and capacitance-voltage characteristics is provided, which helps to identify breakdown mechanisms that do not conform to existing theories of tunneling or avalanche breakdown. Additionally, the article describes the development features of new photodetectors with high sensitivity and low dark current, making them promising for use in optical communication systems.

**Keywords:** *Dark current, multi-barrier structures, gallium arsenide, volt-ampere characteristic, volt-farad characteristic, photoelectric amplification, optical communication system, liquid-phase epitaxy.*

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время оптическая передача сигналов уже практически вытеснила способы передачи информации с помощью электрических сигналов, в силу того, что оптические методы передачи отличаются высокой помехоустойчивостью, большой скоростью передачи данных, возможностью передачи нескольких данных с помощью лишь одного кабеля. Бурное развитие волоконно-оптических систем передачи информации обусловлено с систематическим совершенствованием элементов волоконно-оптических систем [1]: оптических волокон [2], оптических усилителей [3], что в свою очередь требует разработки соответствующих излучателей [4] и фотоприемников [5]. В тоже время начинают разрабатываться новые технологические решения, способствующие созданию нетрадиционных фотоприемников, основанных на низкоразмерных эффектах [6]. С этой целью целесообразно рассмотрение особенностей физических процессов формирования фототоков, видов фотодиодных структур, механизмов усиления фототока и неразрывной связи условий фоточувствительности, а также анализ физико-технологических аспектов нового поколения фотоприемников со свойствами, согласующимися с параметрами оптических волокон.

Момент возникновения фототока можно перемещать в область малых освещенностей за счет уменьшения значений темнового тока каким-либо способом, т.е. уменьшения рекомбинационных центров, снижая концентрацию фоновых примесей-чистые слои меньше шума, а при компенсации шумы не уменьшаются, так как они могут ионизоваться с полем и т.д. [7]. Словом, темновой ток является индикатором фоточувствительности структуры, поэтому наибольший эффект получается на структурах с малыми темновыми токами. Следует отметить, что при значительно больших площадях 4-40 мм<sup>2</sup> путем подбора материала базовой

области и использования физических свойств образования перехода металл-полупроводник в арсениде галлия, а также технологической интеграции перехода металл-полупроводник с выпрямляющим р-п-переходом, обеспечением условий смыкания смежных потенциальных барьеров получены фотодиодные структуры с низкими темновыми токами ( $10^{-(6-7)}$  А/см<sup>2</sup>) и высокой фоточувствительностью (2 до 20 А/Вт).

В частности, получены однобазовые арсенидгаллиевые структуры с прямо и обратно включенными барьерами [8], двухбазовые фотодиодные структуры с барьерами Шоттки и Мотта перспективные для применения в качестве фотовольтаического и фотодиодного приемников излучения [9]. Инжекционно-полевые фотодиоды с оптическим диапазоном, переключаемым с видимой (0.5-0.7 мкм) области спектра на примесную ИК область (1.2÷1.6 мкм) при смене полярности рабочего напряжения и возбуждаемой поверхности, которые представляют интерес для волоконно-оптических систем [10]. Важно отметить, что их изготовление не требует дорогостоящих и сложных технологий, обычном простым способом жидкофазной эпитаксии можно изготовить волноводные фотоприемники с внутренним фотоэлектрическим усилением на основе соединений арсенида галлия.

#### **ТЕХНОЛОГИЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ С Р-П-ПЕРЕХОДАМИ.**

Выращивание различных структур полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  методом жидкофазной эпитаксии осуществляется из раствора-расплава, например, из растворенного мышьяка в галлии и по мере необходимости с добавками замещающих элементов типа алюминия, индия и т.д. на кристаллическую подложку. Для насыщения расплавов в качестве источников использовали арсенид галлия n- и р- типа.

Расплав получали путем нагревания механической смеси Ga+GaAs, содержащей легирующие примеси (например, Zn, Te, Si, Sn). Перед смешиванием арсенид галлия травили в горячем травителе

$3\text{HNO}_3 + \text{HCl} + 2\text{H}_2\text{O}$  в течение 1-3 минут. До и после травления GaAs промывали в кипящем  $\text{CCl}_4$ , дистиллированной воде и просушивали. Для гомогенизации расплава, насыщения и уменьшения неконтролируемых примесей его выдерживали при температуре  $850^\circ\text{C}$  в течение 2-3 часов в потоке водорода.

При росте эпитаксиального слоя решающую роль играет температурный режим наращивания. Толщины эпитаксиальных слоев задавались подбором объема расплавов и продолжительности процесса эпитаксии. Перед загрузкой в лодочку подложки шлифовались порошками поэтапно М-10, М-5 тщательно промывались, обезжиривались в  $\text{CCl}_4$ , а затем полировались на замше алмазной пастой АСМ-3 с добавлением спирта.

После полировки шайбы GaAs разрезались на пластины размером  $1 \times 1 \text{ см}^2$ , и в некоторых случаях, при применении специальных кассет,  $1 \times 2 \text{ см}^2$ . Далее химически очищались и освежались в травителе  $5\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$  в течение 20-30 секунд для удаления механически нарушенного слоя, промывались кипящей дистиллированной воде и просушивались.

В структуре экспериментального образца с металл-полупроводниковым переходом в качестве подложки используется полуизолирующий арсенид галлия с концентрацией носителей порядка  $2.0 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ , а базовая область представляет собой эпитаксиальный слой из твердого раствора  $\text{Al (In)GaAs}$   $n(p)$ -типа проводимости.

На поверхность эпитаксиального слоя напылением в вакууме нанесен полупрозрачный ( $\sim 70 \text{ \AA}$ ) выпрямляющий контакт из Ag (Au), а с тыльной стороны подложки нанесен также полупрозрачный ( $\sim 70 \text{ \AA}$ ) выпрямляющий контакт из Ag (Au). Таким образом, в обычных устройствах, где в одном приеме расплав надвигается на подложку и далее может отрываться от подложки или остается на подложке, имеет место изменение профиля концентрации и состава. В результате были изготовлены трехбарьерные  $m_1$ - $p$ - $n$ - $m_2$ -структуры с площадью  $2 \div 25 \text{ мм}^2$ , в которых  $m_1$ - $p$  и  $n$ - $m_2$ -переходы

оказываются физически соединенными последовательно, а *p-n*-переход - встречно.

Благодаря существованию запираемого перехода при любой полярности смещения, они сохраняют работоспособность при смене полярности рабочего напряжения и являются двухсторонне чувствительными, то есть при подсветке с любой из сторон в них возникает фототок. Общая емкость структуры оказывается близкой к величине определяемой геометрическим размером всей структуры, и составляет  $\sim 0.2 \div 0.5$  пФ/мм<sup>2</sup>.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.**

Для изучения электронных процессов в многослойных структурах с последовательно расположенными выпрямляющими переходами и слоями объемного заряда были исследованы темновые электрофизические. Исследуемые структуры содержат три перехода: один центральный полупроводниковый *p-n*- и два потенциальных барьера металл-полупроводник с высоким значением высоты барьера.

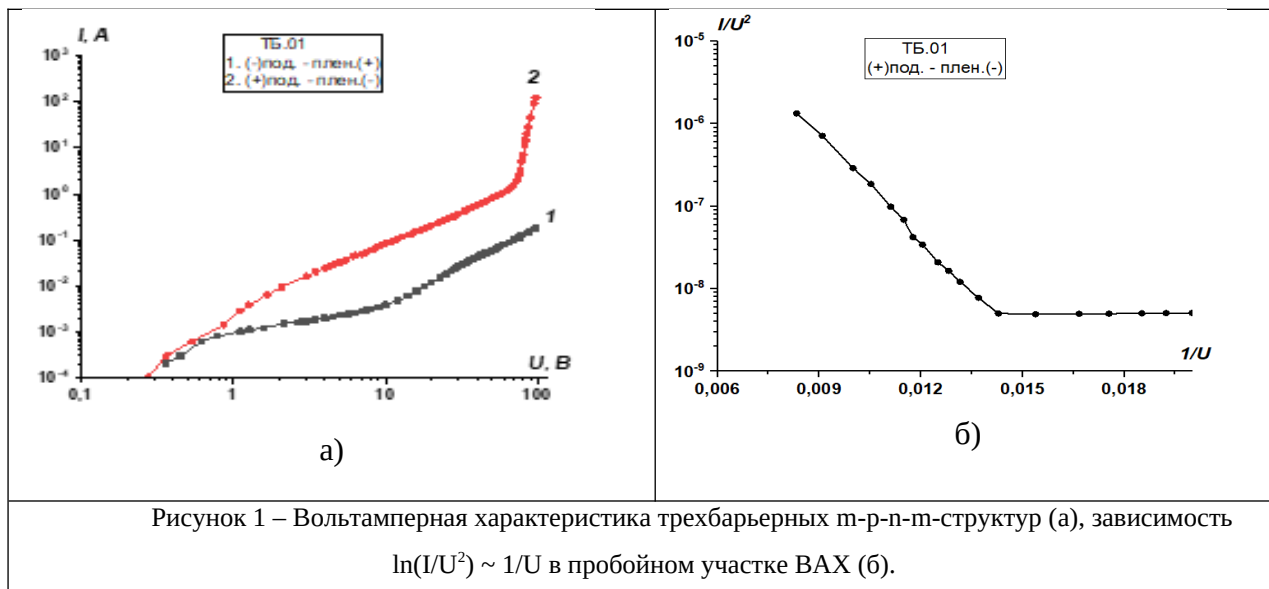
Как показали исследования их вольтамперных, вольт-емкостных характеристик в определенной области начальных напряжений в них проявляются типичные для структуры с тремя последовательно соединенными барьерами зависимости, которые затем при превышении некоторого определенного напряжения ( $U_0$ ) переходят на линейную зависимость, свойственную резисторным структурам.

При этом следует отметить, что даже в области резисторной зависимости проявляются диодные свойства: возникновение фотоэдс, высокие значения сопротивления структуры, низкие зависящие от полярности напряжения емкости, которые свидетельствуют о существовании потенциальных барьеров в данной модифицированной структуре. Исследуемая структура, представляя собой три последовательно прямо и обратно соединенных барьера, при любой полярности рабочего напряжения

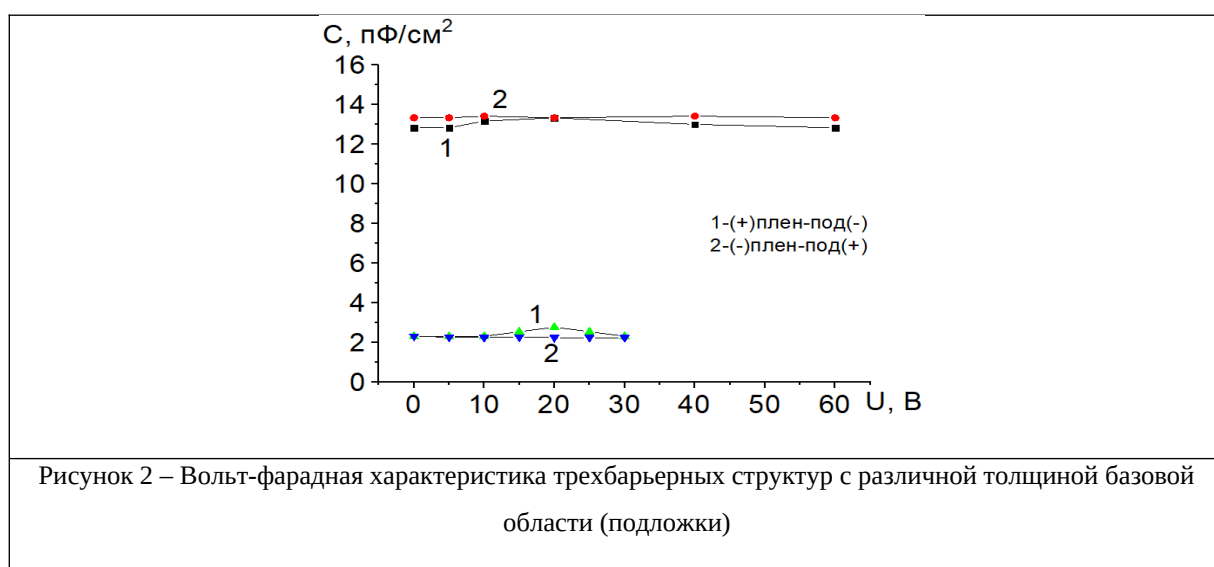
имеет обратно смещенный переход, что приводит к превалированию свойств этого перехода над остальными с повышением рабочего напряжения.

Поэтому зависимость тока от напряжения в исследуемых структурах также должно быть степенной с показателем степени равным 0.5, что и наблюдается на начальных участках токовой зависимости. Однако с увеличением напряжения наблюдаемый линейный характер зависимости тока от напряжения, то есть переход на режим с постоянным омическим сопротивлением невозможно объяснить в рамках существующих представлений о барьерах.

Темновая вольтамперная характеристика исследованных структур в режиме прямого смещения эпитаксиального р-п-перехода имеет резкий подъем после достижения определенного напряжения (Рисунок 1, а), а в другом направлении при обратном смещении эпитаксиального перехода вплоть до 300 В темновой ток от напряжения монотонно растет с линейной зависимостью. На пробойном участке зависимость  $\ln(I/U^2) \sim 1/U$  для всех образцов описывается линейной зависимостью (Рисунок 1, б), что хорошо согласуется с предположением о туннельном механизме пробоя [11]. Таким образом, в качестве особенностей вольтамперной характеристики многобарьерных фотодиодных структур можно обобщить следующее: При внешнем смещении, зависящем от проводимости подложки, в одном режиме возникает пробойный участок с плотностью тока  $1 \text{ мкА/см}^2$ , который не поддается объяснению существующими теориями туннельного или лавинного пробоя и зависит от толщины базовой области, влияя на напряжение пробоя.



Также, были измерены вольт-емкостные характеристики исследуемых структур, результаты которых представлены на рисунке 1. Как видно емкость всех структур не зависит ни от полярности, ни от величины напряжения смещения. Кроме того, величина емкости структур была равна геометрической емкости структуры, определяемой внешними контактами структуры, т.е. структуры имеют наименьшую для этой конструкции емкость, что открывает возможность получения быстродействующих устройств.



### ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В статье рассматриваются особенности экспериментальных исследований темновых электрофизических характеристик

фоточувствительных многобарьерных структур на основе арсенида галлия. Проведенные исследования показали наличие пробойных участков, которые невозможно объяснить существующими теориями пробоя (туннельного или лавинного). Пробойные процессы начинаются при плотности тока  $1 \text{ мкА/см}^2$  и зависят от толщины базовой области. Важной особенностью является создание структур с низкими темновыми токами и высокой фоточувствительностью, что позволяет использовать их в волоконно-оптических системах.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУР

1. J-P Goure and I Verrier. Optical Fibre Devices. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2002. 284 p.
2. Чео П.К. Волоконная оптика. Приборы и системы. Пер. с англ. Литвиновой Г.И. и. Ларина Ю.Т. М. Энергоатомиздат. 1988. С. 32-114.
3. Дураев В.П. и др. Полупроводниковые оптические усилители на длину волны 630–1560 нм. – Фотон-экспресс, 2004, №1, с. 14.
4. Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Кюма, К. Хатитэ “Волоконно-оптические датчики” под ред. Т. Окоси, Пер. С японского, Ленинград, Энергоатомиздат, 1990 г., с. 158-160.
5. Техника оптической связи Фотоприемники // Пер. с англ. М, Мир. 1988. 526 с.
6. Л.В.Асрян, Р.А.Сурис. Теория пороговых характеристик полупроводниковых лазеров на квантовых точках. О б з о р ФТП, 2004, том 38, выпуск 1 ,3-25.
7. Гореленок А.Т., Томасов А.А., Шмидт н.М. и др. p-i-n- структуры на основе высокоомного геттерированного арсенида галлия для детекторов альфа частиц. Письма в ЖТФ. 2006. том.32, вып 22. С. 64-69.
8. A.V. Karimov, D.M. Yodgorova, E.N.Yakubov. Research of structures corrugated photoreceiving surface. Journal Semiconductor Physics Quantum Electronics Optoelectronics. (2004) Vol. 7. number 4, p. 378-382.
9. D.M. Yodgorova, A.V. Karimov, F.A. Giyasova, D.A. Karimova. Research of the photovoltaic effect in the two-base Ag-N AlGaAs-n+GaAs-n GaInAs-Au structure with various thickness of a base. Semiconductor Physics Quantum Electronics Optoelectronics. –Kyiv, 2008. –V. 11. – № 1. – P. 75-79.

10. A.V. Karimov, D.M. Yodgorova. An injection type field-emission photodiode // Radioelectronics and communications systems. № 2. 2006. P. 55-59.
11. Liann-Chern Liou, Bahram Nabet. Applied Optics. 35(1), 15 (1996).