

## Фотоприемники с активной областью InGaAs и метаморфным буферным слоем InGaP, выращенные на подложках GaAs

© И.В. Самарцев<sup>1</sup>, С.М. Некоркин<sup>1</sup>, Б.Н. Звонков<sup>1</sup>, В.Я. Алешкин<sup>2</sup>,  
А.А. Дубинов<sup>2</sup>, И.Ю. Пашенькин<sup>1,2</sup>, Н.В. Дикарева<sup>1</sup>, А.Б. Чигинева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский физико-технический институт  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
607680 Нижний Новгород, Россия

E-mail: waterbox@mail.ru

(Получена 25 апреля 2018 г. Принята к печати 7 мая 2018 г.)

Приводятся результаты исследований обратных темновых токов фотодиодов на длину волны 1.06 мкм, выращенных на подложках GaAs с помощью метаморфного буферного слоя InGaP. Разработана технология выращивания методом МОС-гидридной эпитаксии метаморфных буферных слоев InGaP со ступенчатым изменением состава. Изготовлены фотодиоды с диаметром фоточувствительной площадки 1 мм и входом излучения через подложку. Темновой ток фотодиодов при комнатной температуре и обратном смещении –3 В составил 50 нА. Предполагается, что объемная составляющая темнового тока обусловлена механизмом туннелирования через уровни ловушек.

DOI: 10.21883/FTP.2018.12.46757.36

### 1. Введение

Для передачи информации с помощью Nd:YAG-лазера требуются фотоприемники с узкой спектральной полосой чувствительности. Наиболее подходящим материалом для создания фоточувствительной области фотоприемников на длину волны 1.06 мкм является InGaAs. В настоящий момент широко применяется технология выращивания InGaAs-фотоприемников на достаточно хрупких и дорогостоящих подложках InP. В связи с этим актуальным направлением является разработка технологии выращивания InGaAs-фотоприемников на подложках GaAs, поскольку использование подложек GaAs позволит снизить стоимость фотоприемников и упростить технологию постростовой обработки.

В работе [1] описана структура фотоприемника с входом излучения через подложку на длину волны 1.06 мкм с фоточувствительной областью InGaAs, выращенной на подложке GaAs. В случае освещения через подложку полоса спектральной фоточувствительности таких фотоприемников определяется с длинноволновой стороны шириной запрещенной зоны твердого раствора, а с коротковолновой — шириной запрещенной зоны подложки. Схема фотоприемника с освещением через подложку имеет определенные преимущества перед обычной схемой. Во-первых, сплошной металлический контакт со стороны фоточувствительной области обеспечит более низкое последовательное сопротивление прибора, что должно положительно сказаться на его инерционности и что характерно для приборов с большой рабочей площадью [2]. Во-вторых, в условиях работы при облучении быстрыми заряженными частицами, например, протонами с энергией в несколько МэВ, активная область защищена с одной стороны подложкой, а с другой

слоем металла, который может быть сделан достаточно толстым. Однако получение фоточувствительного слоя InGaAs на длину волны 1.06 мкм высокого кристаллического качества на подложке GaAs требует выращивания метаморфного буферного слоя, предохраняющего активную область прибора от проникновения дислокаций несоответствия, возникающих из-за различия параметров кристаллической решетки подложки и твердого раствора в активном слое. В работе [1] таким буферным слоем являлся сильно легированный донорами слой InGaAs с содержанием индия, немного меньшим, чем в фоточувствительной области. Это позволило уменьшить спектральную полосу фоточувствительности, но значительно увеличило поглощение света в буферном слое. В работе [2] описана структура фотоприемника на длину волны 1 мкм с фоточувствительной областью InGaAs, выращенная на подложке GaAs с метаморфным буферным слоем InGaP, который формировался посредством роста нескольких десятков тонких слоев. Каждый слой имел постоянный состав, при этом от слоя к слою состав изменяли, чтобы осуществить переход от параметра решетки GaAs к параметру решетки твердого раствора  $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ .

В настоящей работе, в отличие от [2], приведены результаты исследований InGaAs-фотоприемников с метаморфным буферным слоем InGaP. Показано, что применение метаморфного буфера InGaP, выращенного на подложке GaAs, способствует получению более высокого качества фоточувствительной области InGaAs по сравнению с метаморфным буфером InGaAs. Кроме того, увеличивается доля излучения, поглощаемого активной областью, поскольку InGaP будет являться широкозонным „окном“ для излучения с длиной волны в области 1 мкм. Таким образом, применение метаморф-

Конструкция исследуемых структур

Слой	Толщина слоя, нм
$n^+$ -GaAs	Подложка
$n$ -GaAs	150
$n$ -InGaP	1200
$n$ -InGaAs	150
$i$ -InGaAs	450
$p$ -InGaAs	300

ного буфера InGaP в перспективе позволит увеличить обнаружительную способность фотодиодов.

## 2. Создание экспериментальных образцов

Исследуемые фоточувствительные структуры были получены методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений) при атмосферном давлении в горизонтальном кварцевом реакторе. На подложке GaAs выращивался буферный слой GaAs, метаморфный слой InGaP со ступенчатым изменением состава, затем фоточувствительная область InGaAs (см. таблицу). Метаморфный буфер InGaP состоит из 6 переходных слоев постоянного состава, верхний переходный слой метаморфного буфера имеет большую толщину для релаксации напряжений. Образцы выращивались при температуре 600°C, средняя скорость роста составила 0.51 нм/с.

Со стороны структуры были нанесены омические контакты AuGe методом термического испарения в вакууме, затем была вытравлена мезаструктура диаметром 1 мм. Со стороны подложки нанесены точечные омические контакты методом электроискрового вжигания олова. С целью уменьшения влияния поверхностных темновых токов проведена очистка и пассивация поверхности образцов методами реактивного ионного травления с последующим термическим окислением в атмосфере кислорода.

## 3. Экспериментальное исследование фотоприемников

С целью выявления механических напряжений и исследования кристаллического качества активной области InGaAs фотодиодная структура GaAs/InGaP/InGaAs с метаморфным буферным слоем InGaP градиентного состава была исследована в режиме латерального сканирования поперечных сколов методом конфокальной спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС).

Измерение спектров КРС от поперечного скола (плоскости (110)) гетероструктуры проводилось на установке NTEGRASPECTRA производства NT-MDT при комнатной температуре с использованием лазера с длиной волны 473 нм. Излучение фокусировалось 100×кратным

объективом с апертурой  $N_A = 0.95$  в пятно диаметром  $\sim 1$  мкм, мощность пучка составляла  $\sim 0.5$  мВт, ширина пучка на половине распределения интенсивности, определяющая пространственное разрешение метода, составляла  $\sim 300$  нм [3]. Латеральное сканирование проводилось с шагом 40 нм вдоль направления роста структуры (001). Для качественного определения наличия механических напряжений было использовано распределение по координате сканирования  $z$  частотного положения  $\nu$  GaAs-подобной ТО-моды (transverse optical mode) твердого раствора InGaAs (рис. 1), поскольку она являлась разрешенной в данной геометрии и имела высокую интенсивность.

Частотное положение GaAs-подобной ТО-моды твердого раствора InGaAs слабо изменяется при приближении координаты сканирования к гетерогранице с метаморфным буферным слоем, что свидетельствует об отсутствии механических напряжений в активной области структуры и постоянном составе.

Распределение по координате частоты InP-подобной ТО-моды твердого раствора InGaP отражает изменение его состава и деформации. Как видно из рисунка, вблизи гетерограницы частота сначала становится постоянной, а около самой границы немного увеличивается, что свидетельствует о наличии небольших напряжений сжатия верхнего переходного слоя метаморфного буфера вблизи границы.

Для исследования кристаллического качества активной области было получено распределение по координате сканирования полной ширины на половине интенсивности (FWHM) суперпозиции пиков DATO- (disorder activated transverse optical) и GaAs-подобной ТО-моды твердого раствора InGaAs (рис. 2). Полная ширина суперпозиции пиков DATO- и GaAs-подобной ТО-моды твердого раствора InGaAs практически постоянна по толщине слоя, что может являться свидетельством неизменности его кристаллического качества.

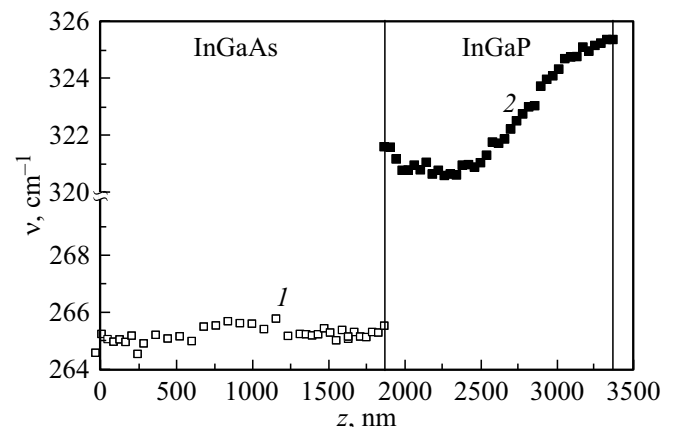
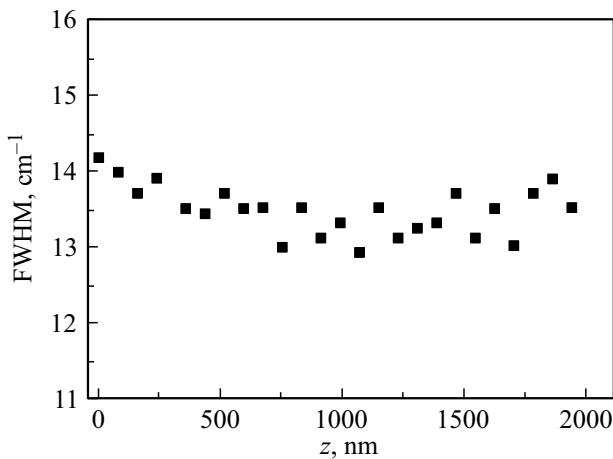
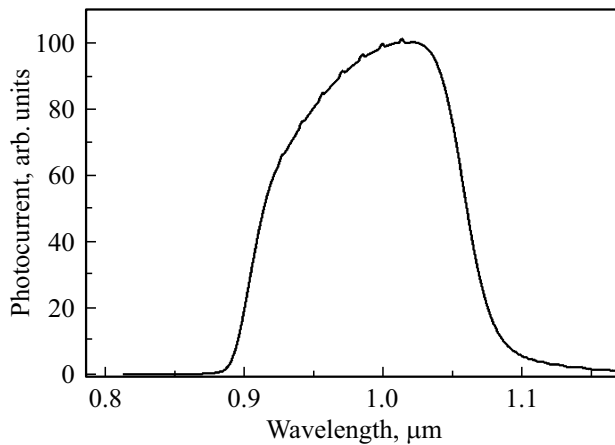


Рис. 1. Распределение по координате сканирования  $z$  частотного положения пиков КРС: 1 — GaAs-подобная ТО-мода твердого раствора InGaAs; 2 — InP-подобная ТО-мода твердого раствора InGaP.



**Рис. 2.** Распределение по координате сканирования  $z$  полной ширины на половине интенсивности (FWHM) суперпозиции пиков DATO- и GaAs-подобной TO-моды твердого раствора InGaAs.



**Рис. 3.** Спектральная характеристика фототока диодов, изготовленных на основе структуры с метаморфным буферным слоем InGaP.

Спектральные характеристики фототока исследуемых структур измерялись при комнатной температуре. В качестве источника излучения в эксперименте использовалась галогеновая лампа. Модулированный свет лампы фокусировался с помощью собирающей линзы на входной щели монохроматора. После прохождения монохроматора свет падал на исследуемый образец, который и являлся фотоприемником. Управление положением решетки монохроматора и запись сигнала осуществлялись с помощью автоматизированного модуля с программным управлением и синхронного детектора, разработанных в НИФИ ННГУ.

На рис. 3 показан характерный спектр фототока структуры с метаморфными буферными слоями InGaP. Фототок наблюдается в диапазоне 0.91–1.05 мкм с максимумом на длине волны 1.03 мкм. Из рис. 3 видно, что для наших структур характерно быстрое нарастание фототока, поскольку слой InGaP пропускает излучение

в данном диапазоне длин волн и поглощение излучения осуществляется только в фоточувствительной области фотодиода.

В настоящее время актуальна задача повышения обнаружительной способности  $D$  фотодиодов. Величина  $D$  связана с характеристиками фотоприемника следующим выражением [4]:

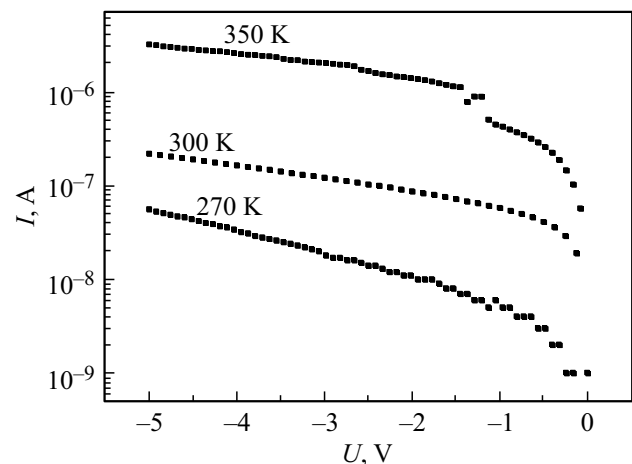
$$D = S_i \left( \frac{A}{qI_d \Delta f} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $S_i$  — токовая монохроматическая чувствительность,  $A$  — площадь чувствительной площадки,  $q$  — заряд электрона,  $I_d$  — величина обратного темнового тока,  $\Delta f$  — полоса пропускания фотоприемника. Из (1) видно, что для увеличения обнаружительной способности фотодиода необходимо уменьшить его обратный темновой ток. Для InGaAs-фотодиодов, выращенных на подложках InP, достигнута величина  $I_d = 10$  нА при обратном смещении  $-5$  В и диаметре фоточувствительной области 1 мм [5]. InGaAs-фотодиоды на подложках GaAs с низкими темновыми токами в настоящий момент находятся в стадии научной разработки.

Темновой ток фотодиода зависит от ширины запрещенной зоны твердого раствора и механизма протекания темнового тока. Существует несколько таких механизмов: диффузионный, генерационно-рекомбинационный, межзонное туннелирование, туннелирование через уровни ловушек [6]. Чтобы уменьшить  $I_d$ , необходимо выяснить механизм протекания тока. Для каждого механизма характерна своя энергия активации:

$$I_d \propto \exp \left[ -\frac{E}{kT} \right], \quad (2)$$

где  $E$  — энергия активации механизма протекания темнового тока,  $T$  — температура,  $k$  — постоянная Больцмана. Таким образом, природу темнового тока можно определить из зависимости тока  $I_d$  от температуры.



**Рис. 4.** Обратные вольт-амперные характеристики  $I(U)$  фотодиодов при различных температурах.

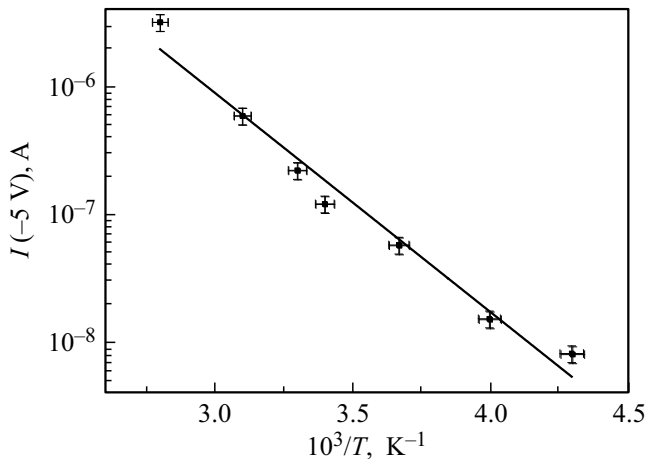


Рис. 5. Зависимость обратного тока фотодиода от температуры при фиксированном смещении.

Для полученных нами фотодиодов GaAs/InGaP/InGaAs проведены исследования обратной ветви вольт-амперной характеристики  $I(U)$  в диапазоне температур 230–350 К (рис. 4). Вольт-амперные характеристики измерялись на автоматизированной установке Keithley 2440, температура измерений задавалась с помощью элемента Пельтье.

Энергия активации  $E$  процесса протекания темнового тока определялась из зависимости логарифма темнового тока от температуры  $T$  (рис. 5). Линейная аппроксимация экспериментальных точек с коэффициентом корреляции  $R = 0.9$  позволила определить показатель экспоненты функции (2), откуда легко находится  $E = 0.1$  эВ. Поскольку значение  $E$  много меньше ширины запрещенной зоны твердого раствора InGaAs ( $E_g = 1.16$  эВ), наблюдаемый нами темновой ток, по-видимому, связан с туннелированием носителей через уровни ловушек, расположенные в запрещенной зоне. Источниками этих уровней могут являться точечные дефекты, возникающие в процессе выращивания эпитаксиальных слоев, или неконтролируемые примеси.

Таким образом, уменьшить темновой ток в фотодиодах GaAs/InGaP/InGaAs можно за счет увеличения времени жизни носителей заряда путем устранения точечных дефектов в активной области InGaAs. Для этого необходимо подобрать режимы отжига структур, что является предметом наших дальнейших исследований.

#### 4. Заключение

Методом МОС-гидридной эпитаксии созданы фотодиодные структуры GaAs/InGaP/InGaAs и изготовлены фотодиоды с диаметром рабочей площадки 1 мм на длину волны 1.06 мкм.

Проведены исследования кристаллического качества гетероструктур GaAs/InGaP/InGaAs методом комбинационного рассеяния света, выявлено отсутствие механических напряжений в активной области InGaAs.

Изучена природа обратного темнового тока фотодиодов. Предполагается, что объемная составляющая обратного тока определяется туннелированием носителей заряда через уровни ловушек, расположенные в запрещенной зоне.

Авторы выражают благодарность сотруднику ИФМ РАН П.А. Юнину и сотруднику НИФТИ ННГУ А.В. Здороевичеву за помощь в измерениях и подготовку образцов.

Работа выполнена в рамках государственного задания №16.7443.2017/БЧ.

#### Список литературы

- [1] Л.М. Канская, А.Ю. Куликов. Письма ЖТФ, **21** (5), 21 (1995).
- [2] Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин, М.В. Карзанова, Н.В. Дикарева. *Сб. трудов конф. НИИ измерительных систем им. Ю.Е. Седакова* (2014) р. 102.
- [3] С.М. Планкина, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, Н.Ю. Коннова, А.В. Нежданов, И.Ю. Пашенькин. ФТП, **11** (50), 1561 (2016).
- [4] И.А. Андреев, О.Ю. Серебренникова, Н.Д. Ильинская, А.А. Пивоварова, Г.Г. Коновалов, Е.В. Куницына, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **12** (49), 1720 (2015).
- [5] <http://www.dilas.ru/>
- [6] А.В. Сорочкин, В.С. Варавин, А.В. Предсин, И.В. Сабинина, М.В. Якушев. ФТП, **4** (46) 551 (2012).

Редактор Л.В. Шаронова

#### Photodetectors with an InGaAs active region and an InGaP metamorphic buffer layer grown on GaAs substrates

I.V. Samartsev<sup>1</sup>, S.M. Nekorkin<sup>1</sup>, B.N. Zvonkov<sup>1</sup>, V.Ya. Aleshkin<sup>2</sup>, A.A. Dubinov<sup>2</sup>, I.J. Pashenkin<sup>1,2</sup>, N.V. Dikareva<sup>1</sup>, A.B. Chigineva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Physical Technical Research Institute of Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup>Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences, 607680 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** The paper shows the results of a dark current studies of photodiodes for the wavelength of 1.06  $\mu\text{m}$  grown on GaAs substrates using an InGaP metamorphic buffer layer. The MOCVD method technology for growing metamorphic InGaP buffer layers with a stepwise change in composition has been developed. Photodiodes with the 1 mm diameter photosensitive area and input of radiation through the substrate was produced. The dark current of the photodiodes at room temperature was 50 nA at the votage of  $-3$  V. It is possible, the volume component of the dark current is due to the tunneling mechanism through the energy levels of the traps.