

Повышение спектральной чувствительности фотодиодов для средней инфракрасной области спектра

© Е.В. Куницына, Е.А. Гребенщикова, Г.Г. Коновалов, И.А. Андреев, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: kunits@iropt9.ioffe.ru

(Получена 18 апреля 2016 г. Принята к печати 28 апреля 2016 г.)

Применен новый метод повышения спектральной чувствительности фотодиодов на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb для спектрального диапазона 1.1–2.4 мкм. Показано, что формирование рельефа в виде углублений на тыльной неосвещаемой поверхности фотодиодного чипа, свободной от металлизации, позволяет увеличить спектральную чувствительность фотодиодов в интервале длин волн 1.8–2.4 мкм. Наибольшее увеличение, до 53% в максимуме, по сравнению с чувствительностью традиционных фотодиодов со сплошной металлизированной тыльной поверхностью чипа наблюдается для фотодиодов, чипы которых имеют мелкие углубления радиусом 30 мкм. Данные приборы могут найти широкое применение в системах для измерения количества воды в нефтепродуктах, влажности бумаги, почвы и зерна.

1. Введение

На протяжении нескольких десятилетий как научные группы, так и производственные компании уделяют внимание фотодиодам на основе соединения GaSb и его твердых растворов. В лаборатории инфракрасной оптоэлектроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе были разработаны неохлаждаемые фотодиоды, в том числе лавинные, на основе узкозонных твердых растворов GaInAsSb для спектрального диапазона 1.8–2.4 мкм [1–3]. Данные приборы могут использоваться в лазерно-диодной спектроскопии, лазерной дальнометрии и локации, в системах для экологического мониторинга, медицинской диагностики, для измерения количества воды в нефтепродуктах, влажности бумаги, почвы и зерна [4–6]. Новым направлением применения приемников такого типа является высокочастотная беспроводная связь по атмосферному каналу [7].

Для увеличения обнаружительной способности D^* фотодиодов широко применяются внешние концентраторы излучения в виде параболических отражателей или линз [8,9]. Эффект достигается за счет увеличения площади сбора излучения. При этом параболические отражатели и линзы ограничивают угол зрения фотодиода и увеличивают его габариты, что не позволяет использовать такую конструкцию в некоторых областях применения. В работе [10] наклонные стенки глубокой мезы, созданной за счет многостадийного травления, служили „встроенным“ оптическим концентратором, увеличивающим площадь сбора излучения в флип-чип фотодиоде на основе GaInAsSb до 2.9 раз при широком угле зрения.

Данное исследование является продолжением цикла работ по повышению спектральной чувствительности и соответственно обнаружительной способности фотодиодов для средней инфракрасной области спектра. Ранее нами был предложен относительно простой метод повышения спектральной чувствительности фотодиодов с граничной длиной волны 4.8 мкм на основе

гетероструктуры InAs/InAsSb/InAsSbP за счет эффекта многократного переотражения излучения от поверхности полусферических углублений на неосвещаемой поверхности фотодиодного чипа [11,12]. Целью настоящей работы было исследование возможности применения данного метода для повышения спектральной чувствительности фотодиодов на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb для спектрального диапазона 1.1–2.4 мкм.

2. Получение экспериментальных образцов

Гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb для создания экспериментальных образцов фотодиодов выращивались методом жидкофазной эпитаксии на подложках n -GaSb ориентации (100), легированной теллуром до концентрации носителей $(1-5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. В качестве компонентов шихты для выращивания твердых растворов использовались бинарные соединения InSb, GaSb, InAs. Для выращивания Al-содержащего твердого раствора применялись также Ga, Al и насыщающая подложка GaAs для введения мышьяка в жидкую фазу. Средняя скорость роста составляла 3.0–4.0 мкм/мин для GaInAsSb и 1.0–1.5 мкм/мин для GaAlAsSb. Активная область фотодиода GaInAsSb легировалась теллуром до концентрации электронов $n = (5-20) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, в то время как широкозонное „окно“ GaAlAsSb — германием до концентрации дырок $p = (6-8) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Значение ширины запрещенной зоны при температуре $T = 300 \text{ K}$ было определено из результатов исследования спектров фотолюминесценции и с помощью интерполяционной формулы [13] как 0.53 эВ для твердого раствора GaInAsSb и 1.1 эВ для GaAlAsSb. Толщина слоя активной области n -GaIn_{0.22}AsSb составила 1.5–2.5 мкм, широкозонного „окна“ p -GaAl_{0.34}AsSb — 1.5–2.0 мкм.

Для изготовления фотодиодов были использованы три образца гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb —

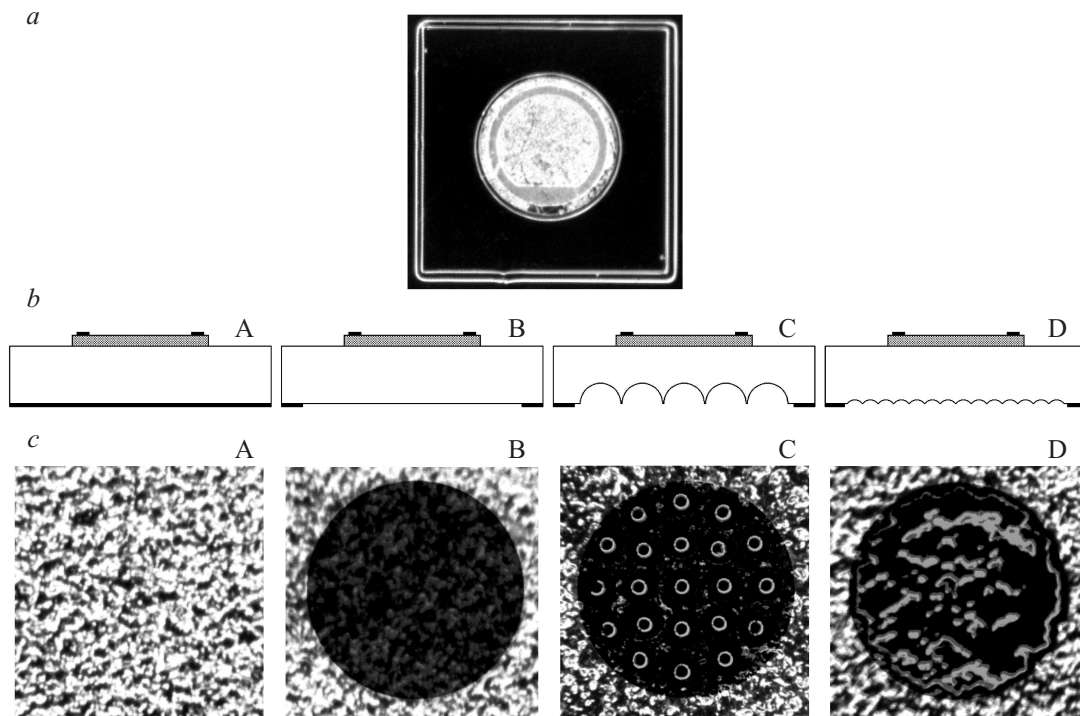


Рис. 1. Изображения фотодиодных чипов А, В, С, D с различным рельефом тыльной стороны: *a* — микрофотография лицевой поверхности, *b* — схематические изображения поперечного сечения, *c* — микрофотографии тыльной поверхности. А — чипы со сплошной металлизированной тыльной поверхностью, В — чипы со свободной от металлизации областью диаметром 880 мкм в центральной части металлизированной тыльной поверхности, С — чипы с полусферическими углублениями радиусом 60 мкм на свободной от металлизации части тыльной поверхности, D — чипы с мелкими углублениями радиусом 30 мкм в плоскости поверхности чипа и глубиной 2–3 мкм на свободной от металлизации части тыльной поверхности.

M501, M518 и M729. Из выращенных образцов гетероструктур методами контактной фотолитографии и жидкостного химического травления были созданы фотодиодные чипы четырех типов А, В, С и D. Для всех четырех типов лицевая поверхность была одинаковой, однако тыльная поверхность имела существенные различия.

Микрофотография лицевой поверхности фотодиодных чипов А, В, С и D, полученная методом оптической микроскопии, приведена на рис. 1, *a*. Как видно из рисунка, со стороны эпитаксиальных слоев чип имеет форму квадрата (со стороной 950 мкм), в центре которого сформирована меза в виде диска (диаметром 500 мкм и высотой 18 мкм). За пределами мезы эпитаксиальные слои удалены полностью, до подложки GaSb, химическим травлением.

Лицевой омический контакт Cr/Au–Ge/Au в форме кольца с внешним диаметром 460 мкм, шириной 30 мкм и контактной площадкой был сформирован методом термического вакуумного напыления с последующим вжиганием при температуре $T = 250\text{--}300^\circ\text{C}$ в атмосфере водорода.

Основные различия конструкции фотодиодных чипов четырех типов А, В, С и D состояли в различном рельефе неосвещаемой тыльной поверхности со стороны подложки GaSb и разной площади металлизированной части тыльной поверхности. Схематические изображения

поперечного сечения и микрофотографии тыльной поверхности чипов А, В, С и D со стороны подложки GaSb приведены на рис. 1, *b, c*. Конструкция чипов типа А является традиционной для фотодиодов с освещением со стороны эпитаксиальных слоев и представляет собой сплошную металлизированную поверхность, где контакт Cr/Au–Te/Au к подложке *n*-GaSb покрывает тыльную поверхность чипа площадью 0,9 мм² полностью. Фотодиодные чипы В отличаются от чипов А тем, что в центральной части тыльной поверхности чипа создан круг диаметром 880 мкм, свободный от металлизации. В фотодиодных чипах С на тыльной поверхности, свободной от металлизации, сформированы упорядоченные углубления в форме полусфер с радиусом 60 мкм. Чипы четвертого типа D имеют на тыльной поверхности, свободной от металлизации, мелкие углубления радиусом 30 мкм в плоскости поверхности чипа и глубиной 2–3 мкм (см. рис. 2).

Для описанной выше конструкции фотодиодных чипов А, В, С и D излучение, падающее на фоточувствительную площадку мезы с лицевой стороны чипа, свободно проходит широкозонное окно GaAlAsSb и поглощается в активной области GaInAsSb, где и располагается область пространственного заряда. В данном случае созданные фотонами электронно-дырочные пары сразу же разделяются электрическим полем *p*–*n*-перехода.

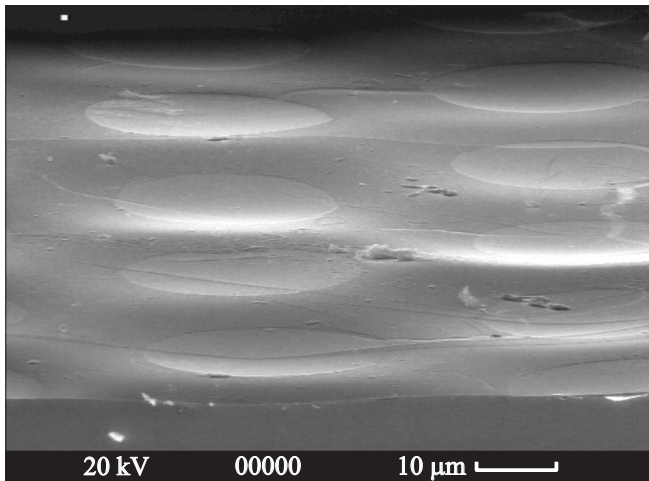


Рис. 2. СЭМ-изображение тыльной поверхности чипа D (см. рис. 1) с мелкими углублениями на свободной от металлизации части тыльной поверхности.

По нашим расчетам, для полного поглощения и обеспечения максимальной квантовой эффективности необходимо иметь толщину активной области ~ 3 мкм. В рассматриваемых нами гетероструктурах толщина n -GaIn_{0.22}AsSb составляет 1.5–2.5 мкм, поэтому непоглотившееся излучение с длиной волны 1.8–2.4 мкм достигает тыльной поверхности чипа. Излучение с длиной волны ~ 1.8 мкм, падающее на лицевую поверхность фотодиодного чипа вне фоточувствительной площадки, свободно проникает в прозрачную для данного излучения подложку GaSb толщиной 200 мкм и также достигает тыльной поверхности чипа.

Площадь чипа составляет 0.9 мм², при этом площадь фоточувствительной площадки мезы — 0.196 мм². Таким образом, площадь лицевой поверхности чипа, через которую падающее излучение проникает в подложку, значительно (в 4.5 раза) больше площади p – n -перехода.

Для проведения исследований электрических и фотоэлектрических характеристик фотодиодные чипы монтировались тыльной стороной на корпус ТО-18 с двумя выводами.

3. Экспериментальное оборудование и методики исследования

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) фотодиодов исследовались с помощью автоматизированного измерителя ВАХ. Напряжение U источника питания изменялось дискретно с шагом $\Delta U = 0.05$ В. Значения приложенного напряжения и соответствующего ему темнового тока, протекающего через фотодиод, регистрировались в цифровом виде. Полученные данные обрабатывались с помощью компьютерной программы, ВАХ в графическом виде и значения дифференциального сопротивления R_0 выводились в режиме реального времени на монитор компьютера.

Измерения спектров фоточувствительности исследуемых образцов фотодиодов проводились по схеме синхронного детектирования с использованием призматического монохроматора SPM2 (Carl Zeiss), механического модулятора и синхронного детектора Stanford Research System SR830. Ключевым дисперсионным элементом монохроматора являлась призма LiF. Излучение от глобара фокусировалось конденсорным зеркалом на входную щель монохроматора. Механический модулятор обеспечивал частоту модуляции излучения $f = 500$ Гц. Величина фототока измерялась при подключении исследуемых фотодиодов в фотогальваническом режиме с малым нагрузочным сопротивлением 100 Ом, так как анализ значений дифференциального сопротивления различных образцов показал, что фотодиодные мезаструктуры обладают дифференциальным сопротивлением R_0 от 1 до 10 кОм. Сигнал с нагрузочного сопротивления измерялся синхронным детектором сигналов. Для определения токовой монохроматической чувствительности использовался метод сравнения с калиброванным приемником излучения.

4. Экспериментальные результаты и обсуждение

Зависимость токовой монохроматической чувствительности от длины волны $S_I(\lambda)$ при $T = 300$ К для фотодиодов с чипами четырех типов А, В, С и D (см. рис. 1) на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с тонкой активной областью, толщиной 1.5–2.0 мкм, представлена на рис. 3. Зависимость является статистически усредненной по всему количеству фотодиодов каждого типа, изготовленных из одного и того же образца гетероструктуры M518. Фотодиоды имеют спектральное распределение чувствительности (не менее 10% от мак-

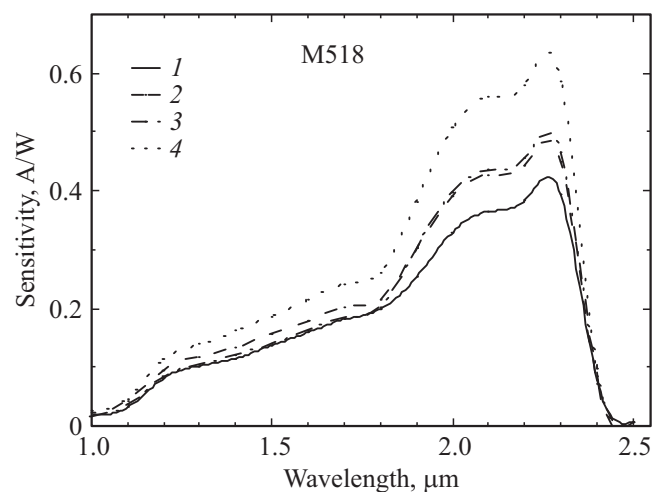


Рис. 3. Статистически усредненная зависимость монохроматической чувствительности от длины волны при $T = 300$ К для фотодиодов GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb четырех типов (см. рис. 1): с чипами А (1), В (2), С (3), D (4).

симальной) в диапазоне от 1.1 до 2.4 мкм с максимумом в области 2.0–2.3 мкм.

Как видно из рисунка, в интервале длин волн 1.8–2.4 мкм токовая монохроматическая чувствительность фотодиодов с чипами В со свободной от металлизации областью на тыльной стороне имеют токовую монохроматическую чувствительность больше (на 15–17% в максимуме чувствительности) по сравнению с чувствительностью фотодиодов традиционной конструкции, тыльная поверхность чипов которых металлизирована полностью (А). Для фотодиодов с чипами С с полусферическими углублениями радиусом 60 мкм на свободной от металлизации тыльной поверхности наблюдается увеличение спектральной чувствительности в максимуме чувствительности на 25–27% по сравнению с чувствительностью фотодиодов типа А. Уменьшение радиуса и глубины полусферических углублений приводит к дополнительному росту спектральной чувствительности. Так, на фотодиодах с чипами D с мелкими углублениями радиусом 30 мкм в плоскости поверхности чипа наблюдается наибольшее из всех четырех типов конструкции увеличение спектральной чувствительности в максимуме — до 53% по сравнению с чувствительностью фотодиодов типа А. Как видно из рис. 3, токовая монохроматическая чувствительность таких фотодиодов составляет 0.56 А/Вт, в то время как для традиционных фотодиодов с чипами типа А — 0.37 А/Вт.

Полученные результаты можно объяснить тем, что для фотодиодов различия в конструкции приводят к существенным различиям в процессах, связанных с прохождением и отражением излучения. Для чипов типа А (рис. 3, кривая 1) со сплошной металлизированной тыльной поверхностью излучение, падающее на лицевую поверхность за пределами фоточувствительной площадки мезы, свободно проходит подложку GaSb и в основном, поглощается на границе раздела подложка–(омический контакт) в области эвтектики (эвтектический сплав образуется на границе *n*-GaSb–металл после термического вжигания контактов). Это подтверждается характером зависимости токовой монохроматической чувствительности фотодиодов от длины волны (рис. 3, кривая 1).

В фотодиодных чипах типа В (рис. 3, кривая 2) часть излучения достигает тыльной поверхности чипа, свободной от металлизации, отражается и, поглощаясь в активной области гетероструктуры GaInAsSb, дает вклад в увеличение спектральной чувствительности фотодиода. Однако в данном случае излучение не может многократно менять направление распространения.

В фотодиодных чипах С и D (рис. 3, кривые 3, 4) с углублениями на свободной от металлизации части тыльной поверхности излучение с длиной волны > 1.8 мкм, падающее вне фоточувствительной площадки, достигает тыльной поверхности чипа и многократно отражается от поверхности полусферических углублений (границы полупроводник–воздух). В результате излучение многократно меняет направление распространения в кристалле за счет отражения от поверхности

углублений и затем в основном поглощается в активной области GaInAsSb, давая дополнительный вклад в увеличение спектральной чувствительности, либо выходит за пределы кристалла. В результате такая конструкция чипа позволяет увеличить эффективную площадь сбора излучения.

Как видно из рис. 3, увеличение спектральной чувствительности наблюдалось и в более коротковолновой части спектра 1.2–1.8 мкм. Данное явление имело место в двух образцах гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb из трех. Поскольку подложка GaSb не является прозрачной для излучения с длиной волны < 1.8 мкм, т.е. должны быть практически полные потери на межзонном поглощении, такое увеличение чувствительности предполагает наличие другого физического явления, участвующего в фотоэлектрообразовании в этой области спектра. Мы предполагаем, что увеличение чувствительности в данной области может быть связано с явлением переизлучения. Коротковолновое излучение, падающее на лицевую поверхность чипа вне фоточувствительной площадки, переизлучается на большей длине волны, и коротковолновая часть его спектра будет поглощаться, а длинноволновая достигать тыльной стороны чипа. Для излучения, достигшего тыльной стороны чипа, будут действовать механизмы увеличения чувствительности, описанные выше для диапазона длин волн 1.8–2.4 мкм.

Таким образом, формирование на тыльной поверхности фотодиодного чипа свободной от металлизации области (В) или рельефа в виде углублений на части поверхности, свободной от металлизации (С, D), приводит к увеличению спектральной чувствительности фотодиода в интервале длин волн 1.8–2.4 мкм по сравнению с чувствительностью фотодиодов традиционной конструкции со сплошной металлизированной тыльной поверхностью чипа (А). Для всех образцов гетероструктур (M501, M518 и M729) наибольшее увеличение — от 15 до 53% в зависимости от образца — наблюдается для фотодиодов с чипами D с мелкими углублениями радиусом 30 мкм в плоскости поверхности чипа и глубиной 2–3 мкм на свободной от металлизации части тыльной поверхности.

В ряде случаев для двух (M501, M729) из трех образцов гетероструктуры наблюдалось уменьшение величины обратного темного тока для фотодиодов с чипами D с мелкими углублениями радиусом 30 мкм на свободной от металлизации части тыльной поверхности. Статистически усредненные зависимости темного тока фотодиодов от напряжения приведены на рис. 4. Как видно из рисунка, величина темного тока при напряжении обратного смещения $U = 1$ В для фотодиодов с чипами типа D меньше на 60% по сравнению с традиционными фотодиодами типа А со сплошной металлизированной тыльной поверхностью. Такое уменьшение величины темного тока фотодиода можно объяснить следующим образом. Темновой ток фотодиода состоит из объемной составляющей и поверхностной составляющей, обусловленной наличием поверхностных утечек.

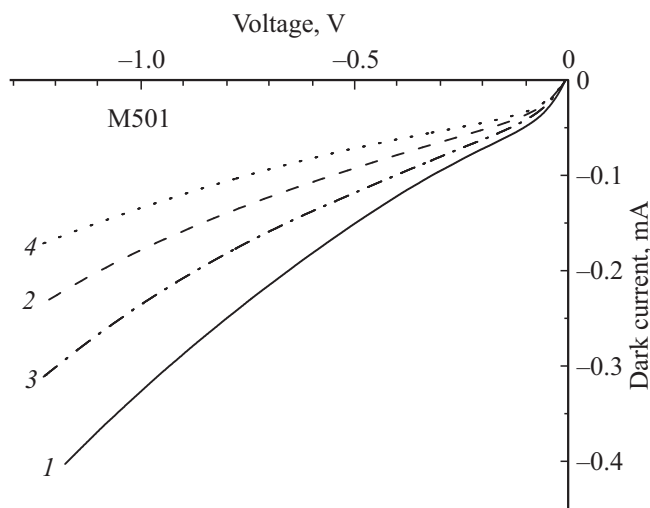


Рис. 4. Статистически усредненная зависимость темного тока от напряжения для фотодиодов GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb четырех типов (см. рис. 1): с чипами А (1), В (2), С (3), D (4).

Создание углублений на тыльной стороне чипа приводит к возрастанию эффективной площади поверхности чипа, что, в свою очередь, ведет к увеличению поверхностного сопротивления и соответственно к уменьшению поверхностной составляющей темного тока.

5. Заключение

Проведены сравнительные исследования фотоэлектрических характеристик фотодиодов на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с одинаковой лицевой, но различной тыльной поверхностью фотодиодного чипа. Показано, что при формировании на свободной от металлизации части тыльной поверхности чипа рельефа в виде углублений в интервале длин волн 1.8–2.4 мкм наблюдается увеличение спектральной чувствительности фотодиода по сравнению с чувствительностью фотодиодов традиционной конструкции со сплошной металлизированной тыльной поверхностью чипа. При этом наибольшее увеличение спектральной чувствительности, до 53% в максимуме, наблюдается для фотодиодов, чипы которых имеют мелкие углубления радиусом 30 мкм на свободной от металлизации части тыльной поверхности. Такое увеличение происходит за счет многократного переотражения и изменения направления распространения излучения в гетероструктуре, что позволяет увеличить эффективную площадь сбора излучения. Данные приборы могут найти широкое применение в системах для измерения количества воды в нефтепродуктах, влажности бумаги, почвы и зерна.

Авторы выражают благодарность Н.В. Власенко за напыление контактов и С.И. Трошкову за создание СЭМ-микротопографий.

Список литературы

- [1] И.А. Андреев, М.А. Афрайлов, А.Н. Баранов, В.Г. Данильченко, М.А. Мирсагатов, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **12** (21), 1311 (1986).
- [2] И.А. Андреев, М.А. Афрайлов, А.Н. Баранов, М.А. Мирсагатов, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **13** (8), 481 (1987).
- [3] И.А. Андреев, М.А. Афрайлов, А.Н. Баранов, М.А. Мирсагатов, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **14** (11), 986 (1988).
- [4] Е.В. Степанов. *Диодная лазерная спектроскопия и анализ молекул и биомаркеров* (М., Физматлит, 2009).
- [5] К.В. Калинина, С.С. Молчанов, Н.Д. Стоянов, А.П. Астахова, Х.М. Салихов, Ю.П. Яковлев. ЖТФ, **80** (2), 99 (2010).
- [6] T.L. Troy, S.N. Thennadil. *J. Biomedical Optics*, **6** (2), 167 (2001).
- [7] K. Kincade. *Laser Focus World*, **12**, 69 (2003).
- [8] В.В. Шерстнев, Д. Старостенко, И.А. Андреев, Г.Г. Коновалов, Н.Д. Ильинская, О.Ю. Серебrenникова, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **37** (1), 11 (2011).
- [9] С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, А.А. Шленский, Л.С. Лунин, В.И. Ратушный, А.В. Корюк, Н.Г. Тараканова. ФТП, **41**, 1389 (2007).
- [10] А.Л. Закгейм, Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, А.Е. Черняков. ФТП, **43** (3), 412 (2009).
- [11] Е.А. Гребенщикова, Д.А. Старостенко, В.В. Шерстнев, Г.Г. Коновалов, И.А. Андреев, О.Ю. Серебrenникова, Н.Д. Ильинская, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **38** (10), 43 (2012).
- [12] А.Н. Именков, Е.А. Гребенщикова, Д.А. Старостенко, В.В. Шерстнев, Г.Г. Коновалов, И.А. Андреев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **47** (5), 690 (2013).
- [13] F. Karota, H. Mani, J. Bhat, F.J. Hua, A. Joullie. *Rev. Phys. Appl.*, **22** (11), 1459 (1987).

Редактор Л.В. Шаронова

Spectral sensitivity enhancement mid-infrared spectral range photodiodes

E.V. Kunitsyna, E.A. Grebenschikova, G.G. Konovalov, I.A. Andreev, Yu.P. Yakovlev

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract A new method of increasing the spectral sensitivity of the photodiodes based on GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb heterostructures for the spectral range of 1.1–2.4 μm is applied. It is shown that formation of pits on the metal-free back surface area of the photodiode chip allows to increase the spectral sensitivity in the 1.8–2.4 μm wavelength interval. The largest increase up to 53% in maximum of sensitivity, compared to the sensitivity of the traditional photodiodes with fully back-metallized chips, is observed for the photodiodes with formed shallow pits of a radius of 30 μm on the chip back surface. These devices can find wide application in systems for the measurement of water content in petroleum products and moisture content in paper, soil and grain.