

06

## Повышение квантовой эффективности фотодиодов за счет изменения направления световых потоков в гетероструктуре InAs/InAsSb/InAsSbP

© Е.А. Гребенщикова, Д.А. Старостенко, В.В. Шерстнев,  
Г.Г. Коновалов, И.А. Андреев, О.Ю. Серебренникова,  
Н.Д. Ильинская, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: eagr.iropt7@mail.ioffe.ru

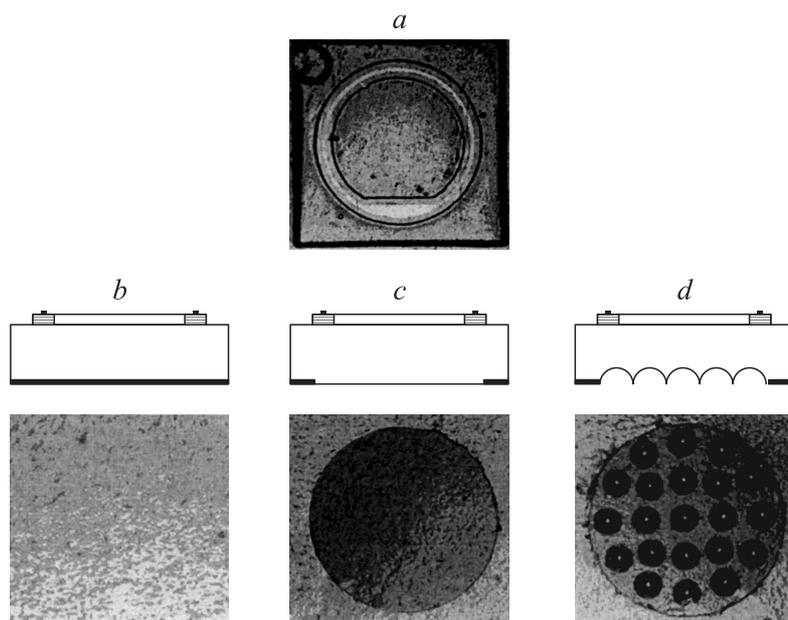
Поступило в Редакцию 6 января 2012 г.

На примере гетероструктуры InAs/InAsSb/InAsSbP было показано, что при создании на тыльной стороне фотодиодного чипа криволинейной отражающей поверхности в виде полусферических ямок травления наблюдается повышение квантовой эффективности фотодиодов в 1.5–1.7 раза во всем исследованном интервале длин волн 3–5  $\mu\text{m}$ . Для полученных фотодиодов (с граничной длиной волны 4.8  $\mu\text{m}$ ) с фоточувствительной площадкой 0.1  $\text{mm}^2$  и площадью чипа 0.9  $\text{mm}^2$  токовая монохроматическая чувствительность на длине волны 4.0  $\mu\text{m}$  составила 0.6 А/Вт. Плотность обратного темнового тока при напряжении обратного смещения 0.2 В составила величину 4–6 А/см<sup>2</sup>.

В настоящее время значительное внимание уделяется разработке фотодиодов для средней инфракрасной (ИК) области спектра [1–4]. Особенностью фотодиодов, работающих при комнатной температуре в диапазоне  $\lambda = 3–5 \mu\text{m}$ , является сравнительно слабая квантовая эффективность (20–40%), для увеличения которой применяют различные концентраторы падающего на поверхность фотодиода излучения в виде полусферических линз, параболических отражателей, линз Френеля и т.д. [5,6]. Однако эти внешние устройства достаточно дороги и громоздки. Авторы [7] применили глубокое травление фотодиодной мезы, т.е. создали „встроенный“ оптический концентратор, увеличивающий площадь сбора излучения, что позволило улучшить спектральные характеристики фотодиодов.

Целью данной работы было исследование возможности повышения квантовой эффективности фотодиодов за счет многократного переотражения фотонов от криволинейных поверхностей, созданных в фотодиодном кристалле.

Фотодиоды для экспериментов были изготовлены из гетероструктур (ГС), выращенной на подложке  $n$ -InAs ориентации (100), легированной оловом до концентрации носителей  $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . В подложке с такой высокой концентрацией носителей, согласно [8], происходит сдвиг фундаментального края поглощения в коротковолновую область спектра (сдвиг Мооса–Бурштейна) и она становится прозрачной для излучения с длиной волны  $\lambda \geq 2.5 \mu\text{m}$ . На подложке методом жидкофазной эпитаксии был выращен буферный слой  $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$  толщиной  $3.3 \mu\text{m}$ , обеспечивающий уменьшение деформации активной области. Затем последовательно были выращены: широкозонный эмиттерный слой  $N$ - $\text{InAs}_{0.56}\text{Sb}_{0.14}\text{P}_{0.30}$  толщиной  $6.2 \mu\text{m}$ , легированный Sn (оловом) до концентрации  $N \sim 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , активный слой  $n$ - $\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$  толщиной  $2.5 \mu\text{m}$ , преднамеренно нелегированный ( $n \sim 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ), и широкозонный эмиттерный слой  $P$ - $\text{InAs}_{0.56}\text{Sb}_{0.14}\text{P}_{0.30}$  толщиной  $1.4 \mu\text{m}$ , легированный цинком до  $P \sim 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Из одной гетероструктуры (серия DV-107) методами контактной фотолитографии и жидкостного химического травления были созданы три варианта фотодиодных чипов, схемы которых приведены на рис. 1. Схема гетероструктуры приведена на врезке рис. 2. Со стороны эпитаксиального слоя все три вида чипов были идентичны (рис. 1, а). Они имели форму квадрата со стороной  $950 \mu\text{m}$ , в центре которого была сформирована кольцевая меза с внешним диаметром  $770 \mu\text{m}$ , внутренним диаметром  $600 \mu\text{m}$  и высотой  $18 \mu\text{m}$ . За пределами мезы, т.е. внутри и снаружи кольца, гетероструктура была стравлена до подложки. Площадь фоточувствительной площадки составила  $0.1 \text{ mm}^2$ , общая площадь чипа  $0.9 \text{ mm}^2$ , т.е. площадь лицевой поверхности чипа, через которую падающий свет проникает в подложку, значительно больше площади  $p$ - $n$ -перехода, поглощающего часть падающего света. Трехслойный контакт состава  $\text{Cr}/\text{Au}$ - $\text{Ge}/\text{Au}$ , также в форме кольца, с внешним радиусом  $350 \mu\text{m}$  и шириной  $15 \mu\text{m}$ , располагался в средней части кольцевой мезы. Таким образом, только часть излучения, падающего на лицевую поверхность чипа, поглощалась фоточувствительной площадкой кольцевой мезы, а остальная часть излучения, падающая за пределами мезы, свободно проникала в прозрачную для излучения подложку толщиной  $200 \mu\text{m}$



**Рис. 1.** *a* — фото кольцевой мезы, сформированной со стороны эпитаксиального слоя фотодиода; *b, c, d* — схемы поперечного сечения и фотографии со стороны подложки трех типов фотодиодных чипов, различающихся по форме контакта к подложке и по рельефу тыльных сторон чипа: *b* — сплошной контакт; *c* — часть тыльной стороны подложки (диаметром  $880\ \mu\text{m}$ ), свободная от металлизации; *d* — часть тыльной стороны подложки (диаметром  $880\ \mu\text{m}$ ), свободная от металлизации, заполнена ямками травления в форме полусферы с радиусом  $60\ \mu\text{m}$ .

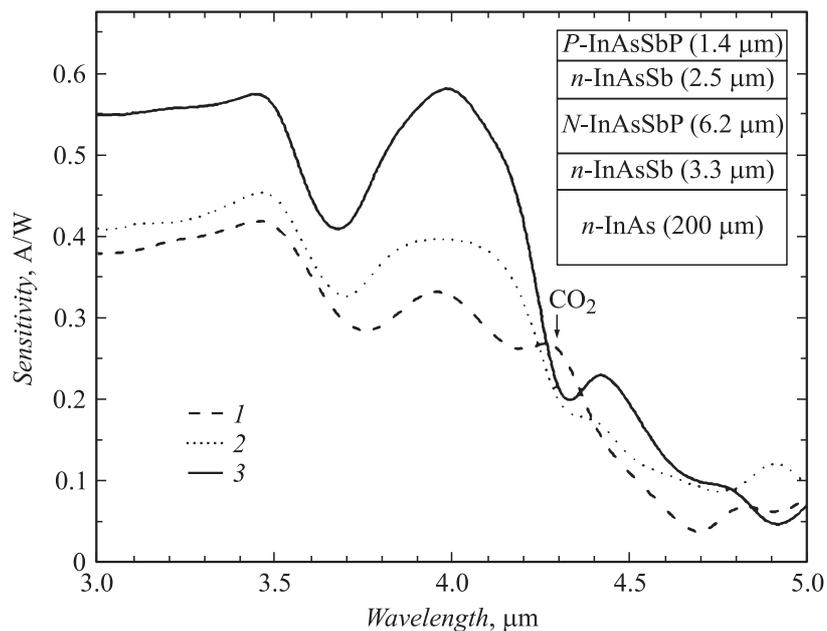
и достигала тыльной стороны чипа. На рис. 1 приведены схемы поперечного сечения чипов и фото чипов со стороны подложки (т.е. с тыльной стороны) (*a, b, c*). Основные различия трех типов чипов состояли в форме контакта к подложке и в рельефе тыльных сторон чипа. На рис. 1 видно, что у меза-фотодиодов первого типа (рис. 1, *b*) контакт к подложке  $n\text{-InAs}$ , нанесенный методом термического вакуумного напыления слоев  $\text{Cr/Au}-\text{Te/Au}$ , полностью закрывал тыльную поверхность фотодиодного чипа площадью  $0.9\ \text{mm}^2$ . Это так называемый сплошной

контакт, традиционно применяемый при изготовлении оптоэлектронных приборов. Световой поток, падающий на лицевую поверхность фотодиодного кристалла за пределами мезы, свободно проникает в прозрачную для излучения подложку и, достигнув тыльной стороны чипа, в основном поглощается на границе раздела подложка–омический контакт в области эвтектики. Это подтверждается характером зависимости токовой монохроматической чувствительности фотодиодов от длины волны (рис. 2, кривая 1). Авторы [7] исследовали отражательную способность границы раздела полупроводника  $n^+$ -InAs и омического контакта, где на многослойный омический контакт дополнительно был нанесен слой золота методом гальванического осаждения. Коэффициент отражения достигал величины  $R = 0.6$  (в отличие от коэффициента отражения  $R = 0.3$  от областей, не покрытых металлом). В нашем эксперименте контакты были сформированы методом термического вакуумного напыления без дополнительного гальванического осаждения золота, и после сплавления контактов в полупроводнике образовался эвтектический сплав, поглощающий часть излучения.

Меза-фотодиоды второго типа (рис. 1, *c*) отличались от первого тем, что часть тыльной стороны подложки (диаметром  $880 \mu\text{m}$ ) была свободна от металлизации. В этом случае доля излучения в большей степени, чем в первом типе фотодиодов, отражается от неметаллизированной поверхности подложки и частично попадает в область  $p$ – $n$ -перехода, поглощаясь в активной области кольцевой мезы и давая вклад в увеличение фототока диода. Однако в этом случае световые потоки не могут изменять угол падения и отражения от границ кристалла.

Меза-фотодиоды третьего типа (рис. 1, *d*) отличались от двух предыдущих тем, что часть тыльной стороны подложки (диаметром  $880 \mu\text{m}$ ), свободная от металлизации, была равномерно заполнена углублениями, выполненными в форме полусферы с радиусом  $60 \mu\text{m}$ . В этом случае излучение, проникающее в кристалл, падает на поверхность подложки и многократно отражается от криволинейной поверхности, образованной ямками травления. В результате световые потоки изменяют свои направления в кристалле и в основном поглощаются в активной области кольцевой мезы либо выходят за пределы кристалла.

Фотодиодные чипы монтировались подложечной стороной на корпус ТО-18 для проведения исследований электрических и фотоэлектрических характеристик созданных фотодиодов. Сопротивление  $R_0$  фотодиодов в нуле смещения измерялось в диапазоне от  $+10$  до  $-10 \text{ mV}$



**Рис. 2.** Токовая монохроматическая чувствительность в зависимости от длины волны для фотодиодов трех типов: 1 — сплошной омический контакт к тыльной стороне чипа; 2 — часть тыльной стороны подложки (диаметром  $880\ \mu\text{m}$ ), свободная от металлизации; 3 — часть тыльной стороны подложки (диаметром  $880\ \mu\text{m}$ ), свободная от металлизации, заполнена ямками травления в форме полусферы с радиусом  $60\ \mu\text{m}$  ( $T = 300\ \text{K}$ ). На врезке приведены схемы гетероструктуры и толщины слоев.

и составило величину  $R_0 = 5\text{--}30\ \Omega$ . Значения плотности обратного темнового тока при напряжении обратного смещения  $0.2\ \text{V}$  составили  $10.5$ ,  $12.2$  и  $4.9\ \text{A}/\text{cm}^2$  для типов фотодиодов  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , соответственно. Таким образом, в фотодиодах с многократно отражающей тыльной стороной фотодиодного чипа (тип  $d$ ) были получены меньшие в 2 раза величины плотности обратного темнового тока, чем в фотодиодах с ровной тыльной стороной чипа. Для этого экспериментального факта пока не найдено удовлетворительного объяснения.

Для изучения спектров чувствительности фотодиодов использовался монохроматор SPM2 (Carl Zeiss). Измерения проводились по схеме синхронного детектирования с использованием прибора Stanford Research SR830. Для определения токовой чувствительности  $S(\lambda_{\max})$  использовался метод сравнения с калиброванным по чувствительности приемником излучения. На рис. 2 приведена спектральная зависимость токовой монохроматической чувствительности диодов при температуре  $T = 300$  К. Провал, наблюдаемый на спектре в районе  $3.6 \mu\text{m}$ , вероятно, связан с особенностями поглощения света в данной сложной гетероструктуре, поскольку на данной длине волны нет сильных полос поглощения ИК-излучения различными углеводородными соединениями и промышленными газами.

Проведенные измерения показали, что использование отражательных оптических методов (таких как создание криволинейной отражающей поверхности в виде полусферических ямок травления на тыльной стороне структур) позволяют перераспределить потоки излучения в структуре и увеличить эффективную площадь сбора излучения. Из рис. 2 (кривая 3) видно, что чувствительность возрастает в 1.5–1.7 раза по сравнению с фотодиодами с ровной тыльной стороной чипа (кривая 2) или с поглощающим омическим контактом на ровной тыльной стороне чипа (кривая 1). Соответственно возрастает квантовая эффективность преобразования излучения в фототок. Для серии фотодиодов с криволинейной, многократно отражающей поверхностью тыльной стороны чипа достигнута величина чувствительности  $0.6 \text{ A/W}$  на длине волны  $4.0 \mu\text{m}$ . При этом квантовая эффективность на этой длине волны составила 0.19.

Таким образом, предложен новый метод повышения квантовой эффективности фотодиодов для среднего МК-диапазона спектра (с граничной длиной волны  $4.8 \mu\text{m}$ ). Проведены сравнительные исследования токовой чувствительности фотодиодов, содержащих как поглощающие, так и отражающие тыльные стороны фотодиодного чипа. Показано, что в случае использования криволинейной многократно отражающей поверхности на тыльной стороне фотодиодного чипа в виде полусферических ямок травления радиусом  $60 \mu + t$  наблюдается повышение квантовой эффективности фотодиода в 1.5–1.7 раза во всем исследованном интервале длин волн  $3\text{--}5 \mu\text{m}$ . Полученные результаты служат подтверждением преимущества криволинейных светоотражающих поверхностей при изготовлении фотодиодов для среднего ИК-диапазона.

## Список литературы

- [1] *Yakovlev Yu.P., Andreev I.A., Kizhayev S.S., Kunitsyna E.V., Mikhailova P.* // Proc. SPIE. 2007. V. 6636. 66360D.
- [2] *Gao H.H., Krier A., Sherstnev V.V.* // J. Appl. Phys. 1999. V. 85. N 12. P. 8419–8422.
- [3] *Gao H.H., Krier A., Sherstnev V.V.* // Appl. Phys. Lett. (USA). 2000. V. 77 (6). P. 872–874.
- [4] *Clark Jones R.* // Appl. Opt. 1962. V. 1. P. 607–613.
- [5] *Шерстнев В.В., Старостенко Д., Андреев И.А., Коновалов Г.Г., Ильинская Н.Д., Серебренникова О.Ю., Яковлев Ю.П.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 1. С. 11–17.
- [6] *Remennyi M.A., Matveev B.A., Zotova N.V., Karandashev S.A., Stus N.M., Pinskaya N.D.* // Proc. SPIE. V. 6585.
- [7] *Закейм А.Л., Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Черняков А.Е.* // ФТП. 2009. Т. 43. В. 3. С. 412–417.
- [8] *Burstein E.* // Phys. Rev. 1954. V. 83. P. 632.