

Неохлаждаемые широкополосные флип-чип фотодиоды на основе InAsSb ($\lambda_{\text{cut off}} = 4.5 \text{ мкм}$)

© А.Л. Закгейм*, Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев[†],
М.А. Ременный, Н.М. Стусь, А.Е. Черняков*

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

* Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур
при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 27 мая 2008 г. Принята к печати 10 июня 2008 г.)

Проведен анализ инфракрасных „собственных“ и в отраженных лучах изображений флип-чип фотодиодов на основе $p\text{-InAsSb}/n\text{-InAsSb}/n^+\text{-InAs}$, включая изображения, получаемые при прямом и обратном смещении $p\text{-}n$ -перехода, произведена оценка коэффициентов отражения от омических контактов. Обсуждается влияние глубины травления мезы и степени легирования подложек $n^+\text{-InAs}$ на спектральные характеристики и чувствительность фотодиодов, освещаемых со стороны $n^+\text{-InAs}$ в диапазоне 2.7–4.5 мкм.

PACS: 85.60.Dw, 79.60.Jv

1. Введение

Фотодиоды (ФД), чувствительные в средней ИК-области спектра (3–5 мкм), нашли ряд применений в газовых анализаторах, использующих измерение пропускания на выделенных длинах волн, например $\lambda = 4.3 \text{ мкм}$ для CO_2 [1,2]. При использовании линз, имеющих оптический диаметр 3.3 мм, и иммерсионной технологии стыковки с флип-чип ФД были достигнуты значения обнаружительной способности $D_\lambda^* = 1.5 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^8 \text{ см Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$ для длин волн 3–5 мкм при комнатной температуре [3]. Достижение высоких значений D_λ^* сопровождалось получением узкого угла зрения ФД, определяемого геометрией линзы. Описанные в [3] устройства, включая ФД на основе InAsSb с пиком чувствительности вблизи 4.3 мкм и $D_\lambda^* = 2 \cdot 10^{10} \text{ см Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$, помимо узкого угла зрения обладали узкой полосой чувствительности с полушириной спектра $\sim 0.6 \text{ мкм}$, что не удовлетворяет требованиям некоторых применений.

Малая ширина спектра чувствительности флип-чип ФД (в английской терминологии — „backside illuminated photodiodes“), в которых излучение доходит до активной области, пройдя толщу подложки, обусловлена поглощением, особенно существенным для квантов с высокими энергиями. Расширение спектра чувствительности для указанных ФД может быть достигнуто как за счет использования широкозонных [4] или тонких подложек, так и за счет использования сильно легированных подложек n -типа проводимости с вырождением электронов в зоне проводимости, в которых из-за эффекта Мосса–Бурштейна край поглощения сдвинут в коротковолновую область спектра [5]. Последнее является наиболее удобным на практике, поскольку позволяет изготавливать достаточно толстые (механически прочные) структуры с минимальным различием коэффициентов термического расширения подложки и близкого

по составу активного слоя. Использование сильно легированных подложек, а также применение глубокого травления мезы (т.е. создание „встроенного“ оптического концентратора, увеличивающего площадь сбора (вывода) излучения) позволили улучшить параметры ФД на основе InSb при широком спектральном ответе и угле зрения [6], а также существенно увеличить выходную мощность светодиодов, выращенных на подложках $n^+\text{-InAs}$ и излучающих на длине волны 4.2 мкм [7]. Однако нам не известны примеры применения „встроенных концентраторов“ для создания ФД в средней ИК-области спектра (3–5 мкм) на основе материалов $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$.

Важным свойством флип-чип ФД является возможность использования широкого тыльного контакта, способного отражать и направлять в область $p\text{-}n$ -перехода дошедшее до него излучение, что увеличивает D_λ^* [8]. Нам не удалось найти в литературе описания измерений коэффициента отражения от контактов, использующихся в ФД на основе материалов $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ для диапазона 2–5 мкм, хотя важность этого параметра отмечается большинством авторов, описывающих работу ФД, изготовленных на прозрачных подложках и(или) буферных слоях. Так, например, авторы [9,10] сообщали об улучшении рабочих характеристик ФД, выращенных на подложках $n\text{-GaSb}$, которое они связывали с увеличением отражения излучения от тыльного контакта в образцах, освещаемых со стороны подложки и эпитаксиального слоя соответственно. При этом авторы [9] указанные улучшения обосновывают изменениями времени спада и интенсивности фотолюминесценции в аналогичных образцах: в работе [10] экспериментальное обоснование высокой отражательной способности контакта не указывается.

В работе мы представляем первые результаты исследований флип-чип ФД на основе InAsSb, обладающих широкой спектральной чувствительностью, с глубокой мезой травления (т.е. со встроенным концентратором), имеющих красную границу чувствительности вблизи $\lambda_{0.1} = 4.5 \text{ мкм}$, включая данные об отражательных свойствах омических контактов.

[†] E-mail: bmat@iropt3.ioffe.rssi.ru

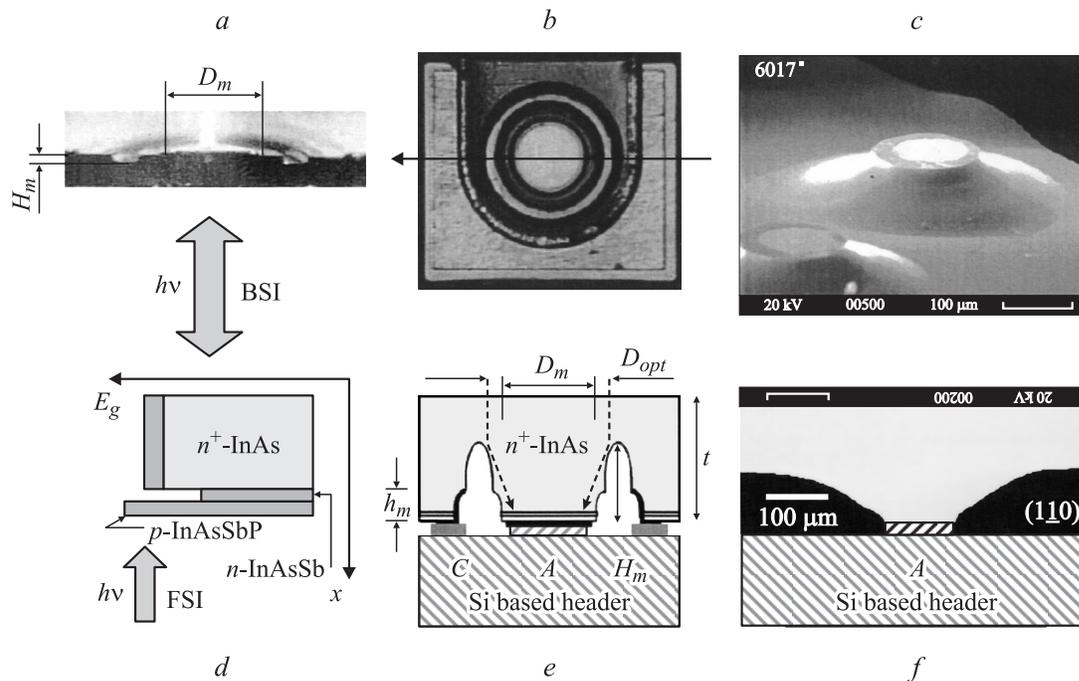


Рис. 1. Топология и энергетическая диаграмма диодов на основе структур $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAsSb}/n^+\text{-InAs}$: *a* — фотография со стороны скола (110) диода с круглой мезой и анодом и подковообразным катодом; *b* — фотография эпитаксиальной поверхности с контактами; *c* — СЭМ-изображение круглой мезы, полученной при многостадийном травлении; *d* — схема распределения ширины запрещенной зоны (E_g); *e* — схема сечения диода, где D_m — полный диаметр мезы в области p - n -перехода, D_{opt} — диаметр эффективной площади сбора излучения, H_m — расстояние (глубина) от поверхности $p\text{-InAsSbP}$ до углубленных областей катода, t — толщина структуры, A — анод, C — катод; *f* — СЭМ-изображение скола (110) мезы, полученной при многостадийном травлении с круглым анодом. Используемые обозначения: FSI — направление падающего излучения для освещаемого со стороны эпитаксиального слоя диода (front surface illumination), BSI — направление падающего излучения для флип-чип диодов (back-side illumination), x — направление роста слоев.

2. Образцы и методики измерений

Гетероструктуры $n\text{-InAsSb}/p\text{-InAsSbP}$, аналогичные описанным ранее в [7], в которых активным являлся слой из $n\text{-InAsSb}_{0.08}$ ($E_g = 300\ \text{мэВ}$) толщиной 5–10 мкм, а контактным (ограничивающим) был широкозонный слой $p\text{-InAsSbP}$ ($E_g = 375\ \text{мэВ}$) толщиной 3–5 мкм, выращивались на легированных оловом подложках $n^+\text{-InAs}$ (111), где $n^+ = (0.1\text{--}6) \cdot 10^{18}\ \text{см}^{-3}$, имеющих в своем большинстве сдвинутый в коротковолновую область край поглощения. Спектры пропускания таких подложек можно найти в работе [5].

Методами многостадийной „мокрой“ фотолитографии были изготовлены структуры с макрорельефом на эпитаксиальной стороне, включающим квадратные или круглые мезы поперечным размером 100–300 мкм и глубиной 40–100 мкм. Наши данные показывают, что при использованных нами травителях стенка мезы после одиночного процесса травления имеет начальный „вертикальный“ участок, т.е. поверхность стенки вблизи поверхности мезы цилиндрическая. Цилиндрическая поверхность заменяется плавной криволинейной поверхностью, выполаживающейся в „горизонтальную“ часть, при этом глубина мезы составляет не более 30 мкм.

При двухстадийном травлении удавалось получить большую суммарную глубину двухступенчатой (с двумя уступами) мезы H_m ; так, например, при диаметре круглой мезы $D_m = 240\ \mu\text{м}$ ее полная глубина составляла $H_m = 40\text{--}50\ \mu\text{м}$ (см. рис. 1, *a, e*); в случае многостадийного травления суммарная глубина мезы увеличивалась до 100 мкм (рис. 1, *c, f*). Форма боковой стенки определялась режимами травления и индивидуальными свойствами образцов; большинство „многостадийных“ ФД имело форму мезы в виде конуса, с углом наклона стенки ~ 45 угл. град. по отношению к поверхности мезы (см. рис. 1, *f*).

Изготовленные вакуумным распылением анодный — из Cr-Au(Zn)-Ni-Au — и катодный — из Cr-Au(Ge)-Ni-Au — контакты с суммарной толщиной $\sim 0.25\ \mu\text{м}$ впоследствии утолщались при электролитическом осаждении золота до 1.5–2 мкм. Контакты специально не вжигались. В работе изучались как несмонтированные чипы ФД, лежащие на прозрачных полированных сапфировых пластинах, так и образцы, собранные по методу флип-чип, а именно, припаянные на монтажную плату из полужолирующего кремния с контактными областями (рис. 1, *e*) (более подробное описание использованной топологии чипов с подковообразным катодом и круглой мезой можно найти в работе [11]).

Регистрация излучения и получение двумерного распределения интенсивности или „эффективной температуры“ осуществлялись с помощью инфракрасного микроскопа, изготовленного в Институте физики полупроводников СО РАН (Новосибирск, Россия) на основе гибридной микросхемы охлаждаемого (77 К) матричного фотоприемника устройства InAs 128×128 с шагом элементов 50 мкм [12]; размеры поля зрения микроскопа составляли $400 \times 400 \text{ мкм}^2$. Измерения проводились как в равновесных условиях, так и при использовании внешней подсветки с помощью изготовленного в ООО „Иоффе.ЛЕД“ „иммерсионного“ светодиода с длиной волны в максимуме спектра излучения 2.9 мкм [13], питаемого постоянным током 20 мА . Часть измерений была проведена при подаче на ФД прямого и обратного смещений.

Для измерения спектральных характеристик применялся монохроматор с призмой из LiF, источником излучения служил глобар. Для определения токовой чувствительности применялась модель черного тела $T = 573 \text{ К}$. Сопротивление в нуле смещения (R_0) измерялось при напряжении $U = 2 \text{ мВ}$, расчет удельной обнаружительной способности D^* проводился по формуле Джонса:

$$D^* = S(\lambda_{\max})(R_0 A / 4kT)^{1/2}.$$

3. Результаты измерений и их обсуждение

3.1. Отражательные свойства контактов

На рис. 2 представлены спектры чувствительности ФД с различающимися значениями концентрации электронов в подложке n^+ -InAs при комнатной температуре. На этом же рисунке представлены спектры чувствительности ИК микроскопа и спектр фототовета „контрольного“ ФД с точечным контактом в центре мезы, по составу и структуре аналогичного приведенным выше. Данный образец имел возможность принимать излучение только со стороны эпитаксиального слоя в областях, не затененных контактом.

Из анализа спектральных кривых ясно, что детали ИК-изображений в отсутствие смещения на p - n -переходе (т.е. имеющие невысокий контраст из-за малого отличия интенсивности излучения от теплового фона) могут быть получены только в образце с подложкой, имеющей наибольшую в данном исследовании концентрацию электронов (образец № 4 (577)) — во всех других образцах сильное поглощение на длине волны 3 мкм не позволяло нам зарегистрировать равновесное излучение от примыкающих к активной области частей образца из-за существенных тепловых „шумов“. Поэтому далее мы обсуждаем ИК-изображения, полученные именно в этом, с самым коротковолновым пропусканием, образце № 4.

На рис. 3 приведены ИК-изображения, полученные с эпитаксиальной стороны образца (т.е. со стороны контактов) при термодинамическом равновесии с окружающей средой ($T = 300 \text{ К}$) и при подсветке чипа внешним

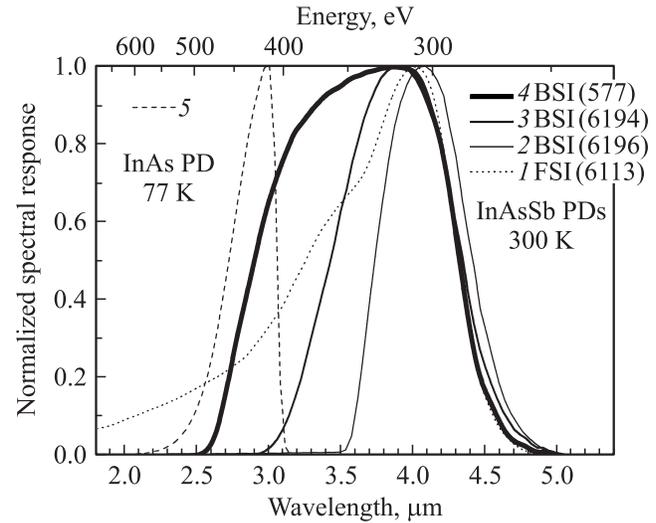


Рис. 2. Спектры фоточувствительности фотодиодов с активным слоем из InAsSb, освещаемых со стороны эпитаксиального слоя p -InAsSbP (1, линия из точек) и через подложку n^+ -InAs (сплошные линии 2, 3, 4) с различающимися значениями концентрации и электронов в n^+ -InAs ($N_4 > N_3 > N_2$), и спектр чувствительности теплового микроскопа (пунктирная линия 5).

источником (фотография поверхности свободного, т.е. без монтажной платы, чипа приведена на рис. 1, б). При этом на рисунке слабо светящимся областям нами присвоен темный цвет, а областям с повышенной светимостью — белый. В соответствии с принципом Кирхгофа пониженная излучательная способность (темный фон) в равновесных условиях (рис. 3, а) указывает на высокий коэффициент отражения объектов; применительно к нашему случаю такими объектами являются центральная круглая и подковообразная (в виде буквы „U“) области, т.е. соответственно анод и катод, покрытые гальваническим золотом. Вывод о высокой отражательной способности покрытия из гальванического золота подтверждается данными на рис. 3, б, из которого видно, что прежде темные области изображения (на рис. 3, а) „инвертируются“ в яркие области при подсветке внешним источником (рис. 3, б). На ИК-изображениях можно рассмотреть также и другие детали, отражающие особенности топологии чипа, например концентрические линии, повторяющие края углубления в форме кольца, окаймляющего мезу.

При измерениях со стороны подложки n^+ -InAs (рис. 3, с, д) ИК-изображения теряют некоторые из вышеописанных деталей вследствие поглощения излучения в n^+ -InAs, однако на них все же можно различить элементы, сходные по геометрии с топологией чипа. Действительно, как видно из рис. 3, с, область подковообразного катода, „не закрытая“ слоем n -InAsSb, проявляется в виде узкой темной буквы „U“ (точнее, из-за ограниченности поля зрения микроскопа, — части буквы „U“). В соответствии с принципом Кирхгофа это указывает на эффективное отражение излучения в

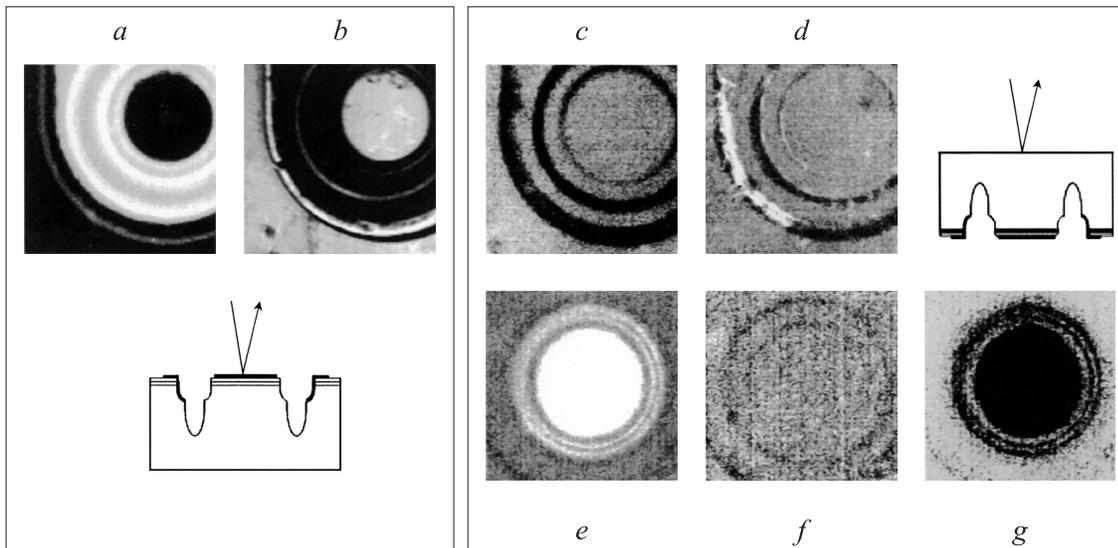


Рис. 3. ИК-изображения диодного чипа $p\text{-InAsSbP}/n\text{-InAsSb}$: *a* — со стороны эпитаксиальных слоев (контактов) несмонтированного чипа в равновесии, *b* — то же при подсветке, *c* — со стороны $n^+\text{-InAs}$ несмонтированного чипа в равновесии, *d* — то же при подсветке через подложку, *e* — при подаче прямого смещения на смонтированный чип, *f* — то же при нулевом смещении ($U = 0$, $t \approx 30^\circ\text{C}$), *g* — то же при обратном смещении $p\text{-}n$ -перехода. Темный фон соответствует низкой „эффективной“ температуре (излучательной способности), белый цвет соответствует высокой „эффективной“ температуре.

данной области, т.е. на высокий коэффициент отражения от границы $n^+\text{-InAs}$ /металл в области внутренней (ближней к мезе) кромки подковообразного катода. Вывод о высокой отражательной способности границы $n^+\text{-InAs}$ /металл подтверждается данными, полученными при измерениях в условиях внешней подсветки (рис. 3, *d*), при которых прежде темная часть изображения в виде узкой полоски, как и при измерениях с контактной стороны, становится светлой. Понятно, что все другие области контактов, кроме вышеуказанной узкой полоски в виде буквы „U“, имеющей непосредственный контакт с $n^+\text{-InAs}$, недоступны для наблюдений при использованных нами инструментах из-за сильного поглощения излучения вблизи $3\ \mu\text{км}$ в слоях $n\text{-InAsSb}$, „закрывающих“ контакты.

Для оценки „зеркальности“ контактов мы измерили интенсивность отраженного излучения на ИК-изображениях для близко расположенных областей, покрытых и не покрытых металлом соответственно. Положив коэффициент отражения от полупроводника равным 0.3 (граница $n^+\text{-InAs}$ /воздух), мы получили значение коэффициента отражения от „гальванического“ золота контактов, равное $R = 0.6$. То же значение R для „гальванического“ золота было получено нами и из анализа данных на рис. 3, *a*, и для границы $n^+\text{-InAs}$ /металл (рис. 3, *c, d*). В силу слабой зависимости коэффициента отражения металла от длины волны вышеуказанные значения R можно, по-видимому, распространить и на область $4.3\ \mu\text{км}$, т.е. на рабочую область диодов. Одинаковость значений R для „внешней“ (свободной) и „внутренней“ (граничащей с полупроводником) поверхности контакта, полученная выше, а также аналогичные исследования, проведенные на образцах

$\text{InAsSbP}/\text{InAs}$ [11], дают основание полагать, что граница $p\text{-InAsSbP}$ /металл в области широкого круглого анода также является отражающей. Эти предположения согласуются с выводами о высокой отражательной способности анодного контакта, полученными ранее по косвенным данным — из наблюдений резонансов Фабри–Перо и стимулированной „вертикальной“ электролюминесценции при $3.3\ \mu\text{км}$ [14–16] в структурах с контактами, аналогичными приведенным в данной работе. Получить численные значения коэффициента отражения от границы $p\text{-InAsSbP}$ /металл в данной работе не представлялось возможным из-за ограниченной области спектральной чувствительности теплового микроскопа.

3.2. Чувствительность фотоприемника

На рис. 4 представлены вольт-амперные характеристики для двух типичных диодов, имеющих насыщение тока в обратной ветви и значение произведения сопротивления в нуле смещения на площадь диода на уровне $0.1\text{--}0.2\ \text{Ом} \cdot \text{см}^2$. Составы активных слоев в нашем исследовании были фиксированы и красная граница чувствительности ($4.5\ \mu\text{км}$) была приблизительно одинаковой для всех образцов, при этом коротковолновые спады спектрального ответа повторяли спектры пропускания „оптических фильтров“ — $n^+\text{-InAs}$ (рис. 2). Спектральный отклик „контрольного“ образца, освещаемого со стороны широкозонного ограничивающего слоя $p\text{-InAsSbP}$, был затянут в коротковолновую область, что обеспечивалось диффузией электронов, фотовозбужденных в $p\text{-InAsSbP}$.

Как показали наши измерения, имелась строгая корреляция между геометрическими параметрами мезы

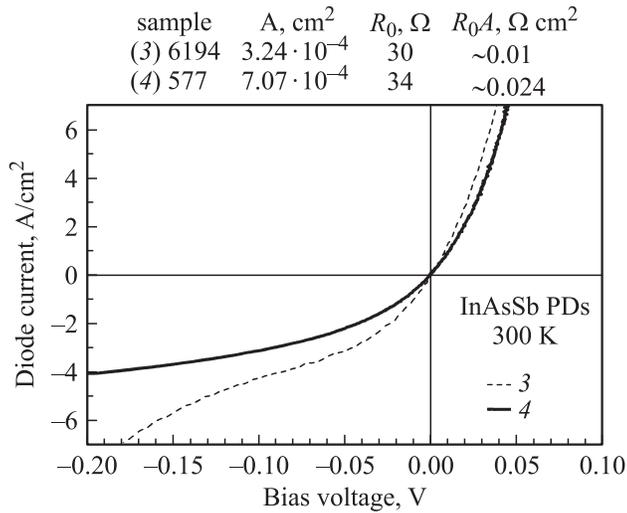


Рис. 4. Типичные вольт-амперные характеристики и сопротивления в нуле смещения диодов из InAsSb. Номера образцов соответствуют номерам на рис. 2.

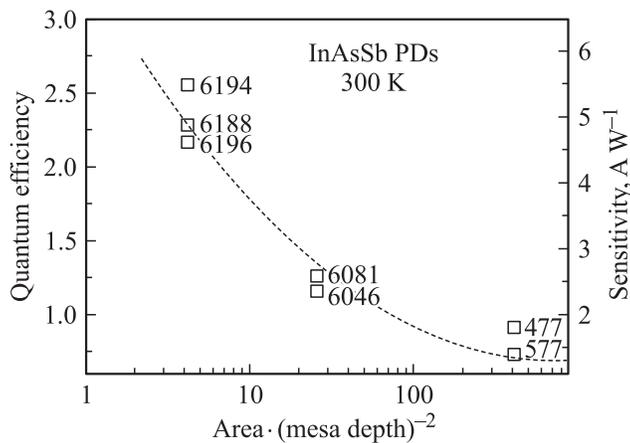


Рис. 5. Экспериментальная зависимость квантовой эффективности и чувствительности ФД на основе InAsSb при комнатной температуре от отношения площади мезы к квадрату ее полной глубины.

и ампер-ваттной чувствительностью ФД, что отражено зависимостью чувствительности от отношения площади мезы к квадрату ее полной глубины, представленной на рис. 5.

Ранее [7] мы сообщали об увеличении области свечения на картинах в ближнем поле в светодиодах, обусловленном отражением от наклонных стенок мезы, поэтому представленную на рис. 5 зависимость мы связываем с аналогичным отражением лучей, вошедших в кристалл (это отражение обозначено штриховыми стрелками на рис. 1, *e*). Действительно, как видно из приведенных на рис. 3, *e* ИК-изображений диода, изготовленного при двухстадийном процессе травления (рис. 1, *e*), при подаче на него прямого смещения вокруг основного изображения области рекомбинации в виде диска появляется широкий „ореол“, имеющий в своей структуре

концентрические окружности (кольца), связанные, очевидно, с вышеупомянутым отражением от наклонных стенок мезы и дополнительного „углубляющего кольца“. Указанные детали изображений соответствуют особенностям конструкции, просматриваемым и на „нулевом“, без протекания тока, изображении (рис. 3, *c, f*). При приложении обратного смещения диод переходит в режим отрицательной люминесценции [17,18] с поглощением излучения, попадающего в активную область; на изображении это отражено темным цветом. Помимо центральной темной части в изображении присутствует широкий „ореол“, аналогичный вышеописанному, но имеющий „инвертированное“ обоснование, а именно, поглощение квантов, попадающих в область, расположенную над наклонными частями диода.

Отметим, что диаметр основного изображения на рис. 3 как в положительной, так и в отрицательной люминесценции больше диаметра контакта и приближается к диаметру мезы. Это обусловлено высоким по отношению к другим областям структуры сопротивлением $p-n$ -перехода, при малых напряжениях смещения достигающим типичного значения 30 Ом (рис. 4), что имеет следствием равномерное растекание тока, т.е. отсутствие сгущения линий тока под анодом. При больших токах (в прямом направлении) сопротивление $p-n$ -перехода падает и область протекания тока сужается до размеров, близких к размеру анода (на самом деле диаметр светящейся области оказывается даже несколько меньше диаметра анода [7]).

Понятно, что при указанном выше отражении от стенок мезы эффективная площадь сбора излучения становится больше площади $p-n$ -перехода ($D_{\text{opt}} > D_m$); при этом фототок при фиксированной плотности падающего на ФД потока квантов закономерно возрастает при уменьшении отношения площади к глубине мезы, как показано на рис. 5. В диодах с мелкой мезой внутренняя квантовая эффективность составляла ~ 0.9 ($S_I = 1.9 \text{ A/Vt}$). В диодах с глубиной мезы $\sim 100 \text{ мкм}$ квантовая эффективность, рассчитанная в предположении соответствия площади сбора излучения и площади $p-n$ -перехода ($\pi D_m^2/4$), достигала 260%, обозначая эффективное увеличение площади сбора излучения в данных образцах. Из соотношения фототоков ФД с мелкой и глубокой мезой была определена эффективная площадь сбора излучения в ФД с глубокой мезой (A_{eff}), составлявшая в нашем случае 280% от площади $p-n$ -перехода ($D_{\text{opt}} = 1.7D_m$). В лучших диодах обнаружительная способность D_λ^* составляла $2.8 \cdot 10^9 \text{ см Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$ ($R_0 A_{\text{eff}} = 0.034 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$), что сопоставимо с параметрами освещаемых со стороны эпитаксиальных слоев „контрольного“ образца ($D_\lambda^* = 2.6 \cdot 10^9 \text{ см Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$, $R_0 A = 0.08 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$) и ФД большой площади (т.е. с несущественными утечками по поверхности) [19], а также существенно выше, чем в известных нам ФД малой площади для длины волны вблизи 4.3 мкм из InAsSb [20] или из GaInAsSb [10]. Дальнейшее увеличение D_λ^* для описанной в работе флип-чип конструкции ФД может

быть достигнуто за счет использования антиотражающих покрытий или микрорельефа, полученного при селективном травлении n^+ -InAs [21]. Среди преимуществ полученных диодов отметим также возможность их иммерсионной стыковки с линзами, что в случае линз диаметром 3.3 мм и халькогенидного оптического „клея“ потенциально обеспечивает почти десятикратное увеличение их обнаружительной способности [3].

Работа частично поддержана грантом 7-й рамочной программы ЕС (FP7, № 224625).

Авторы выражают благодарность А.А. Усиковой за помощь в работе.

4. Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что благодаря использованию разработанной нами методики нанесения омических контактов, последние обладают отражательными свойствами в области 3 мкм как на границе с n^+ -InAs ($R \approx 0.6$), так и на границе с воздухом ($R \approx 0.6$). Показана также возможность существенного расширения спектра чувствительности флип-чип диодов из InAsSb при использовании сильно легированных подложек n^+ -InAs. Применение многостадийного травления позволило также создать ФД с глубокой мезой травления, эффективно увеличивающей площадь сбора излучения до 2.9 раз. Использование отражательных контактов в сочетании с глубоким травлением позволило достичь рекордных значений обнаружительной способности $D_{\lambda}^* = 2.8 \cdot 10^9 \text{ см Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$. Рассмотренные в работе подходы и методика оценки отражательных свойств контактов будут полезны при разработке светодиодов, фотодиодов и лазеров среднего ИК-диапазона ($\lambda = 3\text{--}5 \text{ мкм}$), а сами фотодиоды будут востребованы в качестве чувствительных элементов оптоэлектронной аппаратуры.

Список литературы

- [1] S.D. Smith, J.G. Crowder, H.R. Hardaway. Proc. SPIE, **4651**, 157 (2002).
- [2] S.E. Alexandrov, G.A. Gavrilov, A.A. Kapralov, S.A. Karandashev, B.A. Matveev, G.Y. Sotnikova, N.M. Stus'. Proc. SPIE, **4680**, 188 (2002).
- [3] M.A. Remennyi, B.A. Matveev, N.V. Zotova, S.A. Karandashev, N.M. Stus', N.D. Il'inskaya. Proc. SPIE, **6585**, ISBN: 9780819467133, 658504; DOI: 10.1117/12.722847.
- [4] L.G. Bubulak, A.M. Andrews, E.R. Gertner, D.T. Longo. Appl. Phys. Lett., **36** (9), 734 (1980).
- [5] B.A. Matveev, M. Aydaraliev, N.V. Zotova, S.A. Karandashev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', G.N. Talalakin. Proc. SPIE, **4650**, 173 (2002).
- [6] G.R. Nash, N.T. Gordon, D.J. Hall, M.K. Ashby, J.C. Little, G. Masterton, J.E. Hails, J. Giess, L. Haworth, M.T. Emeny, T. Ashley. Physica E: Low-Dim. Systems and Nanostructures **20**, 540 (2004).
- [7] Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь. ФТП, **40**(6), 717 (2006).
- [8] A. Rogalski. Infr. Phys. Technol., **41**, 213 (2000).
- [9] M.H.M. Reddy, J.T. Olesberg, C. Cao, J.P. Prineas. Semicond. Sci. Technol., **21** (3), 267 (2006).
- [10] Б.Е. Журганов, Н.Д. Ильинская, А.Н. Именков, М.П. Михайлова, К.В. Калинина, М.А. Сиповская, Н.Д. Стоянов, Ю.П. Яковлев. ФТП, **42** (4), 468 (2008).
- [11] А.Л. Закейм, Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, А.А. Усикова, А.Е. Черняков. Прикл. физика, № 6, 143 (2008).
- [12] В.М. Базовкин, А.А. Гузев, А.П. Ковчавцев, Г.Л. Курышев, А.С. Ларшин, В.Г. Половинкин. Прикл. физика, № 2, 97 (2005).
- [13] www.ioffeled.com
- [14] B. Matveev, N. Zotova, N. Il'inskaya, S. Karandashev, M. Remennyi, N. Stus'. Phys. Status Solidi C, **2** (2), 927 (2005).
- [15] Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, В.В. Шустов. ФТП, **38** (10), 1270 (2004).
- [16] M. Aidaraliev, N.V. Zotova, N.D. Il'inskaya, S.A. Karandashev, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', G.N. Talalakin. Semicond. Sci. Technol., **18**, 269 (2003).
- [17] C.T. Elliott. Phil. Trans. R. Soc. Lon. A, **359**, 567 (2001).
- [18] В.И. Иванов-Омский, Б.А. Матвеев. ФТП, **41**, 257 (2007).
- [19] X.Y. Gong, H. Kan, T. Makino, T. Iida, Yu.Z. Gao, M. Aguma, M. Kumagawa, T. Yamaguchi. Jpn. J. Appl. Phys., **38** (Pt 1, No 2A), 685 (1999).
- [20] A. Krier, W. Suleiman. Appl. Phys. Lett., **89**, 083 512 (2006).
- [21] Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, В.В. Шустов, Н.Г. Тараканова. ФТП, **40** (8), 1004 (2006).

Редактор Л.В. Беляков

Room temperature broad band InAsSb flip-chip photodiodes with $\lambda_{\text{cut off}} = 4.5 \mu\text{m}$

A.L. Zakhgeim*, N.V. Zotova, N.D. Il'inskaya, S.A. Karandashev, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', A.E. Chernyakov*

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* Scientific–Technological Center
for Microelectronics and Submicron Heterostructures
at Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract We analyze equilibrium and nonequilibrium IR images of p -InAsSb/ n -InAsSb/ n^+ -InAs photodiodes including those obtained in the electroluminescent and negative luminescent mode. Evaluation of the contact reflectivity has been made. We discuss influence of substrate doping level and mesa depth on quantum efficiency and sensitivity of the back-side illuminated PD sensitive in the 2.7–4.5 μm range.