

Свойства „иммерсионных“ фотодиодов на основе GaInAsSb/GaSb ($\lambda = 1.8\text{--}2.3\text{ мкм}$) в интервале температур 20–140°C

© С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев[¶], М.А. Ременный, А.А. Шленский[‡], Л.С. Лунин*, В.И. Ратушный*, А.В. Корюк*, Н.Г. Тараканова⁺

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

[‡] Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности (ГИРЕДМЕТ), 119017 Москва, Россия

* Южно-Российский государственный технический университет, 346400 Новочеркасск, Россия

⁺ ООО „Иоффе-ЛЕД“, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 12 февраля 2007 г. Принята к печати 28 февраля 2007 г.)

Представлены результаты работы по созданию иммерсионных фотодиодов на основе твердых растворов GaInAsSb с длинноволновыми границами fotocувствительности при 2.05 и 2.25 мкм (20°C). Обсуждаются спектральные и вольт-амперные характеристики, а также влияние конструкции фотодиода на его обнаружительную способность в диапазоне температур 20–140°C.

PACS: 85.60.Dw, 85.60.Gz

1. Введение

Фотодиоды (ФД) с длинноволновой границей fotocувствительности до 2.5 мкм используются в приборах газового анализа, поскольку многие органические молекулы и загрязняющие вещества имеют характерные полосы поглощения в этом диапазоне спектра.

На сегодняшний день конструкция фотодиодов с точечным контактом на обращенной к источнику поверхности является, по-видимому, наиболее распространенной. К ее преимуществам относятся простота фотолитографических процессов, используемых при создании фотодиодов, и широкий спектральный отклик фотодиода, „затянутый“ в коротковолновую область спектра (см., например, [1]). В таких фотодиодах достигнуты значения обнаружительной способности $D_\lambda^* = (0.8\text{--}1.0) \cdot 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$ (диаметр чувствительной площадки 2 мм) [2] и $D_\lambda^* = (0.5\text{--}2) \cdot 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$ (чувствительная площадка $1 \times 1 \text{ мм}$) [3] при длинноволновой границе спектральной чувствительности 2.4–2.55 мкм. Дальнейшее улучшение параметров ФД может быть связано, например, с использованием флип-чип конструкций, в которых оба омических контакта расположены на эпитаксиальной поверхности структуры, а излучение доставляется в активную область после прохождения через прозрачную подложку и промежуточные слои; один из вариантов такой конструкции представлен на рис. 1, а. В диодах данного типа отражение детектируемого излучения от наклонных стенок мезы (показанное штриховыми стрелками на рис. 1) имеет следствием увеличение отношения площади чувствительной области к площади $p\text{--}n$ -перехода с соответствующим увеличением обнаружительной способности. Эффект отражения излучения от наклонных

стенок мезы был нами ранее продемонстрирован в светодиодах (СД) на длину волны $\lambda = 3.3 \text{ мкм}$ на основе арсенида индия [4], для источников отрицательной люминесценции это отражение было детально рассмотрено в [5] и последующих работах тех же авторов.

Дополнительно к этому во флип-чип диодах происходит отражение излучения от золотого омического контакта к p -области (т.е. от анода), что приводит, например, к возможности получения в СД GaInAsSb/GaSb суперлюминесценции в „вертикальном“ направлении [6]. Применительно к ФД высокий коэффициент отражения и последующее за отражением поглощение в активной области приводят к увеличению квантовой эффективности в конструкциях с широким анодом и относительно тонкими активными областями, в которых при первом „проходе“ поглощается лишь часть потока.

Наличие свободной от контактов принимающей поверхности чипа дает еще одно важное преимущество, а именно возможность иммерсионной стыковки ФД с оптическими волокнами и линзами. В последнем случае можно получить ФД с большой эффективной площадью чувствительной площадки, в которых увеличение обнаружительной способности составляет $(A_{\text{opt}}/A_{p-n})^{1/2}$, где A_{opt} — площадь чувствительной площадки, A_{p-n} — площадь $p\text{--}n$ -перехода (или мезы). В вышеприведенных оценках предполагается, очевидно, отсутствие потерь на отражение на границе чип/иммерсионная линза. Незначительность таких потерь может быть обеспечена, например, при плотном оптическом контакте диода и линзы, достигаемом при гладкости поверхностей и расстоянии между ними, значительно меньшем длины волны излучения (λ), например, не превышающем $\lambda/40$ [7]. Сопутствующими чертами таких „иммерсионных“ ФД являются небольшой угол зрения, определяемый геометрией линзы (см. рис. 1, е), и спектральная фильтрация вводимого излучения, зависящая

[¶] E-mail: bmat@iropt3.ioffe.rssi.ru

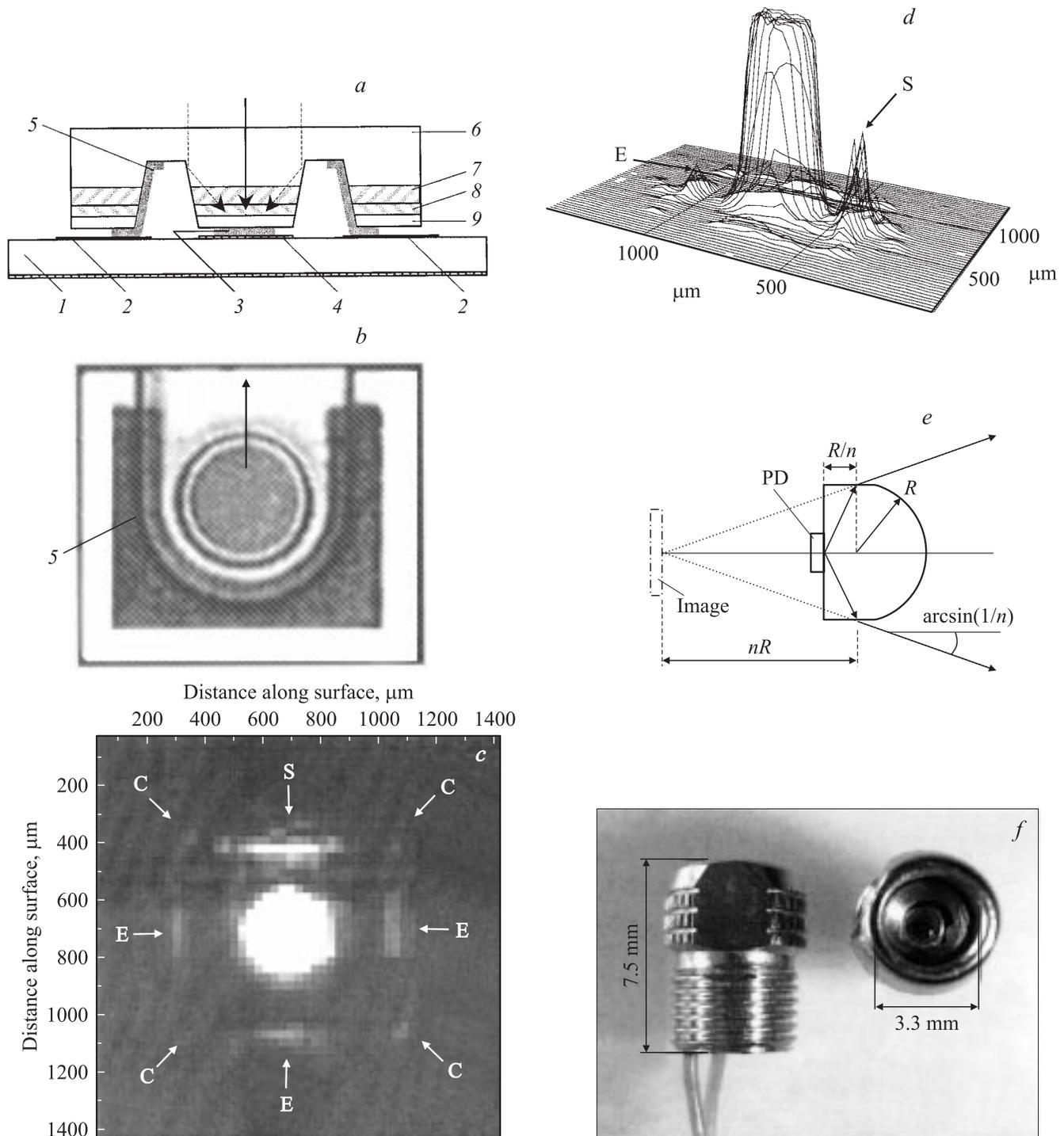


Рис. 1. *a* — схема флип-чип фотодиода (разрез чипа), смонтированного на кремниевом носителе: 1 — носитель (держатель) из Si, (2, 4) — контактные площадки с нанесенным покрытием Sn + Pb, 3 — анодный контакт (Au), 5 — U-образный катодный контакт (Au), *b* — поверхность подложки *n*-GaSb, к которой впоследствии приклеивается плоская поверхность иммерсионной линзы, 7 — слой *n*-InGaAsSb, 8 — слой *p*-InGaAsSb, 9 — слой *p*⁺-GaSb; штриховкой показаны узкозонные области структуры, без штриховки — широкозонные области („окна“). *b* — фотография чипа со стороны контактных областей (со стороны мезы). *c* — инфракрасное изображение смонтированного на носитель чипа со стороны, свободной от контактов, при протекании прямого тока. *d* — распределение интенсивности излучения по поверхности смонтированного на носитель чипа при протекании прямого тока (публикуется с разрешения VTT, Optical Instruments, Finland). *e* — соотношение размеров линзы и ход лучей при иммерсионной стыковке линзы с ФД (PD) в соответствии с [8]: *R* — радиус кривизны поверхности линзы, *n* — показатель преломления материала линзы, *R/n* — расстояние от центра кривизны линзы до ее плоской поверхности, *nR* — расстояние от центра кривизны линзы фотодиода (PD) до его изображения (Image). *f* — фотография иммерсионного фотодиода в „винтовом“ корпусе.

от характеристик оптического пропускания материала линзы и слоев, через которые осуществляется ввод излучения в активную область диода. Значительное увеличение обнаружительной способности иммерсионных ФД, в которых $A_{\text{opt}}/A_{p-n} \gg 1$, позволяет использовать их и при повышенных температурах, встречающихся в ряде применений [9]. Иммерсионная технология используется в свето- и фотодиодах в области длин волн $\lambda = 3\text{--}12$ мкм [10–12], однако нам не известны попытки создания иммерсионных фотодиодов в спектральной области вблизи 2 мкм.

В данной работе представлены результаты исследований „плоских“ (т.е. без линзы) и иммерсионных фотодиодов на основе твердого раствора InGaAsSb, работающих в интервале длин волн 1.8–2.3 мкм (20°С), в диапазоне температур 20–140°С.

2. Описание образцов

Гетероструктуры InGaAsSb/GaSb получали методом жидкофазной эпитаксии при температуре 470°С на подложках *n*-GaSb (100), легированных Te, с концентрацией электронов $n = 5 \cdot 10^{17}$ см⁻³, толщиной 500 мкм, из расплавов, составы которых определены в [13]. Структуры состояли из трех эпитаксиальных слоев: специально не легированного слоя *n*-InGaAsSb толщиной 2–3 мкм, слоя *p*-InGaAsSb толщиной 0.5–1 мкм и сильно легированного Ge „контактного“ слоя *p*⁺-GaSb (концентрация дырок $p = (0.5\text{--}1) \cdot 10^{18}$ см⁻³) толщиной 3–5 мкм. Были исследованы два типа структур с составами активной области In_{0.09}Ga_{0.91}As_{0.08}Sb_{0.92} (структура L3) и In_{0.15}Ga_{0.85}As_{0.13}Sb_{0.87} (структура L9), для которых расчетные значения ширины запрещенной зоны составляли $E_g = 650$ и 570 мэВ соответственно.

Методами стандартной многостадийной „мокрой“ фотолитографии на поверхности структур создавались мезы диаметром $D_m = 300$ мкм и глубиной 10–30 мкм. Контакты (круглый анодный диаметром $D_a = 210$ мкм и *U*-образный катодный, см. рис. 1, *a, b*) наносились вакуумным распылением металлов с последующим „усилением“ при гальваническом осаждении золота на различных этапах процесса. Перед разделением на чипы образцы утончались до толщины 150–200 мкм. Чипы „плоских“ диодов монтировались (припаивались) на кремниевые носители по методу флип-чип (backside illuminated photodiode, BSI PD) и далее устанавливались на корпус ТО-18.

Золотой катод (5 на рис. 1, *a, b*) создает короткое замыкание для слоев вне мезы и делает их электрически неактивными; токопрохождение осуществляется через области вблизи подковообразного катода, контактирующие с подложкой и круглым анодом. В результате электрически активной является лишь центральная часть чипа, т.е. область *p*–*n*-перехода, ограниченного мезой. Иллюстрацией этого может быть распределение электролюминесцентного излучения в ближнем поле на длине волны $\lambda = 2180.5$ нм и постоянном токе через

диод $I = 25$ мА (см. рис. 1, *c* и *d*), полученное с помощью инфракрасного микроскопа, снабженного спектрометром и описанного в работе [14]. На рис. 1, *c* представлено двумерное распределение излучения, причем белый цвет соответствует ярко светящимся областям, а черный — отсутствию излучения (для наглядности шкала светимости подогнана таким образом, чтобы выделить слабо светящиеся области вблизи краев чипа). Реальные амплитуды интенсивности, соответствующие высоте линий над плоскостью нулевой интенсивности, представлены на рис. 1, *d*. Из рис. 1, *c* и *d* видно, что имеется интенсивное излучение в центральной области над мезой с сопутствующими небольшими всплесками на краях чипа, очевидно, связанными с выходом из кристалла лучей, первоначально испытавших полное внутреннее отражение и распространяющихся к краям образца, где неровности края, вызванные операциями разделения чипов, создают благоприятные условия для вывода излучения. Видно также, что выходящее с краев излучение имеет тенденцию концентрироваться в областях *E*, расположенных по ортогональным направлениям, совпадающим с направлениями поверхностей, ограничивающими чип. Такую концентрацию можно связать с многочисленными отражениями в системе (край чипа)–(внутренняя поверхность катода). Концентрация излучения видна также в углах чипа (области *C*). Перечисленные особенности, связанные с концентрацией излучения, аналогичны наблюдавшимся нами ранее в образцах InAsSbP/InAs треугольной формы и описаны в [15]. Новой особенностью по сравнению с описанными в [15] является интенсивная область (обозначенная *S*), связанная, очевидно, с „торцевым“ излучением, покинувшим мезу в направлении, показанном стрелкой на рис. 1, *b* и распространяющимся по узкому воздушному каналу (щели), образованному поверхностью, вытравленной при формировании мезы, и металлизированной поверхностью держателя, на котором смонтирован чип. При выходе из канала излучение отражается от металлических частей держателя и регистрируется измерительной системой. Таким образом, ясно, что при засветке центральной части чипа (вдали от краев) оптически активной является лишь область мезы, и во всех дальнейших расчетах мы считали, что размер чувствительной площадки совпадает с диаметром мезы.

В качестве оптического клея при иммерсионной стыковке ФД с линзами из Si с диаметром основания 3.5 мм использовалось легкоплавкое халькогенидное стекло с показателем преломления $n = 2.4$, подобное стеклам, описанным в [16]. Геометрическое расположение элементов соответствовало предложенному в [8] и показано на рис. 1, *e*. Для получения узкого угла зрения высота линзы была несколько изменена по сравнению с размерами на рис. 1, *f*. Монтаж иммерсионных фотодиодов осуществлялся в корпусах, имеющих винтовую резьбу и показанных на рис. 1, *f* (обозначение в дальнейшем IL PD), при этом незатененной (активной) площадью была поверхность линзы диаметром 3.3 мм.

Спектральные характеристики и чувствительность ФД измерялись с помощью спектрометра ИКС-21 и макета черного тела, нагретого до 300°C, при частоте модуляции 220 Гц.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены спектральные зависимости обнаружительной способности иммерсионных фотодиодов с составами активной области $\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$ („коротковолновый“ ФД) и $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}_{0.13}\text{Sb}_{0.87}$ („длинноволновый“ ФД) в диапазоне температур 20–140°C. При комнатной температуре длинноволновые границы спектров, соответствующие 10% от максимума чувствительности, составляют $\lambda_c = 2.05$ и 2.25 мкм соответственно. Различие длинноволновых

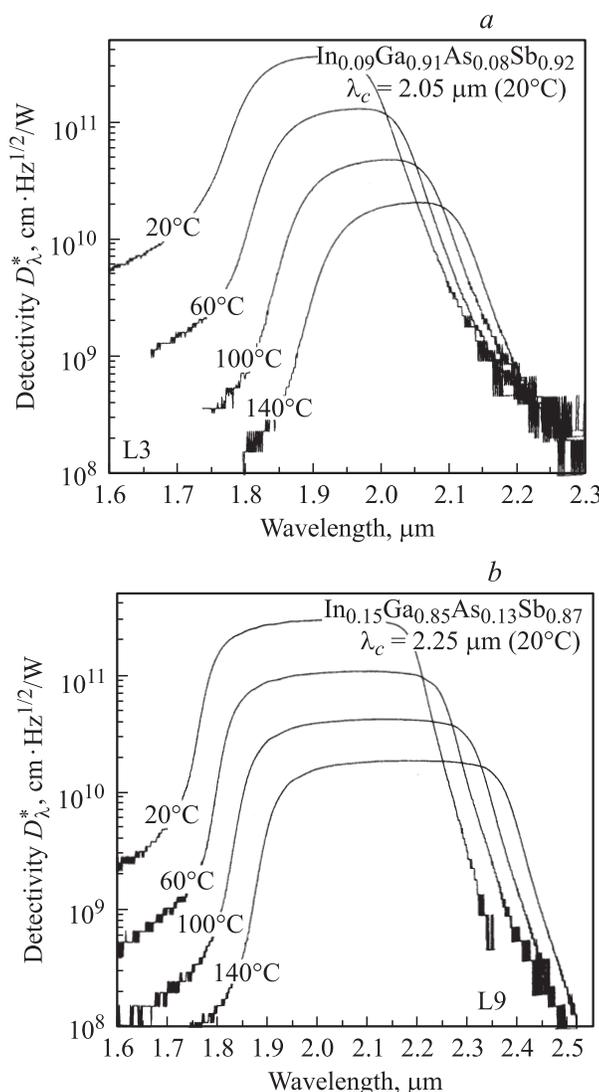


Рис. 2. Спектральные зависимости обнаружительной способности коротковолнового (а) и длинноволнового (б) ФД при температурах 20, 60, 100 и 140°C.

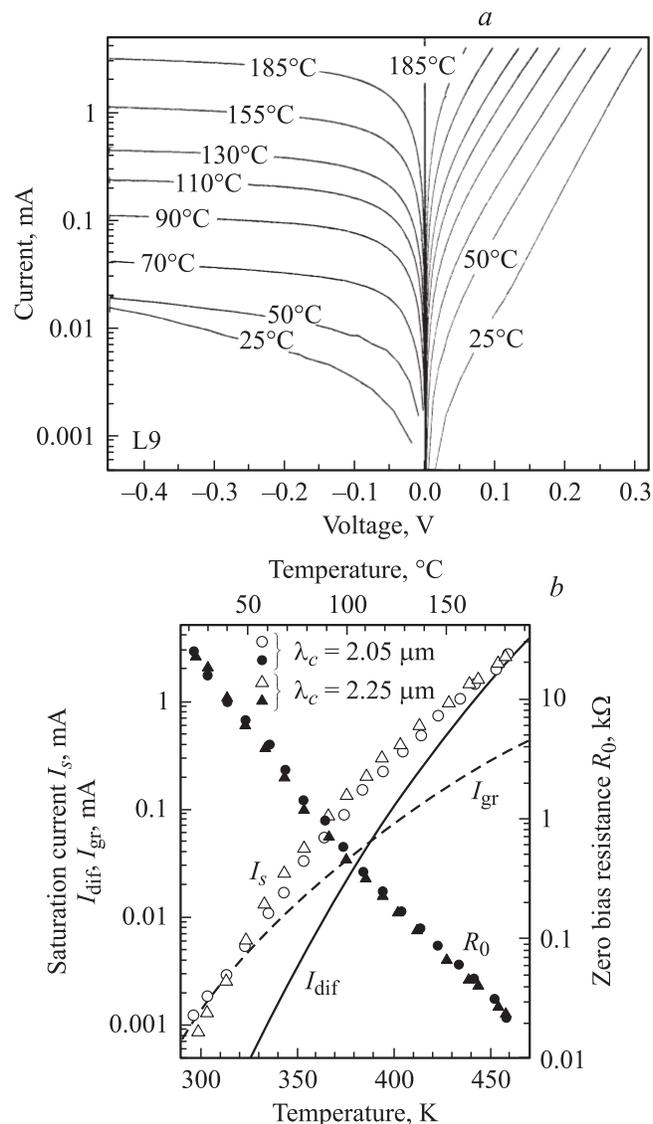


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики „плоского“ длинноволнового фотодиода в интервале температур 25–185°C (а), температурные зависимости темнового сопротивления R_0 , тока насыщения I_s длинноволнового и коротковолнового фотодиодов, а также расчетные кривые, описывающие температурную зависимость диффузионной (I_{dif}) и генерационно-рекомбинационной (I_{gr}) составляющих тока (б).

границ для двух типов ФД (разностная энергия $\Delta h\nu = 54$ мэВ) соответствует разнице в ширинах запрещенных зон твердого раствора активной области. Коротковолновые границы спектров фотодиодов практически совпадают и определяются спектром пропускания подложки GaSb, через которую осуществляется ввод излучения. С ростом температуры спектры сдвигаются в длинноволновую область в соответствии с ожидаемым температурным сужением ширины запрещенной зоны активной области, близкой по составу к GaSb.

На рис. 3 представлены типичные вольт-амперные характеристики длинноволнового ФД с краем чувствитель-

ности $\lambda_c = 2.25$ мкм (а), токи насыщения I_s и темновые сопротивления R_0 (b) для ФД с $\lambda_c = 2.05$ и 2.25 мкм в диапазоне температур $20-185^\circ\text{C}$. Наибольшее значение темнового сопротивления (25–30 кОм) было получено нами в коротковолновых ФД с $\lambda_c = 2.05$ мкм, хотя различия в вольт-амперных характеристиках ФД с $\lambda_c = 2.05$ и 2.25 мкм и соответственно различия I_s и R_0 были незначительными. По-видимому, дополнительным фактором, влияющим на параметры ФД, является кристаллическое качество образцов, зависящее от состава слоев и несоответствия периодов решеток, однако исследования этих факторов выходили за рамки данной работы.

Вблизи комнатной температуры ток утечки, линейно зависящий от приложенного напряжения и слабо зависящий от температуры, заметно влиял на значение I_s . Поэтому в качестве тока насыщения мы принимали значение, отсекаемое на оси тока линией, являющейся продолжением линии тока утечки, при нулевом напря-

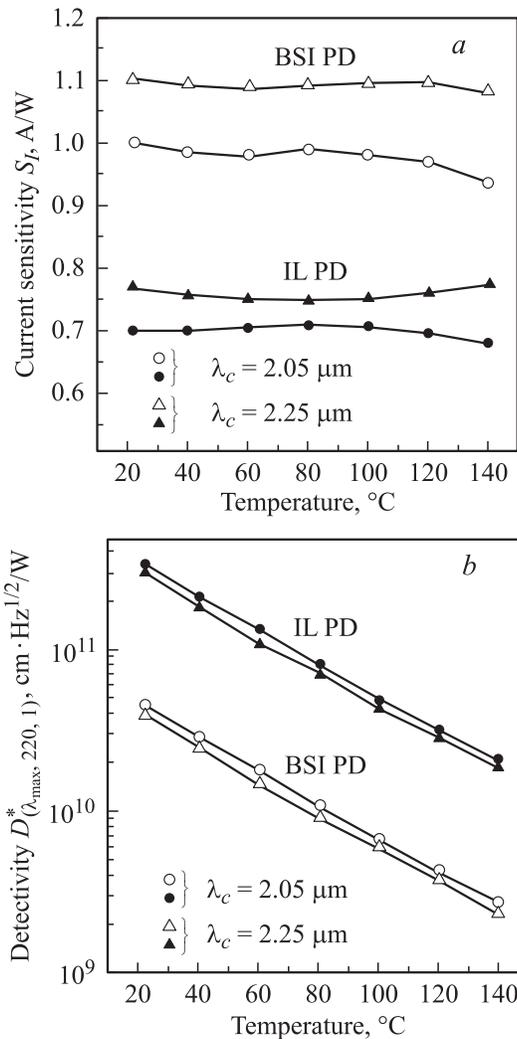


Рис. 4. Температурные зависимости токовой чувствительности (а) и обнаружительной способности в максимуме спектра (b) фотодиодов без линзы (BSI PD) и с иммерсионной линзой (IL PD).

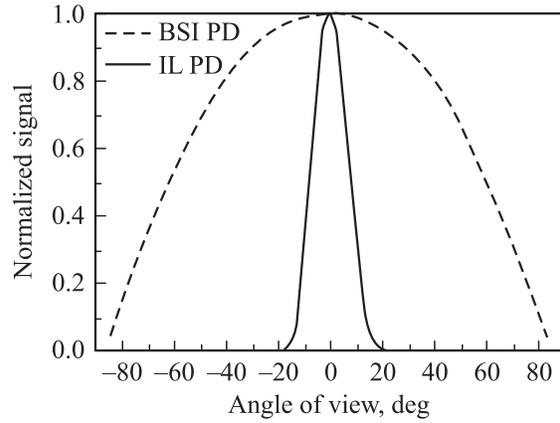


Рис. 5. Угол зрения фотодиодов без линзы (BSI PD) и с иммерсионной линзой (IL PD).

жении $V = 0$ В, аналогично работе [6]. На рис. 3, b представлены экспериментальные зависимости тока насыщения, а также расчетные зависимости диффузионного (I_{dif}) и генерационно-рекомбинационного (I_{gr}) токов от температуры. Из сравнения расчетных зависимостей с экспериментом можно заключить, что температурная зависимость тока насыщения определяется, по-видимому, вкладом как генерационно-рекомбинационной, так и диффузионной составляющих, причем с ростом температуры вклад диффузионной составляющей увеличивается и при температурах $\geq 100^\circ\text{C}$ становится доминирующим. Данный вывод подтверждается также соответствием прямых токов расчетным значениям, полученным нами при учете как I_{dif} , так и I_{gr} .

Температурные зависимости токовой чувствительности (S_f) в максимуме спектра для двух типов ФД представлены на рис. 4, a. Значения S_f для ФД без линзы и без просветляющего покрытия достигают 1.0–1.1 А/Вт, что соответствует внешней квантовой эффективности 0.6–0.7, и остаются практически неизменными во всем температурном диапазоне. Стыковка с иммерсионной линзой уменьшает значения S_f , что связано с неоптимальностью оптического сопряжения, например, из-за поглощения в линзе и халькогенидном стекле, невысокого коэффициента преломления последнего, а также из-за геометрических факторов.

Обнаружительная способность ФД в максимуме спектра $D^*_{(\lambda_{\text{max}}, 220, 1)}$ в температурном диапазоне $20-140^\circ\text{C}$ представлена на рис. 4, b; температурная зависимость $D^*_{(\lambda_{\text{max}}, 220, 1)}$ обусловлена в основном изменением R_0 . Как видно из рис. 4, b, при комнатной температуре в иммерсионном ФД $D^*_{(\lambda_{\text{max}}, 220, 1)} = (3-4) \cdot 10^{11} \text{ см}^2 \cdot \text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$, что является, насколько нам известно, наивысшим достижением среди параметров коммерчески доступных или опубликованных фотодиодов для данной спектральной области.

Увеличение эффективного размера чувствительной площади в „иммерсионных“ ФД сопровождается сужением угла зрения, который в свою очередь зависит от

выбора геометрии линзы. В нашем случае ширина угла зрения на половине от максимума чувствительности (FWHM) составляла 15° . Для сравнения на рис. 5 показаны также данные для ФД без линзы, для которого $\text{FWHM} = 125^\circ$.

4. Заключение

Получены и исследованы флип-чип фотодиоды на основе твердых растворов InGaAsSb с вводом излучения через подложку GaSb. Электрические и оптические параметры фотодиодов в интервале температур $20\text{--}140^\circ\text{C}$ определялись сосуществованием диффузионного и генерационно-рекомбинационного механизмов тока, условиями светопрохождения через подложку и шириной запрещенной зоны твердого раствора активной области.

Оптическая стыковка фотодиода с иммерсионной линзой позволила почти на порядок увеличить значение обнаружительной способности и получить фотодиоды с диаметром чувствительной площадки 3.3 мм , длинноволновыми границами фоточувствительности $\lambda_c = 2.05$ и 2.25 мкм , в которых обнаружительная способность достигает значений $D^*_{(\lambda_{\text{max}}, 220, 1)} = (3\text{--}4) \cdot 10^{11}\text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$ при комнатной температуре.

Авторы благодарят J. Lehtomaa (Specim Oy) и J. Malinen (VTT, Optical Instruments, Finland) за предоставление инфракрасного изображения ФД и Н.Д. Ильинскую за помощь в работе.

Работа поддержана Фондом содействия развитию МП НТС РФ (№ 4308р/6670).

Список литературы

- [1] Т.В. Андреева, В.В. Гаврушко, С.Г. Кузюков, Ю.Н. Прошкин, А.А. Сапожников, А.М. Чупраков, А.А. Шленский. Прикл. физика, № 2, 75 (2005).
- [2] И.А. Андреев, Н.Д. Ильинская, Е.В. Куницына, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев. ФТП, **37**, 974 (2003).
- [3] T.T. Piotrowski, A. Piotrowska, E. Kaminska, M. Piskorski, E. Papis, K. Golaszewska, J. Katcki, J. Ratajczak, J. Adamczewska, A. Wawro, J. Piotrowski, Z. Orman, J. Pawluczyk, Z. Nowak. Optoelectron. Rev., **9**, 188 (2001).
- [4] В.А. Матвеев, Н.В. Зотова, Н.Д. Пинская, С.А. Карандашев, М.А. Ремный, Н.М. Стус, А.Р. Ковчавтсев, Г.Л. Куршев, В.Г. Половинкин, Н.Г. Таранова. In: *Progress in Semiconductor Materials V — Novel Materials and Electronic and Optoelectronic Applications* [MRS Proc., **891**, ed. by L.J. Olafsen, R.M. Biefeld, M.C. Wanke and A.W. Saxler (2006) paper # 0891-EE01-04].
- [5] T. Ashley, D.T. Dutton, C.T. Elliott, N.T. Gordon, T.J. Phillips. Proc. SPIE, **3289**, 43 (1998).
- [6] Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стус, А.А. Шленский. ФТП, **40**, 356 (2006).
- [7] S.D. Smith, J.G. Crowder, H.R. Hardaway. Proc. SPIE, **4651**, 157 (2002).

- [8] R.C. Johnes. Appl. Opt., **1**, 607 (1962).
- [9] B. Andrews. *Abstracts Int. Conf. on Mid-Infrared Optoelectronics: Materials and Devices (MIOMD-VI)* (St. Petersburg, Russia, 2004) p. 90.
<http://www.ioffe.rssi.ru/MIOMD-VI/miomd-abs.html>
- [10] В.А. Матвеев. In: *Mid-infrared Semiconductor Optoelectronics* [Springer Ser. in Optical Science (2006) ISSN 0342-4111, p. 395].
- [11] V.T. Khryapov, V.P. Ponomarenko, V.G. Butkevitch, I.I. Taubkin, V.I. Stafeev, S.A. Popov, V.V. Osipov. Proc. SPIE, **1540**, 412 (1991).
- [12] J.G. Crowder, T. Ashley, C.T. Elliott, G.J. Pryce, A.D. Johnson. Electron. Lett., **36**, 1867 (2000).
- [13] L.M. Dolginov, P.G. Eliseev, A.N. Lapshin, M.G. Milvidskii. Kristall and Technik, **13**, 631 (1978).
- [14] J. Malinen, H. Lindstrom, J. Lehtomaa. *Abstracts Int. Conf. on Mid-Infrared Optoelectronics: Materials and Devices (MIOMD-VII)* (Lancaster, UK, 2005) p. 65.
<http://www.lancs.ac.uk/depts/physics/conf/miomd-7/scope.html>
- [15] В.И. Иванов-Омский, Б.А. Матвеев. ФТП, **41** (3), 257 (2007).
- [16] A.G. Fischer, C.J. Nuese. J. Electrochem. Soc.: Sol. St. Science, **116**, 1718 (1969).

Редактор Л.В. Шаронова

On the properties of immersion lens GaInAsSb/GaSb photodiodes operating in the $\lambda = 1.8\text{--}2.3\text{ }\mu\text{m}$ range at $20\text{--}140^\circ\text{C}$

S.A. Karandashev, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, A.A. Shlenskii[‡], L.S. Lunin*, V.I. Ratushny*, A.V. Koryuk*, N.G. Tarakanova⁺

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

[‡] State Research Institute for Rare-Metal Industry,
119017 Moscow, Russia

* South-Russian State Technical University,
346400 Novocherkassk, Russia

⁺ Ioffe LED, Ltd.

194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Here we present GaInAsSb based photodiodes with cut-off at 2.05 and $2.25\text{ }\mu\text{m}$ (20°C) equipped with immersion lenses. Detectivity, spectral and current-voltage characteristics are discussed with respect to applications of these photodiodes in the $20\text{--}140^\circ\text{C}$ temperature range.