

## Поверхностно облучаемые фотодиоды на основе InAsSb (длинноволновая граница $\lambda_{0.1} = 4.5$ мкм), работающие при температурах 25–80 °С

© Н.Д. Ильинская, А.Л. Закгейм<sup>†</sup>, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев<sup>†</sup>, В.И. Ратушный\*, М.А. Ременный, А.Ю. Рыбальченко\*, Н.М. Стусь, А.Е. Черняков<sup>†</sup>

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

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

\* Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт), 346428 Новочеркасск, Россия

(Получена 14 ноября 2011 г. Принята к печати 21 ноября 2011 г.)

Проведен анализ вольт-амперных характеристик и температурных зависимостей динамического сопротивления при нулевом смещении для фотодиодов на основе InAsSb, учитывающий сгущение линий тока вблизи анода, с использованием экспериментальных данных о распределении интенсивности положительной и отрицательной люминесценции по поверхности диодов. Обсуждено влияние температуры на эффективность сбора фотогенерированных носителей в диодах, а также влияние конфигурации анода на токовую чувствительность и обнаружительную способность диодов.

### 1. Введение

Фотодиоды (ФД), чувствительные в средней инфракрасной (ИК) области спектра (3–5 мкм), могут применяться в приборах газового анализа, измеряющих пропускание среды на выделенных длинах волн, например, на длине волны поглощения углекислого газа  $\lambda = 4.2$  мкм [1]. Для создания таких ФД наиболее часто применяются структуры с твердым раствором HgCdTe или InAsSb, причем важным преимуществом последнего является стабильность металлургических границ раздела, что важно для некоторых практических задач, предполагающих использование ФД при повышенных температурах [2].

Исследования флип-чип ФД с иммерсионными линзами на основе структур InAsSb/InAsSbP и с прохождением излучения через подложку арсенида индия, выполняющую роль встроенного оптического фильтра, при температурах выше комнатной проводились в [3]. Для ФД, имевших максимум чувствительности на длине волны  $\lambda_{\max} = 4.2$  мкм, получены значения обнаружительной способности  $D_{\lambda}^* = 2 \cdot 10^{10}$  и  $\sim 10^9$  см<sup>2</sup>·Гц<sup>1/2</sup>/Вт при температурах 25 и 90 °С соответственно. Из-за фильтрации излучения данные ФД имели узкий спектр fotocувствительности, что не удовлетворяет требованиям некоторых применений. В [4] описаны флип-чип ФД со „встроенными оптическими концентраторами“, имеющие широкий угол зрения и расширенный в область коротких волн спектр фотоответа (длинноволновая граница  $\lambda_{0.1} = 2.7$  мкм). Последнее было достигнуто за счет использования сильно легированных подложек  $n^+$ -InAs с вырождением электронов в зоне проводимости, в которых из-за эффекта Мосса–Бурштейна край

поглощения сдвинут в коротковолновую область спектра [5]. Дальнейшее расширение спектральной полосы чувствительности в сторону коротких волн за счет увеличения степени легирования  $n^+$ -InAs неоправданно, поскольку поглощение излучения на свободных носителях препятствует получению высокой чувствительности флип-чип ФД.

В отличие от флип-чип ФД, поверхностно облучаемые ФД (английское название — front surface illuminated photodiodes, FSI PDs) на основе InAsSb с контактом ограниченной площади, расположенным на эпитаксиальной стороне, обладают широким спектром fotocувствительности, так как не имеют „встроенного оптического фильтра“ с зависимым от температуры спектром поглощения. Исследования таких ФД проводились в интервале температур  $T = 77–300$  К, при этом основное внимание при их разработке уделялось повышению значения  $R_0A$  — произведения дифференциального сопротивления диода при нулевом смещении ( $R_0$ ) на площадь  $p$ - $n$ -перехода ( $A$ ) — путем создания потенциальных барьеров на границах узкозонной активной области [6–8]. При этом увеличение  $R_0$  сопровождалось уменьшением фототока (токовой чувствительности  $S_I$ ). Так, например, диоды на основе двойных гетероструктур (ДГС)  $n$ -AsSbP<sub>0.3</sub>/ $n$ -InAsSb<sub>0.11</sub>/ $p$ -InAsSbP<sub>0.3</sub> ( $\lambda_{\max} \approx 4.2$  мкм), описанные в [6], имели высокие значения  $R_0A$ ,  $\sim 1$  Ом·см<sup>2</sup>, но относительно низкую величину  $S_I$ ,  $\sim 0.5$  А/Вт при  $T = 300$  К.

Одной из характерных особенностей диодов с контактом ограниченной площади является сгущение линий тока вблизи контакта вследствие преобладания латерального сопротивления слоя, примыкающего к контакту, над вертикальным сопротивлением  $p$ - $n$ -перехода в удаленных от контакта областях перехода, когда высота потенциального барьера на  $p$ - $n$ -переходе невелика [9].

<sup>†</sup> E-mail: Bmat@iropt3.ioffe.ru

В [10] было показано, что пространственная неравномерность прохождения прямого тока в ФД на основе InAs с точечным контактом и относительно высоким значением  $R_0A$  ( $\sim 1$  Ом·см<sup>2</sup>) приводит к существенным искажениям вида вольт-амперной характеристики ( $I$ - $V$ -характеристики) и погрешностям в определении параметров ФД, адекватно устраняемым при анализе двумерного распределения интенсивности электролюминесценции в ближнем поле.

Для прогнозирования параметров ФД крайне важным является также правильное представление о механизме протекания тока и об эффективности сбора фотогенерированных носителей в структурах с контактом ограниченной площади. В [11] экспериментально установлен неполный сбор фотогенерированных носителей из-за сгущения линий обратного тока в ФД на основе InAsSb, чувствительных вблизи длины волны  $\lambda = 4.5$  мкм, когда высота барьера на  $p$ - $n$ -переходе и величина смещения невелики, т. е. в ситуации, близкой к условиям применения большинства узкозонных фотовольтаических детекторов, для которых  $R_0A \sim (0.01-0.1)$  Ом·см<sup>2</sup>. Одним из способов уменьшения негативного влияния сгущения линий тока, повышения эффективности сбора неравновесных носителей и чувствительности таких ФД является использование контактов с большим периметром. Так, например, в [12] для ФД на основе градиентных структур InAs/InAsSb(P), имеющих длинноволновую границу чувствительности вблизи  $\lambda_{0.1} = 5.8$  мкм, величина  $S_I$  возросла в 3 раза при переходе от точечного к развитому (т. е. с большим периметром) контакту.

В данной работе на основе измерений вольт-амперных характеристик (ВАХ) и распределения интенсивности положительной и отрицательной люминесценции (ПЛ и ОЛ соответственно) по поверхности структур проводится анализ механизмов токопрохождения и эффективности сбора фотогенерированных носителей при температурах 25–80°С, а также зависимостей токовой чувствительности  $S_I$  и обнаружительной способности  $D_\lambda^*$  от геометрических характеристик контакта в поверхностно облучаемых ФД на основе InAsSb/InAsSbP, имеющих длинноволновую границу чувствительности  $\lambda_{0.1} = 4.5$  мкм.

## 2. Образцы и методика эксперимента

Структуры с активным слоем из нелегированного  $n$ -InAsSb (ширина запрещенной зоны  $E_g = 300$  мэВ) толщиной 18 мкм, контактным широкозонным слоем из  $p$ -InAsSbP ( $E_g = 375$  мэВ) толщиной 5 мкм, легированным Cd до концентрации  $p \approx 10^{17}-10^{18}$  см<sup>-3</sup>, выращивались методом жидкофазной эпитаксии на подложках  $n$ -InAs (концентрация электронов  $n \sim 10^{17}$  см<sup>-3</sup>) толщиной 350 мкм.

Образцы изготавливались в виде квадратных чипов с размерами (340 × 340)–(390 × 390) мкм с помощью стандартной фотолитографии. Омические контакты создавались методом термического испарения в вакууме

многослойной композиции аналогично [13]. Нижний контакт (к подложке) был сплошным. По конфигурации верхнего контакта к слою  $p$ -InAsSbP образцы разделялись на две группы. Образцы первой группы имели дисковый контакт диаметром  $D_a \sim 100$  мкм в центре чипа и монтировались подложкой на кремниевую плату. В образцах второй группы верхний контакт имел четыре модификации: 1 — диск диаметром  $\sim 80$  мкм в центре чипа, аналогично образцам первой группы; 2 — контакт типа 1, к которому добавлены полоски размером 10 × 300 мкм, составляющие узор в виде „двустворчатой оконной рамы без форточки“, при этом центральная полоска контакта соединялась с диском; 3 — контакт типа 2, к которому добавлены еще две полоски, формирующие незатененные участки в виде вытянутых прямоугольников; 4 — контакт типа 3 с добавлением еще четырех полосок, две из которых соединялись (пересекались) с центральным диском. Данные образцы монтировались подложкой на стандартный корпус ТО-18.

Для измерения спектров фотоответа применялся монохроматор с призмой из LiF, источником излучения служил глобар. Для определения токовой чувствительности применялась модель черного тела с температурой  $T_0 = 573$  К; при вычислениях  $D_\lambda^*$  предполагалось, что в ФД доминирует джонсоновский (тепловой) шум. Для образцов первой группы, помещенных на термостат, измерялись ВАХ и распределение интенсивности ПЛ и ОЛ по поверхности образца при подаче на  $p$ - $n$ -переход постоянного смещения (режим CW) в диапазоне температур 25–80°С. Распределение интенсивности ПЛ и ОЛ по поверхности чипа регистрировалось со стороны анода инфракрасной камерой с охлаждаемым матричным детектором на основе InAs, имеющим размерность 128 × 128 точек и максимум чувствительности в области спектра 2.9 мкм [14]. Ватт-амперные ( $L$ - $I$ ) характеристики определялись численным интегрированием распределения интенсивности ПЛ и ОЛ по поверхности диода.

## 3. Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 1 представлен спектр чувствительности ФД. Спектр имел максимум на длине волны  $\lambda_{\max} = 4$  мкм и был затянут в коротковолновую область из-за небольшой толщины контактного слоя  $p$ -InAsSbP.

На рис. 2 представлено типичное для образцов с анодом в виде одиночного диска изображение излучающей поверхности диода при токе  $-3.2$  мА и температуре 50°С, где темные области соответствуют высокой, а светлые — низкой интенсивности ОЛ. Черными и белыми линиями на рис. 2 показано распределение интенсивности люминесценции (точнее, интенсивности люминесценции в узкой спектральной области вблизи 3 мкм, определяемой чувствительностью фотоприемной матрицы) вдоль прямой, проходящей через центр чипа, сверху

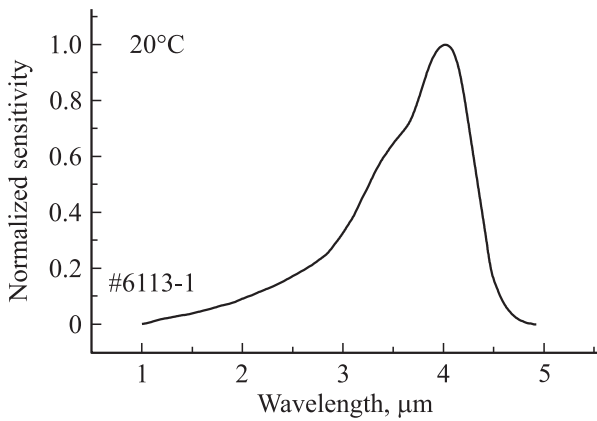


Рис. 1. Спектр чувствительности ФД *n*-InAsSb/*p*-InAsSbP.

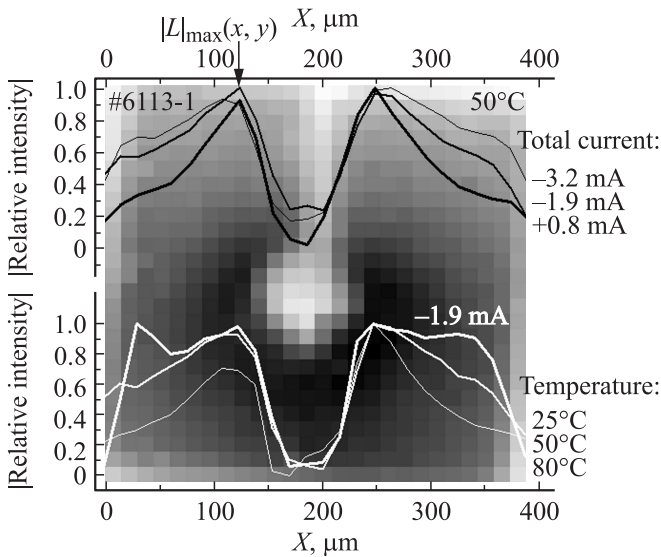


Рис. 2. Изображение излучающей поверхности ФД при температуре 50°C и токе -3.2 мА, нормированные распределения модуля интенсивности ОЛ и ПЛ вдоль прямой, проходящей через центр чипа, (координата *x*) при 50°C, токах -3.2, -1.9, +0.8 мА (вверху) и при токе -1.9 мА, температурах 80, 50, 25°C (внизу).

при температуре  $T = 50^\circ\text{C}$  и токах  $I = -3.2$  (тонкая линия),  $-1.9$  (средняя линия) и  $+0.8$  мА (толстая линия), внизу при токе  $I = -1.9$  мА и температурах 80 (тонкая линия), 50 (средняя линия) и 25°C (толстая линия). Из рис. 2 видно, что при 50° и 80°C имеет место существенная неравномерность распределения интенсивности ОЛ, происходящая от неравномерности плотности обратного тока вдоль поверхности диода. Сгущение линий тока под контактом является следствием низкого сопротивления *p*-*n*-перехода  $R_{pn}$  [9], точнее, следствием выполнения условия  $R_{pn} < R_p + R_a$ , где  $R_p$  и  $R_a$  — сопротивления слоя *p*-InAsSbP и анода соответственно [15]. Пример расчета распределения обратного тока и эквивалентную схему диода, поясняющие причину неоднородности плотности тока в диодах на основе InAsSbP, можно

найти в работах [16,10]. При уменьшении обратного смещения и переходе к прямому смещению  $R_{pn}$  снижается, а  $R_p$  и  $R_a$  остаются неизменными, и сгущение линий тока вблизи анода усиливается. При 25°C и большом обратном смещении выполняется условие  $R_{pn} > R_p + R_a$  и распределение ОЛ (обратного тока) по поверхности чипа равномерно. При повышении температуры от 25 до 80°C происходит экспоненциальное уменьшение значения  $R_{pn}$  (см., например, зависимость  $R_0(1/T)$  в [3]) и, вероятно, возрастание удельного сопротивления слоя *p*-InAsSbP. Из зависимости  $1/\rho(T)$  для ближайшего аналога *p*-InAs, приведенной в [17], ожидаемое увеличение  $R_p$  для *p*-InAsSbP составляет  $\sim (10-15)\%$ . Вследствие указанных причин равномерное распределение ОЛ (обратного тока) при 25°C сменяется сгущением линий тока вблизи анода при 50–80°C.

Для оценки роли безызлучательной оже-рекомбинации и применимости предложенного в [10] метода обработки ВАХ на первом этапе были проанализированы *L*-*I*-характеристики, для чего с учетом данных о распределении интенсивности ПЛ и ОЛ по поверхности чипа рассчитывалась полная интенсивность люминесценции  $L_\Sigma$  для идеализированного диода с прозрачным анодом:

$$L_\Sigma = \int_x \int_y L(x, y) dx dy + S_a L_{\max},$$

где  $L(x, y)$  — интенсивность люминесценции в точке с координатами  $x, y$  на поверхности контактного слоя,  $S_a$  — площадь анода,  $L_{\max}$  — интенсивность люминесценции в непосредственной близости от анода. На рис. 3 представлены нормированные зависимости  $L_\Sigma$  от  $I_{\text{tot}}$  ( $I_{\text{tot}}$  — полный ток). При прямых токах ( $I_{\text{tot}} \leq 3.2$  мА) и во всем исследованном диапазоне обратных токов данные зависимости были линейны, что свидетельствует

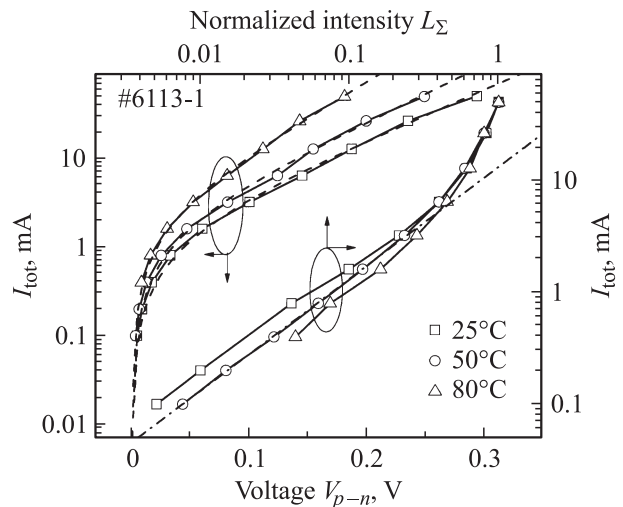


Рис. 3. Ватт-амперные ( $L_\Sigma - I_{\text{tot}}$ ) и вольт-амперные ( $I_{\text{tot}} - V_{p-n}$ ) характеристики ФД при различных температурах. Штриховые линии — функции вида  $I = I_{\text{tot\_sat}}[\exp(eV_{p-n}/nkT) - 1]$ .

о незначительности безызлучательной рекомбинации. При токах  $I_{\text{tot}} > 3.2 \text{ мА}$  характеристики  $L_{\Sigma} - I_{\text{tot}}$  были сублинейными, очевидно, вследствие влияния ожерекомбинации.

На рис. 3 представлены также ВАХ  $I_{\text{tot}} - V_{p-n}$  ( $V_{p-n} = V - I_{\text{tot}}R_s$ , где  $V$  — измеренное напряжение,  $R_s$  — последовательное сопротивление, определяемое из  $I - V$ -характеристики при больших токах) для ФД при различных температурах и функции вида  $I_{\text{tot}} = I_{\text{tot\_sat}} [\exp(eV_{p-n}/nkT) - 1]$ .<sup>1</sup> Варьируемые параметры ( $R_s$ , ток насыщения  $I_{\text{tot\_sat}}$  и фактор идеальности  $n$ ) определялись аппроксимацией характеристик  $V - I_{\text{tot}}$  функциями вида  $V = (nkT/e) \ln[(I_{\text{tot}}/I_{\text{tot\_sat}}) + 1] + I_{\text{tot}}R_s$ ; значения  $I_{\text{tot\_sat}}$ ,  $n$ ,  $R_s$ , полученные по методу наименьших квадратов, представлены в таблице. Из таблицы видно, что ток насыщения  $I_{\text{tot\_sat}}$  возрастает, а  $n$  уменьшается с увеличением температуры. Полученный характер изменения  $I_{\text{tot\_sat}}$  согласуется с общепринятыми представлениями о возрастании обратного тока и усилении роли диффузионного механизма токопрохождения в диодах при повышении температуры [18]. Высокие значения  $n$  связаны, как и в случае диодов на основе InAs [10], вероятнее всего, с искажением ВАХ вследствие сгущения линий тока под анодом.

Основные электрические характеристики диода #6113-1

$T$ , °C	$I_{\text{tot\_sat}}$ , мА	$n$	$R_s$ , Ом	$R_0A$ , Ом · см <sup>2</sup>	$R_{0a}S_a$ , Ом · см <sup>2</sup>	$F_0$	$\rho$ , Ом · см
25	1.3	3	2	0.069	0.056	0.62	0.064
50	1.56	2.5	1.81	0.048	0.031	0.35	0.071
80	2.11	1.86	2.89	0.032	0.008	0.07	0.072

Наличие линейных участков на  $L_{\Sigma} - I_{\text{tot}}$ -характеристиках при небольших смещениях позволило нам на втором этапе оценить ток  $I_a$ , протекающий в области  $p-n$ -перехода под анодом, в соответствии с формулой<sup>2</sup>

$$I_a = I_{\text{tot}}S_aL_{\text{max}}/L_{\Sigma}.$$

Из ВАХ (из характеристик  $I_a - V$ ) было рассчитано произведение дифференциального сопротивления области  $p-n$ -перехода под анодом при нулевом смещении на площадь анода ( $R_0A$ ); значения  $R_0A$  и  $R_{0a}S_a$  приведены в таблице. Как видно из таблицы, значения  $R_0A$  существенно ниже, чем  $R_{0a}S_a$ , различие в значениях особенно заметно при высоких температурах. Данное различие связано с невысоким значением эффективной площади протекания тока при малых смещениях, при повышении температуры эффективная площадь протекания тока

<sup>1</sup> Строго говоря, последовательное сопротивление возрастает с увеличением тока. В численных оценках мы пренебрегали изменением  $R_s$  с изменением тока, поскольку при малых токах поправки, связанные с влиянием последовательного сопротивления и влиянием изменения  $R_s$  с током, малы.

<sup>2</sup> Отклонение  $L_{\Sigma} - I_{\text{tot}}$ -характеристик от линейных функций не превышало 10%, и погрешность определения  $I_a$  была невелика.

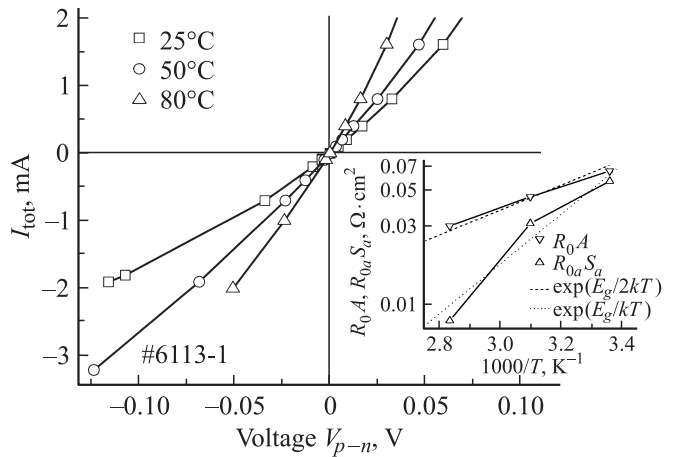


Рис. 4. Зависимости полного тока в ФД  $I_{\text{tot}}$  от напряжения на  $p-n$ -переходе  $V_{p-n}$  при малых смещениях и различных температурах. На вставке — температурные зависимости произведений динамического сопротивления ФД на площадь  $p-n$ -перехода ( $R_0A$ ) и динамического сопротивления области  $p-n$ -перехода под анодом на площадь анода ( $R_{0a}S_a$ ) при  $V = 0$ .

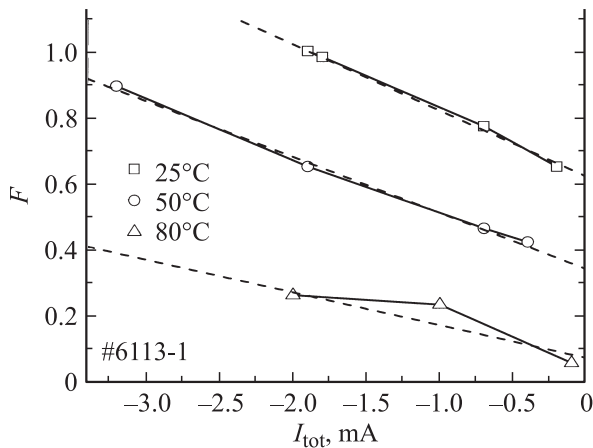
уменьшается до размеров анода, что приводит к завышению значений  $R_0A$  из-за неопределенности величины  $A$ . На рис. 4 представлены ВАХ ( $I_{\text{tot}} - V_{p-n}$ ) при малых смещениях, а также температурные зависимости  $R_0A$  и  $R_{0a}S_a$  (см. вставку). Температурная зависимость  $R_0A$  хорошо описывалась функцией вида  $\exp(E_g/2kT)$  ( $E_g$  — ширина запрещенной зоны), наличие в показателе экспоненты множителя 2 связано с изменением площади протекания тока.<sup>3</sup> Температурная зависимость  $R_{0a}S_a$ , определенная из „неискаженных“ характеристик  $I_a - V_{p-n}$ , описывалась функцией вида  $\exp(E_g/kT)$ , что свидетельствует о преобладании диффузионного механизма токопрохождения в  $p-n$ -переходе. Вывод о преобладании диффузионного механизма токопрохождения согласуется с результатами анализа зависимости  $R_0(1/T)$ , полученной, например, в [3] для флип-чип образцов на основе аналогичных структур с широким анодом (т.е. с высоким фактором заполнения анодом мезы), в которых влияние сгущения линий тока несущественно.

Из распределения интенсивности ПЛ по поверхности чипа при токе  $I_{\text{tot}} = 3.2 \text{ мА}$  были оценены расстояния, на которых значение тока уменьшается в  $e$  раз (длины растекания тока  $l_s$  [9]). Эти значения использовались для расчета удельного объемного сопротивления  $\rho$  контактного слоя  $p\text{-InAsSbP}$  по формуле

$$t = \rho l_s \left( \frac{D_a + l_s}{2} \right) \left( J_0 \frac{e}{nkT} \right) \ln \left( 1 + \frac{2l_s}{D_a} \right),$$

где  $t$  — толщина контактного слоя,  $J_0$  — плотность тока в области  $p-n$ -перехода под контактом [13]; фактор идеальности  $n = 1$ . Полученные значения и характер температурного изменения  $\rho(T)$  для твердого

<sup>3</sup> По аналогии с  $R_s$  можно считать, что значение  $R_0$  также зависит от тока.



**Рис. 5.** Зависимости фактора сбора фотогенерированных носителей  $F$  от полного тока  $I_{tot}$  для ФД при различных температурах. Штриховые линии — аппроксимирующие линейные функции.

раствора  $p$ -InAsSbP (см. таблицу) соответствуют данным для  $p$ -InAs с концентрацией дырок в пределах  $(0.4\text{--}1.3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  [17,19], что находится в согласии с нашими представлениями об уровне легирования слоев  $p$ -InAsSbP, полученном из независимых измерений.

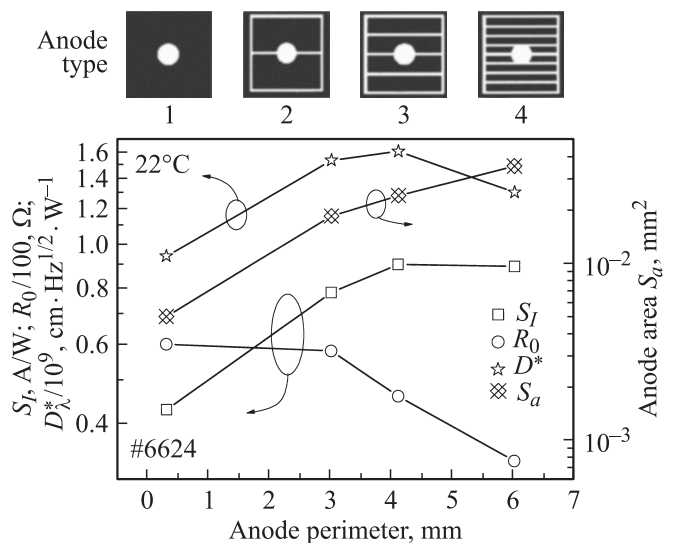
На рис. 5 представлены зависимости фактора использования оптической мощности для падающего на диод излучения (или фактора сбора фотогенерированных носителей  $F(I_{tot})$ ), полученные при трех значениях температуры из распределения интенсивности ОЛ по поверхности чипа по формуле

$$F = \frac{\int \int_{x,y} L(x,y) dx dy}{L_{max}(A - S_a)}$$

Как видно из рис. 5, зависимости  $F(I_{tot})$  хорошо аппроксимируются линейными функциями, значения отсечки на оси ординат при  $I_{tot} = 0$  ( $F_0$ ) приведены в таблице. Как видно из таблицы, фактор сбора фотогенерированных носителей  $F_0$  существенно меньше 1 уже при комнатной температуре и снижается почти на порядок при повышении температуры до  $80^\circ\text{C}$ . Из анализа данных на рис. 5 понятно, что эффективность сбора неравновесных носителей и чувствительность ФД могут быть повышены тремя способами: 1) приложением обратного смещения к ФД; 2) снижением рабочей температуры ФД; 3) использованием контактов с большим периметром и малой площадью. Приложение обратного смещения к ФД приводит к возрастанию темновых токов и шумов, негативно сказывающихся на параметрах ФД; влияние этих факторов на работу ФД особенно велико при высоких температурах. Снижение рабочей температуры ФД связано с применением термоэлектрических охладителей, имеющих высокие энергопотребление и стоимость. Увеличение же периметра контакта предполагает только изменение конфигурации шаблонов, используемых при формировании верхнего контакта, и

небольшую корректировку процессов фотолитографии, и поэтому является, по-видимому, наименее затратным. Как будет показано далее, последний способ позволяет на порядок повысить чувствительность ФД при  $80^\circ\text{C}$ .

На рис. 6 представлены зависимости  $S_I$ ,  $R_0$  и  $D_\lambda^*$  от периметра анода  $P_a$  при комнатной температуре. Из рис. 6 видно, что при увеличении периметра анода происходит снижение  $R_0$  вследствие улучшения растекания тока по поверхности диода при малых смещениях. При переходе от точечного анода (тип 1) к аноду с большим периметром (тип 3,  $P_a = 4.1 \text{ мм}$ ) значения  $S_I$  и  $D_\lambda^*$  возрастают в 2 и 1.5 раза соответственно, очевидно, вследствие преобладания возрастания эффективности сбора неравновесных носителей над увеличением степени затенения анодом активной области. При дальнейшем увеличении  $P_a$  значение  $S_I$  почти не изменяется, так как влияние вышеназванных факторов, вероятнее всего, равнозначно; величина  $R_0$  при этом уменьшается в 1.4 раза, что приводит к снижению  $D_\lambda^*$  в 1.2 раза. Значение  $S_I = 0.9 \text{ А/Вт}$ , полученное для образцов с анодом типа 3, было несколько меньше, чем для флип-чип диодов с иммерсионными линзами ( $1.2 \text{ А/Вт}$ ) [3], но существенно выше, чем для ФД на основе ДГС ( $0.5 \text{ А/Вт}$ ) [6]. Значение  $D_\lambda^* = 1.6 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{Вт}$  для ФД с развитым анодом (тип 3) по порядку величины соответствовало значениям, полученным для диодов на основе ДГС [6] и для флип-чип диодов со встроенными концентраторами излучения [4]. Следует отметить, что повышение токовой чувствительности  $S_I$ , достигаемое за счет применения развитого контакта и сопровождаемое снижением  $R_0$ , может создать определенные трудности для практического применения таких ФД, поскольку согласно оценкам, сделанным в [20], для низкоом-



**Рис. 6.** Зависимости токовой чувствительности  $S_I$ , динамического сопротивления при нулевом смещении  $R_0$  и обнаружительной способности  $D^*$  ФД от периметра анода (левая шкала). Для справки представлены также площадь анода (правая шкала) и типы анодов 1–4 (вверху).

ных диодов ( $R_0 < 50$  Ом) современная элементная база не позволяет реализовать фотоприемное устройство (ФД + усилитель) с предельными характеристиками.

#### 4. Заключение

Таким образом, показано, что в ФД средневолнового диапазона (длины волн  $\lambda > 4$  мкм) на основе InAsSb имеет место невысокая эффективность сбора фотогенерированных носителей из удаленных от анода областей  $p-n$ -перехода при  $25^\circ\text{C}$ , снижающаяся почти на порядок при повышении температуры до  $80^\circ\text{C}$  из-за сгущения линий обратного тока. Увеличение периметра анода позволяет существенно повысить коэффициент сбора неравновесных носителей и чувствительность ФД на основе InAsSb при  $25-80^\circ\text{C}$ . Зависимость обнаружительной способности ФД от периметра анода имела максимум, обусловленный, с одной стороны, увеличением площади сбора неравновесных носителей, с другой стороны, — увеличением степени затенения анодом активной области и уменьшением динамического сопротивления ФД. При переходе от точечного анода к развитому токовая чувствительность и обнаружительная способность ФД при  $22^\circ\text{C}$  возросли в 2 и 1.5 раза соответственно. Созданы ФД, эффективно работающие в диапазоне спектра 2.2–4.5 мкм, которые будут полезны при решении ряда практических задач, например, при анализе содержания  $\text{CO}_2$  в воздухе. Указанные закономерности являются общими для узкозонных  $p-n$ -структур и должны учитываться при анализе характеристик и при проектировании ФД, особенно, работающих при повышенных температурах в режиме измерения фототока.

#### Список литературы

- [1] G.Y. Sotnikova, G.A. Gavrillov, S.E. Aleksandrov, A.A. Karalov, S.A. Karandashev, B.A. Matveev, M.A. Remenny. *Sensors J. IEEE*, **10** (2), 225 (2010). doi: 10.1109/JSEN.2009.2033259.
- [2] T.G.J. Jones, B. Matveev, V. Vanshteyn, C. Besson, O.C. Mullins, L. Jiang. UK Patent 2402476, published 03.08.2005.
- [3] M.A. Remenny, B.A. Matveev, N.V. Zotova, S.A. Karandashev, N.M. Stus, N.D. Ilinskaya. *Proc. SPIE*, **6585**, 658504 (2007). doi: 10.1117/12.722847.
- [4] А.Л. Закгейм, Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стус, А.Е. Черняков. *ФТП*, **43** (3), 412 (2009).
- [5] B.A. Matveev, N.V. Zotova, S.A. Karandashev, M.A. Remenny, N.M. Stus, G.N. Talalakin. *Proc. SPIE*, **4650**, 173 (2002). doi: 10.1117/12.467661.
- [6] A. Krier, W. Suleiman. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 083512 (2006).
- [7] M. Karras, J.L. Reverchon, G. Marre, C. Renard, B. Vinter, X. Marcadet, V. Berger. *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 102103 (2005).
- [8] S.A. Myers, E. Plis, E.P.G. Smith, S. Krishna. *SPIE Newsroom*, 101117/2.1201010.003269.
- [9] Ф. Шуберт. *Светодиоды*, пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича, 2-е изд. (М., Физматлит, 2008).
- [10] Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, А.Ю. Рыбальченко, Н.М. Стус. *ФТП*, **45** (4), 554 (2011).
- [11] С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, И.В. Мжельский, В.Г. Половинкин, М.А. Ременный, А.Ю. Рыбальченко, Н.М. Стус. *ФТП*, **46** (2), 259 (2012).
- [12] Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стус. *Письма ЖТФ*, **3** (5), 8 (2012).
- [13] А.Л. Закгейм, Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стус, А.Е. Черняков. *Прикл. физика*, № 6, 143 (2008).
- [14] В.М. Базовкин, А.А. Гузев, А.П. Ковчавцев, Г.Л. Курьшев, А.С. Ларшин, В.Г. Половинкин. *Прикл. физика*, № 2, 97 (2005).
- [15] V.K. Malyutenko, A.V. Zinovchuk, O.Yu. Malyutenko. *Semicond. Sci. Technol.*, **23**, 085004 (2008).
- [16] V.K. Malyutenko, O.Yu. Malyutenko, A.D. Podoltsev, I.N. Kucheryavaya, B.A. Matveev, M.A. Remenny, N.M. Stus. *Appl. Phys. Lett.*, **79** (25), 4228 (2001).
- [17] O.G. Folberth, O. Madelung, H. Weiss. *Z. Naturforsch.*, **9A**, 954 (1954).
- [18] В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. *Полупроводниковые приборы*, 5-е изд. (СПб., „Лань“, 2001).
- [19] [http://www.matprop.ru/InAs\\_electric](http://www.matprop.ru/InAs_electric)
- [20] Г.А. Гаврилов, Б.А. Матвеев, Г.Ю. Сотникова. *Письма ЖТФ*, **37** (18), 50 (2011).

Редактор Л.В. Шаронова

#### Surface illuminated InAsSb photodiodes ( $\lambda_{0.1} = 4.5 \mu\text{m}$ ) operating at $25-80^\circ\text{C}$

N.D. Ilinskaya, A.L. Zakgeim<sup>+</sup>, S.A. Karandashev, B.A. Matveev, V.I. Ratushnyi\*, M.A. Remenny, A.Yu. Rybal'chenko, N.M. Stus', A.E. Chernyakov<sup>+</sup>

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

<sup>+</sup> Scientific-Technological Center for Microelectronics  
and Submicrometer Heterostructures,  
Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

\* South Russian State Technical University  
(Novocherkassk Polytechnic Institute),  
346400 Novocherkassk, Russia

**Abstract** We present analysis of current-voltage characteristics, zero bias resistance and their temperature dependence in InAsSb photodiodes accounting for current crowding effect revealed through the measurements of negative and „positive“ luminescence spatial distribution. Temperature and contact shape and size influence on collection efficiency, sensitivity and detectivity are also discussed.