

Пространственное перераспределение излучения во флип-чип фотодиодах на основе двойных гетероструктур InAsSbP/InAs

© А.Л. Закгейм¹, Н.Д. Ильинская², С.А. Карандашев², А.А. Лавров³, Б.А. Матвеев²,
М.А. Ременный², Н.М. Стусь², А.А. Усикова², А.Е. Черняков¹

¹ НТЦ микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

³ ООО „ИоффеЛЕД“,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: ioffeled@mail.ru

(Получена 26 июля 2016 г. Принята к печати 1 августа 2016 г.)

Проведены измерения и анализ пространственного распределения равновесного и неравновесного (в том числе люминесцентного) излучения в средневолновых ИК флип-чип фотодиодах на основе двойных гетероструктур InAsSbP/InAs ($\lambda_{\max} = 3.4$ мкм) с учетом конструктивных особенностей фотодиодов, включая отражательные свойства омических контактов. Сделана оценка увеличения оптической площади сбора фотонов за счет лучей, испытывающих многократные отражения внутри полупроводниковых чипов с различающимися геометрическими характеристиками.

DOI: 10.21883/FTP.2017.02.44117.8380

Введение

Возникновению вблизи от $p-n$ -перехода неравновесных электронно-дырочных пар предшествуют, как правило, процессы отражения и преломления потоков неравновесного излучения при его вхождении в полупроводник. Эти процессы могут иметь существенное влияние на величину эффективной площади сбора фотонов, и потому они являлись предметом изучения во многих публикациях, посвященных полупроводниковым фотоприемникам. Однако применительно к фотодиодам (ФД) на основе структур с гетеропереходом InAsSbP/InAs, используемым в пирометрии [1,2], газовом анализе [3] и в качестве термоэлектрических преобразователей [4], указанные исследования были крайне ограниченными и не охватывали многих аспектов указанного вопроса. Так, например, оценка отражательных свойств омических контактов к слоям InAsSbP с дырочным типом проводимости (анодов) вблизи максимума спектральной фоточувствительности проводилась лишь однажды [5], а пространственная неоднородность фоточувствительности, обусловленная вхождением фотонов в кристалл вдали от анода ограниченной площади, рассматривалась лишь для ФД, освещаемых со стороны слоя p -типа (англ. — Front Surface Illuminated Photodiodes (FSI PDs)). В таких ФД основной причиной неоднородности являются неравномерное растекание тока и неполный сбор фототока [6,7], а не перераспределение излучения внутри полупроводникового чипа.

В данной работе проводится анализ пространственного распределения интенсивности равновесного и неравновесного излучения в ФД на основе двойных гетероструктур P -InAsSbP/ n -InAs/ N -InAsSbP, выращенных на прозрачной сильнолегированной подложке n^+ -InAs(100)

и имеющих конструкцию типа флип-чип (англ. — back-side illuminated (BSI) PD), и даются оценки отражательных свойств контактов и пространственной неоднородности фоточувствительности за счет потоков излучения, многократно отраженных внутри полупроводникового кристалла.

Методика измерений и описание образцов

Для создания ФД использовались двойные гетероструктуры P -InAsSbP (2–3 мкм)/ n -InAs (3–4 мкм)/ N -InAsSbP (2–3 мкм)/ n^+ -InAs(110 мкм, $n^+ = 2-3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}(\text{Sn})(100)$), аналогичные описанным нами ранее (см., например, [8]). При этом, согласно [9], имело место примерное совпадение местоположения гетерограницы и $p-n$ -перехода, а также плавное изменение концентрации легирующей примеси в области объемного заряда; обе указанные особенности важны для получения низких значений темновых токов и барьерной емкости диодов [8].

Распределение в ближнем поле интенсивности электролюминесценции (ЭЛ, $U_{\text{bias}} > 0$) и отрицательной люминесценции (ОЛ, $U_{\text{bias}} < 0$), а также отраженного от образца излучения светодиода LED34Sg с иммерсионной линзой и максимумом излучения на длине волны 3.4 мкм [10] измерялось с помощью ИК микроскопа, оборудованного охлаждаемой до 77 К матрицей 128×128 из арсенида индия, имеющей максимум фоточувствительности на длине волны ~ 3 мкм и описанной в [11].

С помощью фотолитографии на полупроводниковой пластине выделялись/формировались прямоугольные чипы размером 580×430 мкм, имевшие круглую ме-

зу диаметром 35, 85, 175 или 265 мкм с круглым металлическим анодом и широким подковообразным металлическим катодом, расположенным сбоку от мезы на поверхности подложки n^+ -InAs, как показано на рис. 1, *a, b*. В состав анода входили, в основном, марганец и серебро, катод был изготовлен напылением композиции из последовательности слоев Cr–Au–Ni–Au; как и анод он был „усилен“ при электрохимическом осаждении слоя золота толщиной 2.5 мкм. Непосредственно перед нанесением контактов методом ионно-лучевого травления в области будущего контакта удалялась часть слоя, в результате толщина слоя P -InAsSbP в области контактов уменьшалась на $\Delta \approx 0.25$ мкм. ФД представляли собой полученные скалыванием по плоскостям $\{110\}$ прямоугольные чипы.

Для изучения отражательных свойств анодов были также изготовлены образцы-спутники, представлявшие собой клиновидные слои P -InAsSbP толщиной 0–5 мкм, содержащие полосковые контакты шириной 200 мкм. При этом слой P -InAsSbP был приклеен к стеклянной пластинке так, что свободная от контактов поверхность P -InAsSbP была обращена в сторону микроскопа (см. рис. 2, *a*).

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1, *c* приведено ИК изображение несмонтированного чипа ФД, находящегося на поверхности зеркала с алюминиевым покрытием (коэффициент отражения $R \geq 0.9$). На рис. 1, *c* и на всех последующих рисунках использована стандартная гамма раскраски: белому цвету соответствует большая интенсивность излучения, темному — малая. На изображениях со стороны эпитаксиальных слоев/контактов в ИК (рис. 1, *c*) и в видимом (рис. 1, *b*) диапазонах спектра хорошо видны более яркие по отношению к другим областям прямоугольная „рамка“, соответствующая вытравленным по краям чипа канавкам разделения, и „кольцо“ вокруг мезы. Эти краевые области/„склоны“ проявляются из-за того, что наклонные области эффективно перенаправляют рассеянное излучение из областей вне объекта измерения на входное отверстие микроскопа/фотоаппарата. По этой же причине зеркальные (или близкие к зеркальным) поверхности, перпендикулярные направлению измерения, выглядят темными, поскольку нормально падающих лучей в описываемом эксперименте практически нет. Для обоих микроскопов объектив не является источником подсвечивающего излучения: для оптического микроскопа подсветка организована диффузно рассеянным светом, исходящим с боковых направлений, а для ИК микроскопа его объектив является „холодным“ (т.е. слабо излучающим объектом), и поэтому основная часть регистрируемого излучения формируется за счет собственного теплового излучения полупроводника и излучения, отраженного от склонов.

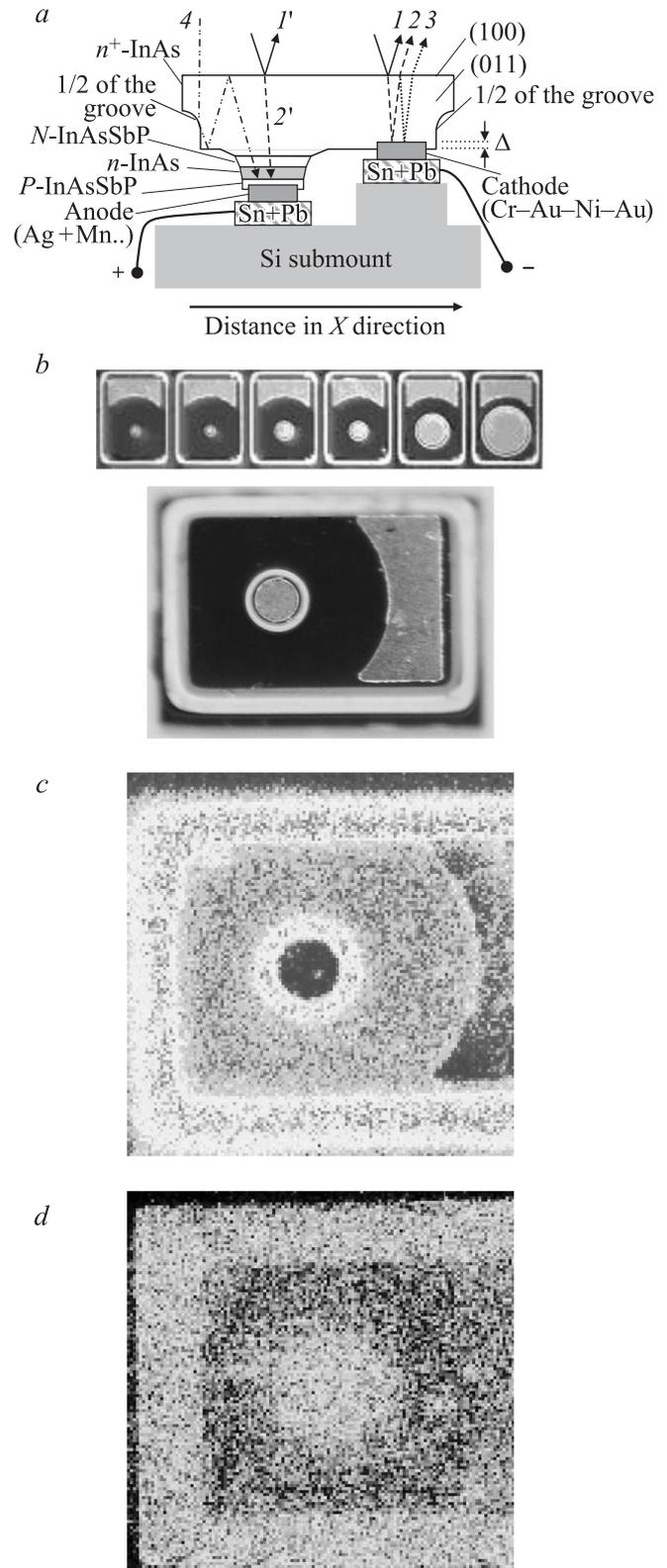


Рис. 1. Схема сечения (*a*), фотография однотипных чипов ФД с разными диаметрами мезы (*b*) и ИК изображения чипа с мезой диаметром 85 мкм со стороны контактов (слоев) (*c*) и подложки (*d*) в условиях термодинамического равновесия ($U = 0$, $T = 300$ К). Лучи в области анода: 1', 2', лучи в области катода: 1, 2, 3. Для наглядности на фотографиях использован разный масштаб.

Как видно из рис. 1, *b*, *c* контраст изображения для обоих контактов существенно выше для ИК области, чем для видимого диапазона спектра. Вероятнее всего, это обусловлено тем, что характерный размер шероховатостей металлической поверхности (δ) меньше длины волны при ИК измерениях ($\delta < \lambda = 3 \mu\text{м}$); для видимого диапазона это условие не выполняется (т.е. $\delta > \lambda = 0.4\text{--}0.8 \mu\text{м}$), и контакт диффузно рассеивает попадающее на него с боков видимое излучение. При этом можно отметить, что интенсивность ИК излучения (на рис. 1 это — цвет), отраженного от зеркала (см. горизонтальную область в верхней части рис. 1, *c*), практически совпадает с интенсивностью излучения от круглого анода, что позволяет сделать вывод о высоком коэффициенте отражения контакта (точнее — его поверхности, не контактирующей с полупроводником): $R > 0.9$.

При измерении со стороны подложки (см. рис. 1, *d*) структура ИК изображения видоизменяется, а именно: область мезы проявляется в данных условиях, как область с повышенной излучательной/поглощательной способностью. Эти данные вполне закономерны, если принять во внимание, что конструкция ФД типа BSI предполагает наличие значительной прозрачности у подложки и сильное поглощение излучения активным слоем; максимум спектра чувствительности при этом имеет место при $\lambda = 3.4 \mu\text{м}$ [8]. На самом деле подложка прозрачна лишь частично, поскольку на ИК изображении она (см. область, окружающую мезу) более яркая, чем зеркало, т.е. в ней присутствует заметное поглощение на длине волны 3 мкм. В этой связи оценка коэффициента отражения от границы раздела *P*-InAsSbP/анод была проведена с помощью измерений образцов (слоев) без подложки, описанных далее.

На рис. 2 приведены схема (*a*), фотография (*b*) и ИК изображение (*c*) одного из образцов-спутников при температуре 88°C. Как видно из рис. 2, *c*, контактные полоски имеют наименьшую интенсивность излучения, помимо этого разнотолщинные области образца (клина) характеризуются „волнистой“, т.е. осцилляционной структурой ИК изображения, возникающей, очевидно, вследствие интерференции тепловых лучей. В области с большой толщиной слоя (справа на рис. 2, *c*) осцилляции пропадают, очевидно, вследствие сильного поглощения излучения в *P*-InAsSbP. Нетрудно заметить, что фазы осцилляций при примерно одинаковой толщине слоя были противоположны для смежных областей над контактом (области темных горизонтальных по отношению к чертежу полосок) и над свободными от контакта областями (области более светлых полосок). Это продемонстрировано также и на рис. 2, *d*, где представлено распределение интенсивности излучения вдоль полосок контакта для двух близко расположенных областей образца, а именно, для области, где имеет место отражение от границ металл/полупроводник ($Y = 1300 \mu\text{м}$, область *M* на рис. 2, *b*, *c*) и области сопряжения полупроводник/клей (область *F* с $Y = 1129 \mu\text{м}$ там же). Локальные экстремумы двух зависимостей в своем большинстве сдвинуты

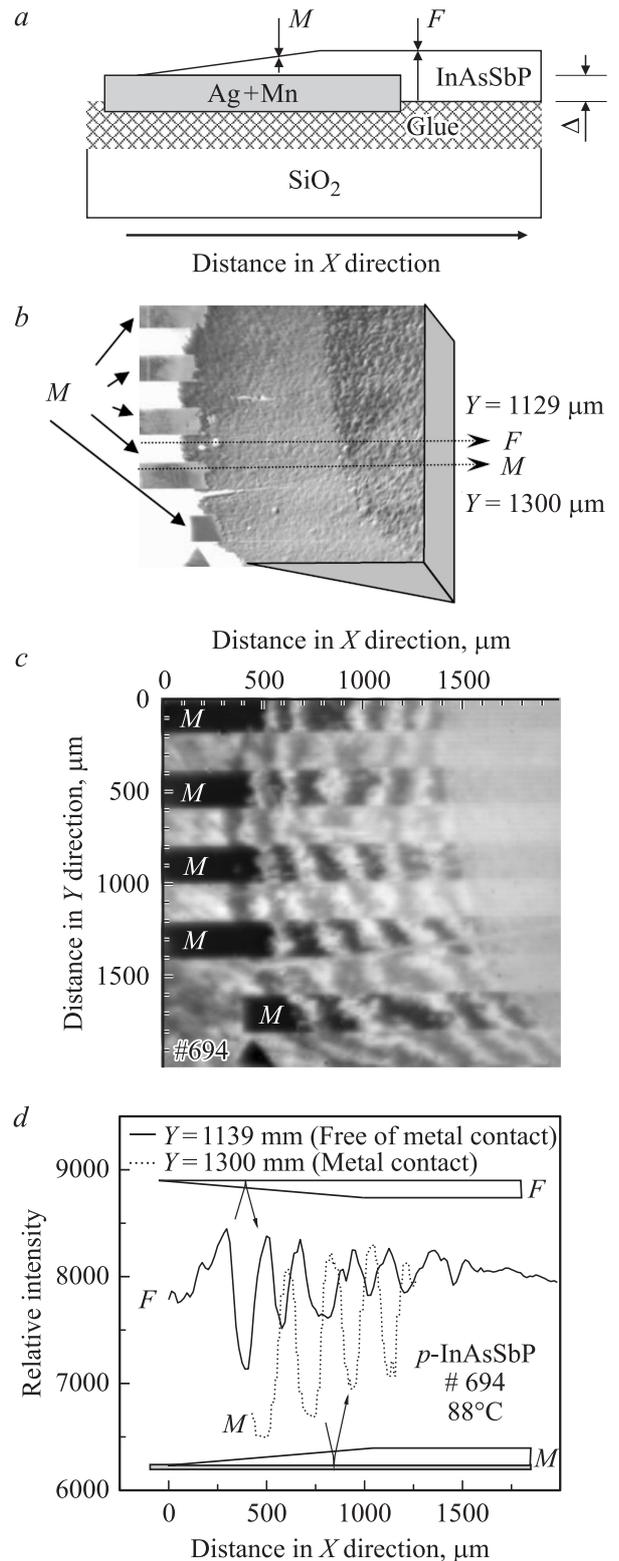


Рис. 2. Схема (*a*), фотография (*b*) и ИК изображение (*c*) со стороны слоя клиновидного образца и распределение интенсивности излучения (*d*) вдоль двух выделенных направлений: над металлическим контактом (область *M*, штриховая линия) и над слоем, где контакта нет (область *F*, сплошная линия). На фотографии образца (*b*) для наглядности дорисованы две боковые грани.

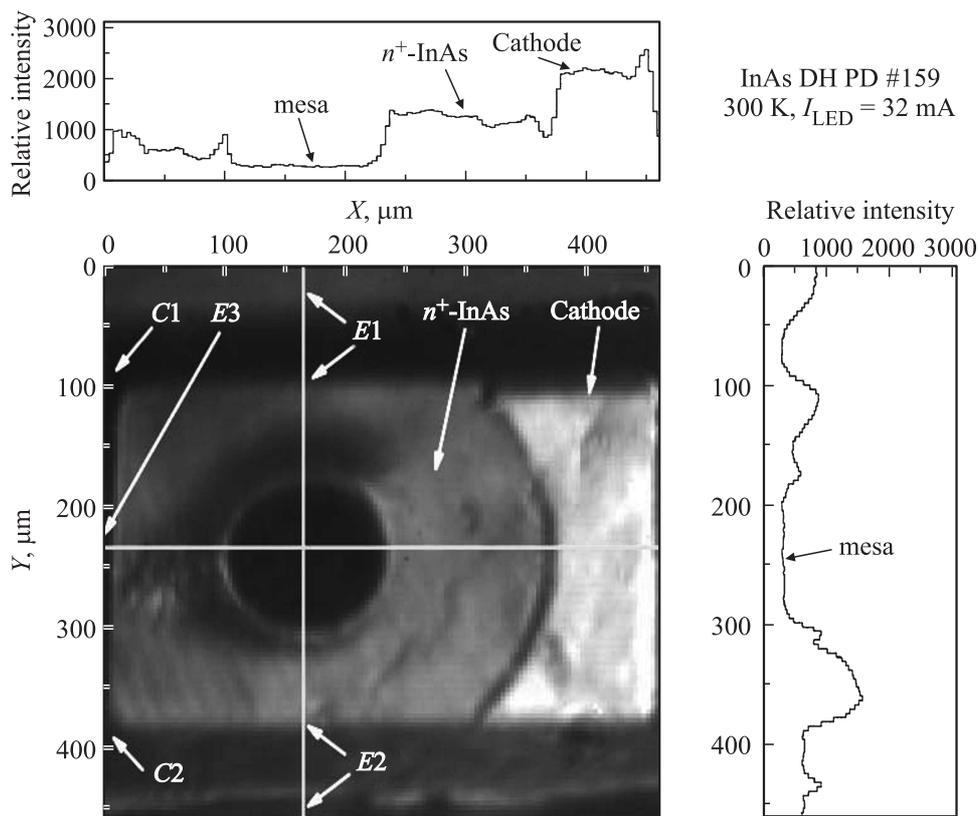


Рис. 3. ИК изображение ФД, полученное при подсветке внешним источником со стороны n^+ -InAs и соответствующее ему распределение интенсивности излучения в „вертикальном“ (Y , правая панель) и „горизонтальном“ (X , верхняя панель) сечениях, показанных сплошными светлыми линиями. Буквами „E“ обозначены края, а буквами „C“ — углы чипа.

друг относительно друга по фазе (на π), что объясняется тем, что при отражении излучения от металла фаза световой волны изменяется на π , в то время как при отражении от границы полупроводник/непроводящий клей она сохраняется¹. Вероятно, по этой же причине интерференция волн слоя без металла начинается при меньших значениях толщины слоя P -InAsSbP, чем для начала появления интерференционных полос над слоем с металлом.

Для количественного описания осцилляций излучательной способности при интерференции в полупроводниковой пластине можно воспользоваться аналитическим выражением для разности локальных значений минимальной и максимальной интенсивности собственного излучения плоскопараллельной полупроводниковой пластины $\Delta I = I_{\max} - I_{\min}$, приведенным в работе [12]:
$$\Delta I = \frac{4\eta R(1-R)(1-\eta)}{(1-\eta R)^2(1+\eta R)},$$
 где R — средний коэффициент отражения, η — степень ослабления теплового излучения при однократном прохождении через пластину². При

¹ Небольшое различие в толщине $\Delta = 0.25$ мкм не является решающим при сдвиге фазы, поскольку оно мало по сравнению с длиной волны излучения.

² Линейность фотоответа в фотоприемной матрице была проверена и подтверждена при измерениях интенсивности отраженных лучей при различных накачивающих токах в калиброванном (т.е. с известной ватт-амперной характеристикой) светодиоде LED34Sr.

наилучшем соответствии данных на рис. 2 приведенному выше соотношению коэффициент отражения от контакта, по крайней мере, в 2 раза выше, чем для области без него. При этом нижняя оценка коэффициента отражения от границы P -InAsSbP/Ag + Mn составляла 0.3.

При использовании внешней подсветки ИК изображения чипа „инвертируются“: слабо светящиеся области (при равновесии) оказываются наиболее яркими (при подсветке) (см., например, [13]). Это же демонстрируют и данные на рис. 3, где приведено ИК изображение смонтированного на носитель чипа ФД в условиях его засветки излучением СД, направленным почти вертикально к поверхности n^+ -InAs³; там же представлено распределение интенсивности излучения с длиной волны вблизи 3 мкм в двух выделенных сечениях, параллельных граням чипа. Из рис. 3 видно, что наибольшая яркость изображения чипа соответствует области катода, а область наименьшей яркости совпадает по форме с круглой мезой. Для оценки коэффициента отражения R_c от границы раздела (ГР) катод/ n^+ -InAs была использована простая модель, предполагающая равномерное распределение интенсивности падающего на чип излучения для близко расположенных друг от друга областей и

³ На рис. 1 для наглядности показано косое падение лучей на поверхность ФД, в реальном эксперименте основная часть лучей от СД падала нормально к поверхности n^+ -InAs.

формирование отраженного от чипа потока излучения в области над мезой (I_m) лишь за счет отражения излучения от поверхности подложки (т.е. границы раздела n^+ -InAs/воздух — обозначена цифрами 001, луч, обозначенный цифрой 1' на рис. 1, а) с коэффициентом $R = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2}$, $n_1 = 1$, $n_2 = 3.52^4$. В рамках этого допущения суммарная интенсивность вышедшего из кристалла излучения, сформированного лишь с участием отражения от нижней грани чипа (см. лучи, обозначенные цифрами 2, 3 на рис. 1, а), равна интенсивности регистрируемого излучения ($I_{s,c}$) за вычетом интенсивности излучения в области мезы (анода) I_m , где индексы S и C соответствуют данным для интенсивности отраженного излучения от области чипа вне контактов и от области с катодом соответственно. Подгонка расчетных значений, наилучшим образом соответствующих эксперименту, для которого $(I_c - I_m)/(I_s - I_m) = 1.9$ проводилась при значении $R_a = 0.6$, практически совпадающим с нашими более ранними оценками коэффициента отражения от ГР контакт/полупроводник в диодах с активным слоем из InGaAsSb [13] и InAsSbP [14] с той же последовательностью металлов. Вывод о более низком, чем от зеркала, значении коэффициента отражения качественно согласуется с тем, что на „равновесном“ ИК изображении, полученном со стороны подложки (рис. 1, д), область катода более яркая, чем область без контактов (подложка выглядит менее яркой из-за зеркала с высоким коэффициентом отражения, расположенного за(под) ней).

Вполне очевидно, что отражательные свойства контактов, а также малые потери излучения на рабочей длине волны создают возможность для перераспределения неравновесного потока излучения в ФД благодаря многократному его отражению внутри полупроводникового чипа. Особую роль при этом играют края чипа, как это следует из приведенного выше анализа „равновесных“ ИК изображений. Действительно, как и в ФД типа BSI на основе InGaAsSb/GaSb [15], перераспределение ЭЛ излучения формировало яркие области вблизи краев чипа, а также в его угловых зонах (см. рис. 4, а также рис. 3, где указанные зоны обозначены буквами E (edge) и C (corner), и рис. 1, а, на котором один из вариантов формирования подобных областей обозначен крайней левой стрелкой и цифрой 4). Наибольшая интенсивность краевого излучения, как видно из рис. 4, имела место на направлениях, пересекающих мезу перпендикулярно граням чипа. В соответствии с фундаментальным принципом обратимости хода лучей в оптических системах можно ожидать, что и входящее в полупроводниковый кристалл неравновесное излучение будет также иметь указанные выше особенности пространственного распределения. Действительно, при смещении p - n -перехода в

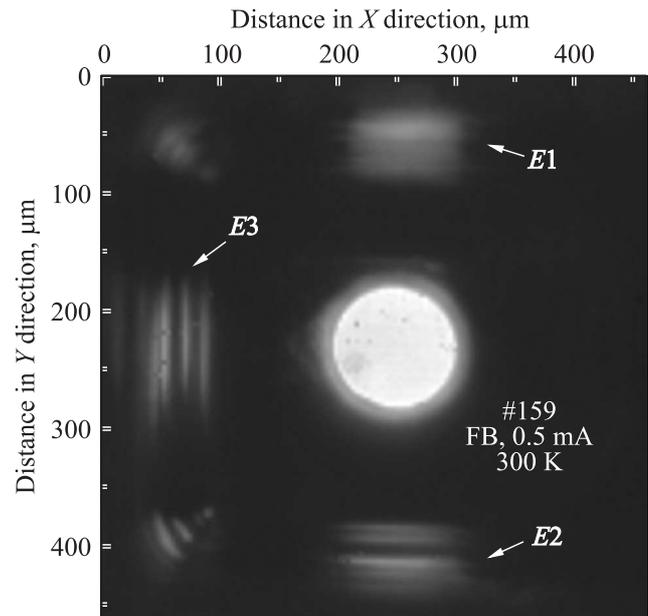


Рис. 4. ИК изображение чипа ФД при протекании через него прямого тока 0.5 мА.

обратном направлении в распределении интенсивности излучения помимо основной области с пониженной излучательной способностью, обусловленной инициацией отрицательной люминесценции (ОЛ) в области круглой мезы, наблюдались также области с пониженной излучательной способностью на краях чипа, причем их пространственное расположение закономерно коррелировало с местоположением пиков ЭЛ (см. рис. 5). Полученные данные свидетельствуют о том, что края чипа вносят ощутимый вклад в поглощаемый вблизи от p - n -перехода поток излучения. Следствием этого является, в частности, азимутальная неоднородность фоточувствительности, что важно учитывать, например, при использовании вытянутых диафрагм (или щелей), ограничивающих падающий поток излучения до размеров, близких к поперечным размерам мезы.

Разумеется, что влияние краев чипа необходимо учитывать при определении параметров фоточувствительности в тех случаях, когда ширина падающего потока больше поперечных размеров мезы. Влияние геометрических характеристик ФД на фоточувствительность отражено на рис. 6, где представлены значения токовой чувствительности (S_I) в зависимости от диаметра мезы (d) в ФД однотипной конструкции (см. рис. 1) при засветке всего чипа целиком. При расчете S_I за оптическую площадь (A_{opt}) принималась площадь мезы (A_{mesa}) или площадь всего чипа (A_{chip}). Помимо этого производились также измерения и на образцах, в которых дополнительным скальвированием граней поперечный размер (L) и, соответственно, площадь чипа (A_{sample}) уменьшалась до минимально возможных размеров, т.е. при максимальном приближении граней к краям круглой мезы ($L \approx d$).

⁴ Использованное значение коэффициента отражения от поверхности n^+ -InAs не вполне соответствует всей совокупности экспериментальных данных на рис. 3, в частности, степень отражения от области над мезой оказывается заниженной по сравнению с ожиданиями. Одной из причин может быть непараллельность верхней и нижней граней чипа, однако истинные причины указанного расхождения будут выявлены в ходе дальнейших исследований.

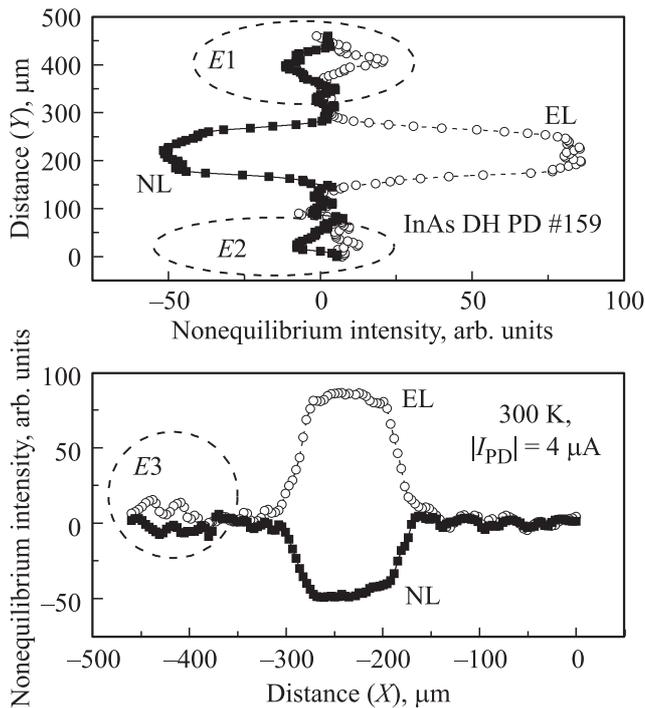


Рис. 5. Распределение интенсивности неравновесного излучения (ЭЛ (EL, $U > 0$) и ОЛ (NL), $U < 0$) вдоль вертикального (вверху) и горизонтального сечений (внизу), проходящих через центр мезы при токе через диод 4 мкА. Нулевой уровень интенсивности соответствует равновесному состоянию диода ($U = 0, I = 0$). Области, обозначенные как E1, E2 и E3, а также направления осей соответствуют таковым на рис. 3, 4.

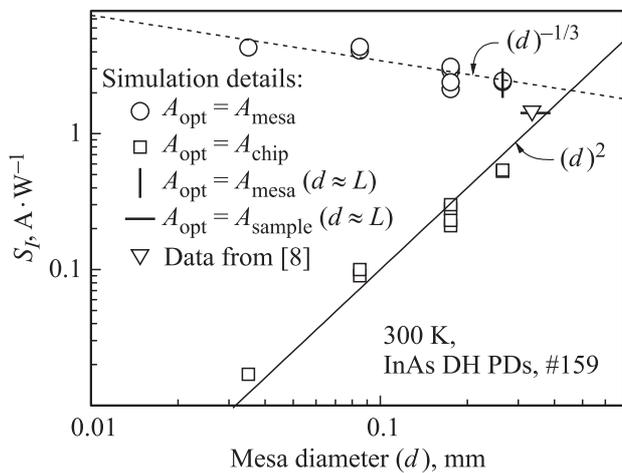


Рис. 6. Зависимость токовой фоточувствительности (S_f) от диаметра мезы (d) для ФД с одноступенчатыми чипами (\square, \circ) и для дополнительно сколотых образцов ФД ($\blacksquare, \blacklozenge$) при засветке всего чипа целиком. Сплошной линией представлена зависимость $S_f \sim (d)^2$, а штриховой — $S_f \sim (d)^{-1/3}$. Детали расчета — на графике.

Нетрудно видеть, что в условиях данных экспериментов значение S_f для стандартных чипов существенно образом зависела и от диаметра мезы, и от способа

расчета (выбора значения оптической площади), причем расчет в предположении о равенстве A_{opt} и A_{mesa} для всех диаметров мез приводил к значению квантовой эффективности, превышающей 0.7. Указанное завышенное значение, искусственно обусловленное условиями эксперимента, должно быть проигнорировано при оценке эффективности ФД, поскольку при использовании более обоснованных условий измерений, например, образцов с большим диаметром мезы и(или) диафрагм, установленных на пути лучей, внешняя квантовая эффективность не превышает 0.7 [8,16].

Очевидно, что зависимость фоточувствительности от размера мезы имеет сложный характер, поскольку при изменении диаметра изменяется соотношение между высотой мезы и ее поперечным размером, т.е. изменяются параметры „внутреннего концентратора излучения“, сформированного наклонными стенками мезы [17], а также изменяется площадь и условия сбора излучения от областей вне концентратора. Помимо этого нельзя исключать возможность влияния на S_f токов утечек по поверхности ФД с малыми размерами мезы (в нашем случае — это ФД с диаметром мезы, равным 35 мкм).

Заключение

Таким образом, показано, что в ФД на основе InAsSbP/InAs с конструкцией типа флип-чип и отражающими контактами имеется существенное перераспределение неравновесного излучения, одним из следствий которого является появление дополнительных максимумов фоточувствительности, расположенных вблизи краев чипа. Перераспределение излучения имеет следствием также и эффективное увеличение фоточувствительности (до 3-х раз) при засветке ФД с большим отношением площадей мезы и чипа. Указанные особенности необходимо учитывать при конструировании, прогнозировании и анализе реальных параметров эффективности фотопреобразования в активной области ФД.

Авторы выражают благодарность А.С. Петрову (ОАО „ЦНИИ Электрон“) за полезные обсуждения, а также Т.Б. Поповой, П.Н. Брункову (ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“) за помощь в проведении измерений. Исследования ближнего поля собственной эмиссии ФД и отраженного излучения были осуществлены в ЦКП „Элементная база радиофотоники и нанoeлектроники: технология, диагностика, метрология“.

Работа, выполненная в ООО „ИюффеЛЕД“, поддержана проектом ФЦП „Разработка технологий получения полупроводниковых фоточувствительных материалов для матричных инфракрасных фотоприемников и тепловизоров“ (код контракта 14.576.21.0057, ID: RFMEFI57614X0057).

Список литературы

- [1] S.E. Aleksandrov, G.A. Gavrillov, A.A. Kapralov, G.Yu. Sotnikova. *Physics Procedia*, **73**, 177 (2015).
- [2] X. Zhou, X. Meng, A.B. Krysa, J.R. Willmott, J.S. Ng, Ch.H. Tan, *IEEE Sens. J.* **15** (10), 5555 (2015).
- [3] А.А. Кузнецов, О.Б. Балашов, Е.В. Васильев, С.А. Логинов, А.И. Луговской, Е.Я. Черняк, *Приборы и системы. Управление контроль, диагностика*, № 6, 55 (2003).
- [4] A.Krier, M.Yin, A.R.J. Marshall, S.E. Krier. *Journal of ELECTRONIC MATERIALS* DOI: 10.1007/s11664-016-4373-0 DOI:10.1007/s11664-016-4373-0 (<http://paperity.org/p/75304169/low-bandgap-inas-based-thermophotovoltaic-cells-for-heat-electricity-conversion>) (2016).
- [5] B. Matveev, N. Zotova, N. Il'inskaya, S. Karandashev, M. Remennyi, N. Stus'. *Phys. St. sol. (c)* **2** (2), 927 (2005).
- [6] Indium Arsenide Detectors, Judson Technologies LLC, www.judsontechnologies.com
- [7] B.A. Matveev, A.V. Ankudinov, N.V. Zotova, S.A. Karandashev, T.V. L'ova, M.A. Remennyi, A.Yu. Rybal'chenko, N.M. Stus'. *Proc. SPIE*, **7597**, 75970G (2010).
- [8] P.N. Brunkov, N.D. Il'inskaya, S.A. Karandashev, N.G. Karpukhina, A.A. Lavrov, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', A.A. Usikova. *Infrared Physics and Technology*, **76**, 542 (2016), DOI information: 10.1016/j.infrared.2016.04.002.
- [9] М.А. Ременный, П.Н.Брунков, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Н.Г.Карпукхина, А.А.Лавров, Б.А. Матвеев, Н.М. Стусь, А.А. Усикова. Тр. 24-ой Межд. науч.-технич. конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 24–27 мая 2016 года, Москва, стр. 111 (2016).
- [10] www.ioffeled.com
- [11] В.М. Базовкин, А.А. Гузев, А.П. Ковчавцев, Г.Л. Курышев, А.С. Ларшин, В.Г. Половинкин. *Прикладная Физика*, № 2, 97 (2005).
- [12] К.Ю. Гуга, А.Г. Коллюх, А.И. Липтуга, В.А. Мороженко, В.И. Пипа. *ФТП*, **38** (5), 524(2004).
- [13] B.A. Matveev, Yu.M. Zadiranov, A.L. Zakgeim, N.V. Zotova, N.D. Il'inskaya, S.A. Karandashev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', A.A. Usikova, O.A. Usov, A.E. Cherniakov. *Proc. of SPIE*, **7223**, 72231B-1-7 (2009), doi: 10.1117/12.808130
- [14] А.Л. Закгейм, Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, А.А. Усикова, А.Е. Черняков. *Прикладная Физика*, № 6, 143 (2008).
- [15] С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, А.А. Шленский, Л.С. Лунин, В.И. Ратушный, А.В. Корюк, Н.Г. Тараканова. *ФТП*, **41** (11), 1389 (2007).
- [16] P.N. Brunkov, N.D. Il'inskaya, S.A. Karandashev, A.A. Lavrov, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', A.A. Usikova. *Infrared Phys. Technol.*, **73**, 232 (2015).
- [17] А.Л. Закгейм, Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, А.Е. Черняков. *ФТП*, **43** (3), 412 (2009).

Редактор Г.А. Оганесян

Radiation spatial redistribution in flip-chip InAsSbP/InAs DH photodiodes

A.L. Zakgeim¹, N.D. Il'inskaya², S.A. Karandashev², A.A. Lavrov³, B.A. Matveev², M.A. Remennyi², N.M. Stus'², A.A. Usikova², A.E. Cherniakov¹

¹ Submicron Heterostructures for Microelectronics Research & Engineering Center, 194021 St. Petersburg, Russia

² Ioffe Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

³ IoffeLED, Ltd., 194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Reflection and redistribution of equilibrium and nonequilibrium radiation including luminescence in InAsSbP/InAs ($\lambda_{\max} = 3.4\mu\text{m}$) DH flip-chip photodiodes have been measured and analyzed. Optical area enhancement due to multiple internal reflection in photodiodes with different geometrical characteristics has been evaluated.