

Неравномерность пространственного распределения отрицательной люминесценции в фотодиодах на основе InAsSb(P) (длинноволновая граница $\lambda_{0,1} = 5.2$ мкм)

© С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев[¶], И.В. Мжельский*,
В.Г. Половинкин*, М.А. Ременный, А.Ю. Рыбальченко, Н.М. Стусь

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

* Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук,
600090 Новосибирск, Россия

(Получена 25 июля 2011 г. Принята к печати 1 августа 2011 г.)

Представлен анализ пространственной неравномерности интенсивности отрицательной люминесценции и сгущения линий прохождения тока в фотодиодах среднего инфракрасного диапазона на основе InAsSb(P) в зависимости от величины приложенного напряжения и размера контакта. Показано, что указанная неравномерность является одной из основных причин низкой чувствительности фотодиодов, имеющих невысокое значение динамического сопротивления в нуле смещения и работающих в режиме фототока.

1. Введение

Фотодиоды (ФД) для диапазона 3–5 мкм, работающие при комнатной температуре, востребованы в связи с задачами оптического мониторинга ряда природных и промышленных газов, таких как CH₄, CO, CO₂, NO_x, а также измерения концентрации C₂H₅OH в парообразном состоянии. Ранее было показано, что в отличие от узкополосных флип-чип ФД с широким анодом пространственная неравномерность прохождения прямого тока в поверхностно облучаемых фотодиодах на основе InAs с точечным контактом и относительно высоким значением динамического сопротивления при нулевом смещении ($R_0A \sim 1$ Ом · см²) приводит к существенным искажениям вида вольт-амперной характеристики и погрешностям в определении параметров ФД, адекватно устраняемым при анализе двумерного распределения электролюминесценции в ближнем поле [1]. Для прогнозирования параметров ФД крайне важным является правильное представление об эффективности сбора фотогенерированных носителей в структурах с контактом ограниченной площади, т. е. о пространственном распределении токопрохождения при обратном смещении $p-n$ -перехода. Так, например, для ФД большой площади из арсенида индия (длинноволновая граница $\lambda_{0,1} = 3.7$ мкм) приводится распределение чувствительности по поверхности [2], однако экспериментальному исследованию вышеуказанных параметров для ФД, чувствительных к излучению с длиной волны более 4 мкм, как и анализу пространственного распределения отрицательной люминесценции (ОЛ), до сих пор уделялось недостаточно внимания.

В данной работе экспериментально установлена неравномерность токопрохождения при приложении к диоду с точечным контактом обратного смещения, 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 · см². Описанное свойство сгущения линий тока вблизи контакта (и соответственно пространственная неравномерность неравновесного излучения), наблюдавшееся ранее в прямо-смещенных инфракрасных (ИК) светодиодах для „положительной“ люминесценции и известное в англоязычной литературе как „current crowding“ (см., например, [3]), выявлено при анализе двумерного распределения интенсивности ОЛ в ближнем поле в узкозонных ФД на основе InAsSb(P) ($\lambda_{0,1} = 5.2$ мкм).

2. Образцы и методика эксперимента

Образцы, полученные методом жидкофазной эпитаксии на подложке n -InAs, были аналогичны описанным нами ранее [3], т. е. имели плавное изменение состава и ширины запрещенной зоны E_g (градиент $\nabla E_g = -(1-2)$ мэВ/мкм) в направлении роста градиентных слоев InAsSbP толщиной ~ 60 мкм; $p-n$ -переход, расположенный на глубине ~ 5 мкм от „узкозонной“ поверхности p -InAsSb(P), был сформирован легированием цинком. В полученных образцах методами „мокрой“ фотолитографии формировались квадратные чипы размерами 450×450 мкм с наклонными стенками, полученными в результате вытравливания полос разделения. Образцы содержали мезы травления диаметром 300 мкм, расположенные в центре чипа, круглые контакты диаметром 30 мкм на поверхности p -InAsSb(P), сформированные напылением в вакууме металлической композиции Cr–AuZn–Ni–Au и несколько смещенные относительно центра мезы, и сплошной тыльный металлический контакт к n -InAs на основе композиции Cr–AuGe–Ni–Au. Перед измерениями фоточувствительности ФД монтировались на стандартном корпусе ТО-18, при этом верхний

[¶] E-mail: bmat@iropt3.ioffe.rssi.ru
Fax: (812) 2471017

контакт был сформирован приваркой или пайкой индием золотой проволоки диаметром 30 мкм. Во втором случае имелась возможность изменять площадь контакта, проводя многократно повторную пайку контакта с отличающейся (как правило, нарастающей от опыта к опыту) массой припоя.

Спектр fotocувствительности и ОЛ полученных диодов имел ширину на половине высоты максимума ~ 0.7 мкм и максимум при $\lambda_p \approx 4.5$ мкм ($\lambda_{0.1} = 5.2$ мкм, 300 К).

Двумерное распределение неравновесного излучения измерялось с помощью сканирующего ИК микроскопа, описанного в [4]. Автоматизированная система сканирования по двум координатам позволяла получать панорамные изображения при использовании как матричного, так и линейчатого типов фотоприемных устройств (ФПУ). Прибор использовался с двумя разными фотоприемными устройствами: а) ФПУ матричного типа 128×128 элементов с шагом 50 мкм из InAs, спектральный диапазон 2.5–3.1 мкм; б) ФПУ линейчатого типа 1×384 элементов с шагом 25 мкм из InSb, спектральный диапазон 3–5.2 мкм.

3. Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 1 представлена вольт-амперная характеристика (ВАХ) $U(I)$ исходного образца (т.е. ВАХ образца с контактом 30 мкм) при 300 К, полученная вычитанием резистивной составляющей, определенной на исходной ВАХ при больших прямых смещениях на $p-n$ -переходе. Как видно из рис. 1, обратная ветвь искажена относительно формы, задаваемой формулой Шокли для идеального диода, поскольку имеется перегиб характеристики, т.е. немонотонное изменение дифференциального сопротивления dU/dI . Подобные искажения могут возникать

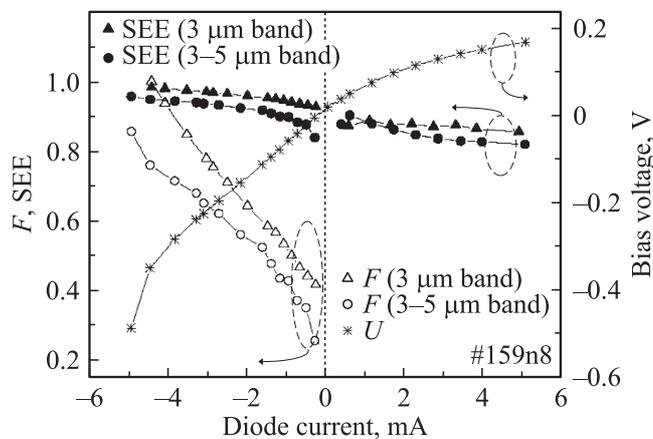


Рис. 1. ВАХ диода p -InAsSb(P)/ n -InAsSb(P) и зависимости ФИОМ для выходящего (SEE) и входящего (F) излучения от тока через исходный диод при комнатной температуре. $D_m = 300$ мкм, $D_c = 30$ мкм.

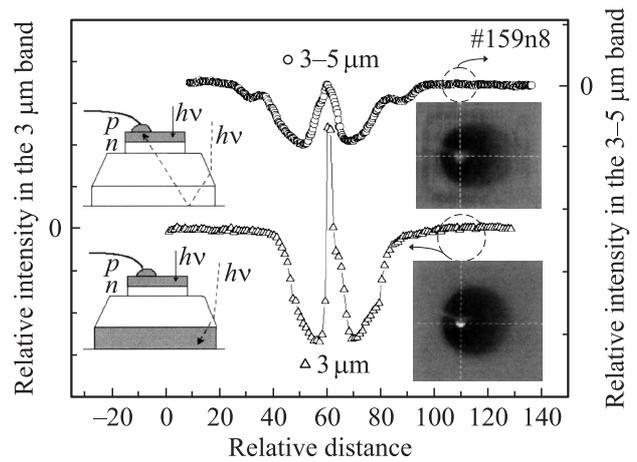


Рис. 2. ИК изображения поверхности (справа) обратносмещенного ФД ($D_m = 300$ мкм, ток -2.5 мА), полученные в спектральных диапазонах 3–5 и 3 мкм (темный фон соответствует пониженной, а светлый — повышенной излучательной способности), и распределение относительной интенсивности (кривые в центре) в „вертикальных“ сечениях, показанных штриховыми линиями на изображениях. На вставках (слева) — схемы образца и ход лучей для спектральных диапазонов 3–5 и 3 мкм. На схемах и ИК изображениях темный фон соответствует областям, поглощающим излучение.

вследствие пространственной неравномерности протекания тока, которая, согласно численным расчетам, выполненным в рамках трехмерной модели по методу конечных элементов для идеализированной структуры, может возникать при небольших обратных смещениях $p-n$ -перехода [3]. Дополнительным фактором, усложняющим вид ВАХ, является несимметричность расположения контакта. Действительно, как следует из данных, представленных на рис. 2, в нашем случае имеет место неравномерное распределение по поверхности мезы интенсивности ОЛ, т.е. концентрация большей части тока в приконтактной области. Отметим, что в распределении интенсивности ОЛ, полученном в интервале длин волн 3–5 мкм, содержится больше деталей, чем в распределении, измеренном вблизи 3 мкм. Так, например, для первого распределения характерно наличие „темной“ рамки, окаймляющей круглую мезу и соответствующей наклонным стенкам чипа, через которые внешнее равновесное излучение попадает внутрь гетероструктуры. Отражаясь от тыльного контакта и поглощаясь затем вблизи обратносмещенного $p-n$ -перехода, такие лучи привносят дополнительный вклад в ОЛ, что проявляется, в частности, в двух боковых локальных максимумах распределения интенсивности ОЛ вдоль поверхности образца (верхняя кривая на рис. 2). В силу вышеприведенных причин чувствительность ФД не обращается в нуль даже в том случае, когда контакт занимает всю площадь поверхности p -InAsSbP. Ход лучей, дающих вклад в ОЛ, с учетом отражения от сплошного контакта из Cr–AuGe–Ni–Au показан штриховой стрелкой на

верхней вставке к рис. 2. Для ИК изображения, измеренного в диапазоне 3 мкм, темная квадратная „рамка“ вокруг изображения мезы отсутствует, что связано, очевидно, с поглощением „коротковолнового“ излучения в подложке InAs и (или) в „широкозонных“ областях слоя n -InAsSbP (схема, поясняющая ход лучей для этого случая, представлена на нижней вставке к рис. 2).

С увеличением обратного напряжения распределение ОЛ по поверхности образца становится более однородным, что является следствием возрастания сопротивления истощенных областей p - n -перехода и соответственно уменьшения относительного вклада пассивных сопротивлений слоев InAsSbP n - и p -типа проводимости (соответствующие значения проводимости: $\sigma_n \approx 2 \cdot 10^4$ (Ом·м)⁻¹, $\sigma_p \approx 8 \cdot 10^3$ (Ом·м)⁻¹) в общем сопротивлении гетероструктуры [3]. Наблюдаемое изменение характера распределения ОЛ по поверхности ФД отражено на рис. 1 в виде зависимостей от тока фактора использования оптической мощности (ФИОМ) для выходящего из диода излучения (в английском варианте surface extraction efficiency, SEE), определяющего долю вышедшего из диода излучения с учетом затеняющего действия контакта для „положительной“ и отрицательной люминесценции [1], а также ФИОМ для падающего на диод излучения или фактора сбора фотогенерированных носителей F , определяемого отношением

$$F = \int_x \int_y 4L(x, y) dx dy / [\pi(D_m^2 - D_c^2)L_{\max}],$$

где x, y — координаты на (изображении) поверхности ФД, $L(x, y)$ — локальная интенсивность ОЛ, L_{\max} — интенсивность ОЛ в непосредственной близости от контакта, измеренные в двух диапазонах длин волн (3 мкм и 3–5 мкм соответственно); D_m, D_c — диаметры мезы и контакта соответственно.

Из рис. 1 следует, что имеет место некоторое различие значений ФИОМ, полученных в разных спектральных диапазонах. Однако эти различия незначительны и, как нам представляется, не влияют на выводы данной работы; для анализа этих различий требуются дополнительные измерения.

Как видно из рис. 1, с увеличением напряжения на диоде ФИОМ для выходящего излучения, как и во всех других известных случаях (см., например, [1]), уменьшается, отражая увеличение затенения. Однако затенение и сгущение линий тока под контактом не являются основным препятствием для эффективной работы диода в качестве источника излучения в диапазоне токов от —5 до 5 мА, поскольку ФИОМ несущественно отличается от единицы во всем указанном диапазоне токов. С другой стороны, ФИОМ для падающего излучения (F) много меньше единицы в области малых смещений, что приводит к низкой чувствительности ФД, работающего в режиме измерения фототока. Низкая чувствительность обусловлена тем, что удаленные от контакта области не

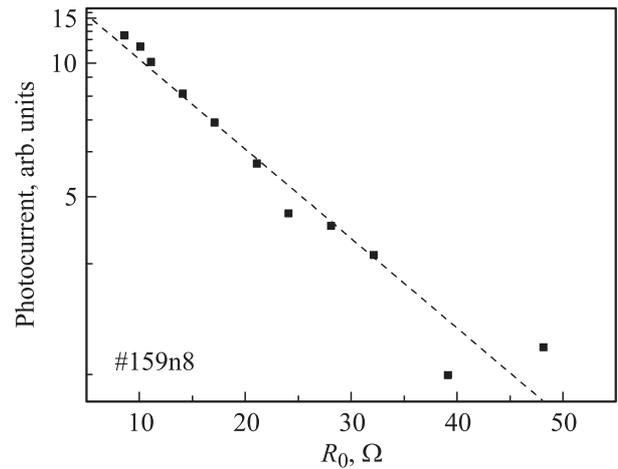


Рис. 3. Зависимость фототока через ФД от динамического сопротивления в нуле смещения, определяемого в данном эксперименте площадью контакта на освещаемой поверхности p -InAsSbP. 300 К, $D_m = 300$ мкм.

участвуют в формировании фототока из-за преобладания последовательного сопротивления слоя p -InAsSbP (см. эквивалентную схему диода, приведенную в [1]), поэтому повысить чувствительность ФД можно, например, за счет увеличения периметра контакта. В качестве подтверждения вышеприведенного вывода на рис. 3 мы приводим зависимость фоточувствительности (фототока при нулевом смещении) от величины динамического сопротивления R_0 , полученную в серии экспериментов на образцах с разной площадью контакта. При этом высокому значению R_0 соответствовало „исходное“ состояние образца, когда площадь контакта определялась площадью металлического диска ($D_c = 30$ мкм), а малым значениям R_0 соответствовали измерения, в которых контакт занимал почти всю площадь мезы. Как видно из рис. 3, с уменьшением R_0 (т.е. с увеличением площади контакта) чувствительность ФД быстро нарастает, даже несмотря на увеличение степени затенения p - n -перехода. Следует, однако, отметить, что повышение чувствительности, достигаемое за счет увеличения площади/периметра контакта и сопровождаемое уменьшением R_0 , может создать определенные трудности для практического использования таких ФД, поскольку, согласно оценкам, сделанным в [5], для низкоомных диодов (при $R_0 < 50$ Ом) современная элементная база не позволяет реализовать ФПУ (т.е. ФД + усилитель) с предельными характеристиками.

4. Заключение

Таким образом, показано, что в фотодиодах средневолнового диапазона ($\lambda > 4$ мкм) на основе InAsSb(P) имеет место существенная неоднородность распределения отрицательной люминесценции и невысокий коэффициент сбора фотогенерированных носителей из областей,

удаленных от контакта. При увеличении периметра контакта чувствительность ФД возрастает благодаря увеличению площади сбора неравновесных носителей; можно ожидать, что при приложении обратного напряжения, т. е. при увеличении динамического сопротивления и увеличении фактора использования оптической мощности падающего излучения, чувствительность ФД будет также возрастать. Указанные особенности являются общими свойствами для узкозонных $p-n$ -структур и должны учитываться как при анализе характеристик, так и при проектировании ФД.

Работа частично поддержана грантом седьмой рамочной программы ЕС (MINIGAS, # 224625).

Авторы благодарят Н.В. Зотову и Н.Д. Ильинскую за интерес и внимание, проявленные к данной работе.

Список литературы

- [1] Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ремennyй, А.Ю. Рыбальченко, Н.М. Стусь. ФТП, **45** (4), 54 (2011).
- [2] *J12 Series InAs Detectors. Каталог фирмы TELEDYNE JUDSON TECHNOLOGIES.*
- [3] V.K. Malyutenko, O.Yu. Malyutenko, A.D. Podoltsev, I.N. Kucheryavaya, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus'. Appl. Phys. Lett., **79** (25), 4228 (2001).
- [4] В.М. Базовкин, Г.Л. Курышев, И.В. Мжельский, В.Г. Половинкин. Автометрия, **47** (5), 98 (2011).
- [5] Г.А. Гаврилов, Б.А. Матвеев, Г.Ю. Сотникова. Письма ЖТФ, **37** (18), 50 (2011).

Редактор Л.В. Шаронова

Non-uniformity of negative luminescence spatial distribution in InAsSb(P) photodiodes (long-wavelength cut-off $\lambda_{0.1} = 5.2 \mu\text{m}$)

S.A. Karandashev, B.A. Matveev, I.V. Mzhelskii*, V.G. Polovinkin*, M.A. Remennyi, A.Yu. Rybal'chenko, N.M. Stus'

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

* A.V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics,
Russian Academy of Sciences, Siberian Branch,
600090 Novosibirsk, Russia