

06;12

Неохлаждаемые фотодиоды на основе InAsSb(P) с длинноволновой границей чувствительности $5.8 \mu\text{m}$

© Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев,
М.А. Ременный, Н.М. Стусь

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: bmat@iropt3.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 5 октября 2011 г.

Представлен анализ параметров фотодиодов на основе градиентных твердых растворов InAsSb(P) с длинноволновой границей чувствительности $5.8 \mu\text{m}$ с различной геометрией непрозрачного контакта на освещаемой поверхности *p*-InAsSb(P). Показано, что чувствительность (эффективность сбора фототока) напрямую зависит от периметра этого контакта; в фотодиодах с развитой структурой контакта, т. е. с увеличенными периметром и площадью, реализуется повышенная пороговая чувствительность даже при имеющем место увеличении затенения (экранирования) освещаемой поверхности непрозрачным контактом.

Фотодиоды (ФД) в диапазоне $3\text{--}5 \mu\text{m}$, работающие при комнатной температуре, востребованы в связи с задачами оптического мониторинга состояния как экологии (NO_x , CO и другие газы), так и человека (CO_2 [1], пары $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ [2]). Имеется ряд сообщений о ФД, имеющих максимум чувствительности вблизи $5 \mu\text{m}$ и работающих при комнатной температуре [3,4], однако в каталогах коммерческих фирм можно найти лишь охлаждаемые до температуры жидкого азота ФД, что, по-видимому, связано с низкими эксплуатационными параметрами ФД при 300 К. Нам не известны также публикации о ФД, работающих вблизи вышеуказанной длины волны на основе широко используемого для более коротких длин волн твердого раствора InAsSb. Такие ФД по сравнению с аналогами на основе CdHgTe обладают лучшей стабильностью металлургических границ раздела и более высоким быстродействием.

В данной работе впервые экспериментально исследованы ФД на основе InAsSb, имеющие длинноволновую границу чувствительности вблизи $5.8 \mu\text{m}$ и работающие при комнатной температуре.

Образцы, полученные методом жидкофазной эпитаксии на подложках $n\text{-InAs}$ (111), были аналогичны описанным нами ранее [5], т.е. имели плавное изменение состава и ширины запрещенной зоны ($\nabla E_g = -(1-2) \text{meV}/\mu\text{m}$) в направлении роста градиентных слоев InAsSbP толщиной $\sim 70 \mu\text{m}$; $p\text{-}n$ -переход располагался на глубине $\sim 5 \mu\text{m}$ от „узкозонной“ (т.е. с малым содержанием фосфора) поверхности $p\text{-InAsSb(P)(Zn)}$. В полученных образцах методами „мокрой“ фотолитографии формировались квадратные чипы размерами $450 \times 450 \mu\text{m}$ с наклонными стенками, полученными в результате травли полос разделения, и расположенными в центре чипа квадратными мезами $330 \times 330 \mu\text{m}$ с контактами: а) анодом на поверхности $p\text{-InAsSb(P)}$, сформированным напылением металлической композиции Cr–AuZn–Ni–Au в вакууме, б) катодом — сплошным тыльным металлическим контактом к $n\text{-InAs}$ на основе металлической композиции Cr–AuGe–Ni–Au. Перед измерениями ФД монтировались нижним контактом (к $n\text{-InAs}$) на стандартный корпус ТО-18, при этом анод на освещаемой поверхности $p\text{-InAsSb(P)}$ имел четыре модификации (типа): 1) диск диаметром $80 \mu\text{m}$, расположенный в центре мезы, 2) контакт по п. 1, к которому добавлены полоски шириной $10 \mu\text{m}$, составляющие рисунок типа „двухстворчатый оконной рамы без форточки“, в котором центральная полоска контакта соединялась с диском, 3) контакт по п. 2, к которому добавлены еще две полоски, формирующие незатененные участки в виде вытянутых прямоугольников, 4) контакт по п. 3 с добавлением еще четырех полосок, при этом две из „новых“ полосок соединялись (пересекались) с центральным диском. Геометрия контактов, выбранная нами на основе оценок длины растекания тока, полученной из распределения отрицательной люминесценции в диодах-аналогах на основе InAsSb(P) с длинноволновой границей чувствительности ($\lambda_{\text{cut-off}} = 5.2 \mu\text{m}$) [6], показана на вставке справа от рис. 1. Фоточувствительность измерялась при использовании модели черного тела, нагретого до 573K ; при вычислениях обнаружительной способности предполагалось, что в ФД доминирует тепловой джонсоновский шум (Johnson noise). Измерения спектров фотоответа проводились при 300K с использованием нагретого стержня из карбида кремния (Globar).

На рис. 1 приведены вольт-амперные характеристики ($I\text{-}V$) для четырех типов образцов, описанных выше. Спектр фоточувствитель-

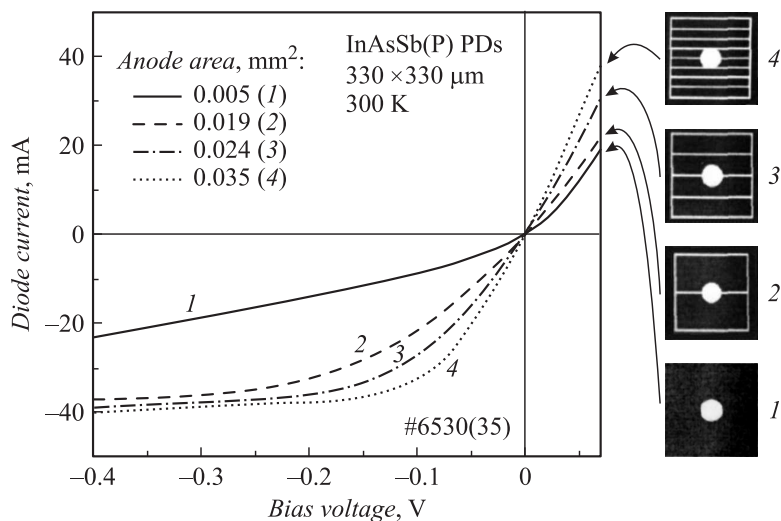


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики четырех типов диодов при комнатной температуре. Площадь анода (mm^2): 1 — 0.005, 2 — 0.019, 3 — 0.024, 4 — 0.035.

ности полученных диодов (см. рис. 2) имел максимум при $\sim 5.3 \mu\text{m}$ ($\lambda_{\text{cut-off}} = 5.8 \mu\text{m}$) и был затянут в коротковолновую область благодаря неглубокому залеганию $p-n$ -перехода.

Как видно из рис. 1, три из четырех образцов (№ 2–4), обладающих развитой структурой верхнего контакта, имели примерно одинаковые значения темного тока насыщения ($I_{\text{sat}} \sim 40 \text{ mA}$); в области средних значений напряжений увеличение тока следовало за увеличением площади анода. Диод с точечным анодом (№ 1) характеризовался в ~ 2 раза меньшим по сравнению с вышеперечисленными ФД током и отсутствием хорошо выраженного насыщения в обратной ветви характеристики $I-V$. Некоторые из указанных особенностей сохранялись и для прямого смещения; так, минимальное значение тока обнаруживалось в образце с минимальной площадью анода. Очевидно, что уменьшение тока было связано с относительно большим по сравнению с $p-n$ -переходом значением сопротивления растекания слоя $p\text{-InAsSb(P)}$, граничащего с анодом (эквивалентную схему подобного диода с точечным контактом, а также анализ связанных с ней искажений прямой ветви характеристики $I-V$ и значений динамического сопротивления

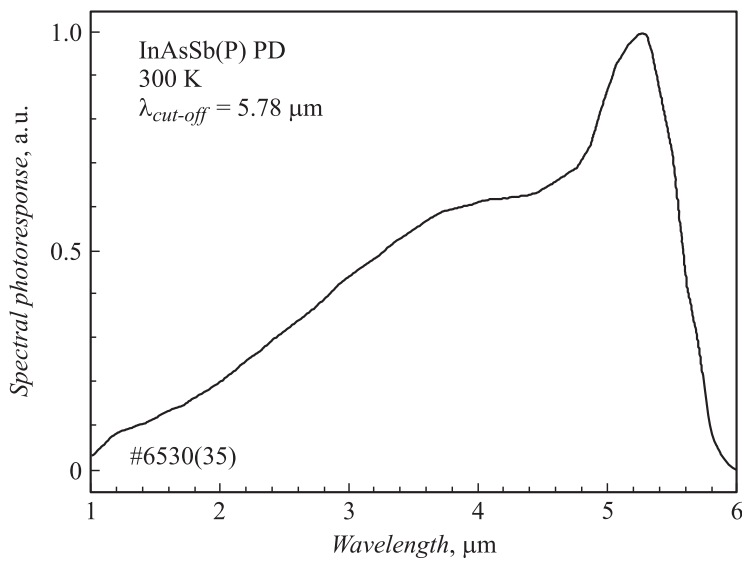


Рис. 2. Спектр фоточувствительности ФД при комнатной температуре.

в нуле смещения (R_0) можно найти, например, в [7]). Повышенное значение последовательного сопротивления для локальных областей, удаленных от контакта, и обусловленное этим стягивание линий тока под контактом (или уменьшение эффективной площади протекания тока) и есть причины наблюдаемых различий свойств образцов с различной геометрией анода. Ранее подобное было описано для градиентных $p-n$ -структур InAsSbP (длина волны в максимуме $\lambda_p = 4.5 \mu\text{m}$), имевших хорошо выраженную зависимость фотосигнала от периметра контакта и зависимость фактора сбора фотогенерированных носителей от напряжений смещения [6]. В нашем случае увеличением периметра контакта удалось повысить фотосигнал втрое даже при имевшем место 6-кратном (с 5 до 32%) возрастании степени затенения (экранирования) активной области непрозрачным для излучения анодом. На рис. 3 приведены зависимости чувствительности (S_1), обнаружительной способности ($D_{\lambda_{peak}}$), R_0 от периметра анода, подтверждающие сказанное. По-видимому, даже самый развитый в нашем случае анод (№ 4) не позволяет собрать все фотогенерированные носители из-за малой длины растекания тока в слое p -InAsSb(P); это объясняется малым значением

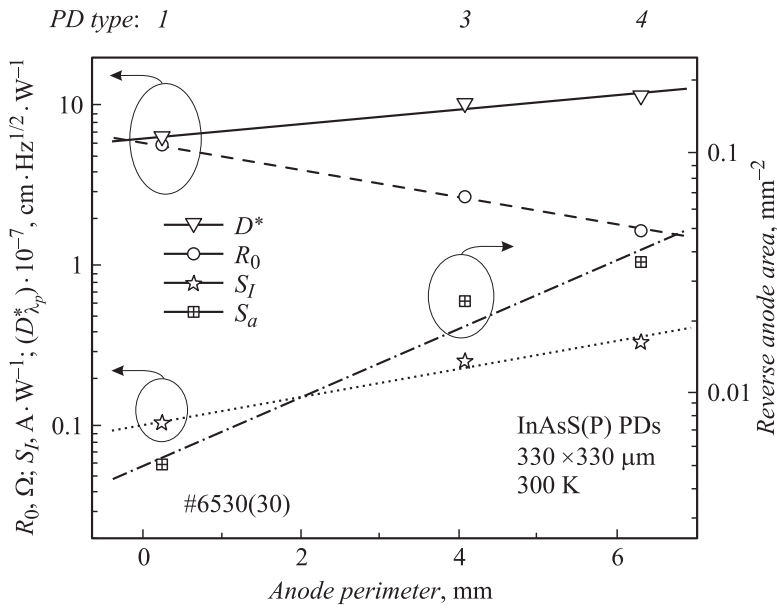


Рис. 3. Зависимость сопротивления в нуле смещения (R_0), токовой чувствительности (S_1) и обнаружительной способности в максимуме спектральной характеристики ФД ($D_{\lambda_p}^*$) при комнатной температуре от периметра анода. Для справки приведены также обратная величина площади (правая шкала) и типы диодов (вдоль верхней шкалы) в соответствии с нумерацией, использованной на рис. 1.

R_0 (большим значением обратного тока) и проявлением общей тенденции уменьшения длины растекания тока в средневолновых светодиодах при уменьшении ширины запрещенной зоны активной области [8]. На зависимости, представленной на рис. 3, не просматривается тенденция в приближении к максимуму значений S_1 и $D_{\lambda_{peak}}$, поэтому дальнейшие исследования будут состоять в определении длины растекания тока и условий дальнейшего увеличения значений S_1 и $D_{\lambda_{peak}}$ в ФД на основе InAsSb(P), т.е. в поиске „компромисса“ между высоким значением („собирающего“) периметра и низким значением (затеняющей) площади контакта на освещаемой поверхности p-InAsSb(P).

Таким образом, показано, что в фотодиодах средневолнового диапазона на основе InAsSb(P) ($\lambda_{cut-off} = 5.8 \mu m$) имеет место невысокий

коэффициент сбора фотогенерированных носителей из областей, удаленных от анода, расположенного на освещаемой поверхности p -типа проводимости. При увеличении периметра контакта и уменьшении расстояния между составляющими его элементами, чувствительность и обнаружительная способность таких ФД в три и более раз возрастают благодаря увеличению площади сбора неравновесных носителей; полученные закономерности являются общими для всех диодов с узкозонными активными областями и должны учитываться как при исследовании, так и при проектировании ФД. Созданы фотодиоды на основе InAsSb(P) с развитым анодом, эффективно работающие в диапазоне длин волн 1.4–5.8 μm , которые будут полезны при решении ряда практических задач, например при анализе содержания в воздухе окислов азота.

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

Список литературы

- [1] Каталог фирмы „МЕТА“, [http:// meta-ru.ru/about.html](http://meta-ru.ru/about.html)
- [2] Каталог фирмы „Тритон Электроникс“, <http://www.triton.ru/index.php?page=7>
- [3] Rodriguez J., Plis E., Bishop G., Sharma Y., Kim H., Dawson L., Krishna S. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 043514.
- [4] Lindle J.R., Bewley W.W., Vurgafman I., Kim C.S., Meyer J.R. // IEEE J. Quantum Electronics. 2005. V. 41. P. 227–233.
- [5] Matveev B.A., Zotova N.V., Karandashev S.A., Remennyi M.A., Stus N.M., Talalakin N. // IEE Proceedings-Optoelectronics. 2002. V. 149. Issue 1. P. 33–35.
- [6] Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Мжельский И.В., Половинкин В.Г., Ременный М.А., Рыбальченко А.Ю., Стусь Н.М. // ФТП. 2012. Т. 46. P. 259–261.
- [7] Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Рыбальченко А.Ю., Стусь Н.М. // ФТП. 2011. Т. 45. С. 554–559.
- [8] Malyutenko V.K., Zinovchuk A.V., Malyutenko O.Yu. // Semicond. Sci. Technol. 2008. V. 23. P. 085004 (3pp) doi: 10.1088/0268–1242/23/8/085004.