

# Быстродействующие фотодиоды для средней инфракрасной области спектра 1.2–2.4 мкм на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с полосой пропускания 2–5 ГГц

© И.А. Андреев<sup>†</sup>, О.Ю. Серебрянникова, Г.С. Соколовский, В.В. Дюделев, Н.Д. Ильинская, Г.Г. Коновалов, Е.В. Куницына, Ю.П. Яковлев

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

(Получена 28 декабря 2012 г. Принята к печати 10 января 2013 г.)

Впервые созданы быстродействующие  $p-i-n$ -фотодиоды для спектрального диапазона 1.2–2.4 мкм на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с разделенными чувствительной (диаметр 50 мкм) и контактной мезами, соединенными мостиковым фронтальным контактом. Использование оригинальной конструкции контактной мезы с диэлектрическим подслоем  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 0.3 мкм под металлическим контактом позволило снизить как собственную емкость фотодиода, так и значения обратных темновых токов. Фотодиоды имеют низкую собственную емкость: 3–5 пФ при нулевом смещении и 0.8–1.5 пФ при обратном смещении — 3.0 В. Быстродействие фотодиода, определяемое по времени нарастания импульса фотоотклика на уровне 0.1–0.9, составляет величину 50–100 пс. Полоса пропускания фотодиодов достигает 2–5 ГГц. Фотодиоды характеризуются низкой величиной обратных темновых токов,  $I_d = 200\text{--}1500$  нА при обратном смещении  $U = -(0.5\text{--}3.0)$  В, высокими значениями токовой монохроматической чувствительности,  $R_i = 1.10\text{--}1.15$  А/Вт, и обнаружительной способности,  $D^*(\lambda_{\text{max}}, 1000, 1) = 0.9 \cdot 10^{11}$  Вт<sup>-1</sup> · см · Гц<sup>1/2</sup>, на длинах волн 2.0–2.2 мкм.

## 1. Введение

В настоящее время существует острая потребность в фотодиодах для регистрации коротких лазерных импульсов в диапазоне длин волн 1.2–2.4 мкм. Для данного спектрального диапазона разработаны различные типы широкополосных полупроводниковых лазеров, работающих при комнатной температуре [1], а также мощные компактные твердотельные лазеры на основе кристаллов YAG и Nd-KGW, легированных ионами Ho, Tm и Er [2]. Однако проблема создания высокоэффективных быстродействующих приемников для детектирования излучения таких лазеров не решена.

Например, существуют быстродействующие фотодиоды на основе Ge и InGaAs/InP (быстродействие 10–100 пс) для спектрального диапазона 1.0–1.7 мкм [3]. Тем не менее для приемников с граничной длиной волны 2.4–2.6 мкм достигнутое быстродействие не превышает 500 пс. Этот результат препятствует разработке новейшей аппаратуры, такой, например, как новый вид оптического томографа в медицине, задерживает разработку оптических линий связи в открытом пространстве (free-space optics), не требующих прокладки дорогостоящих каналов волоконно-оптической связи [4]. Быстродействующие фотодиоды могут применяться в лазерной диодной спектроскопии газов и молекул, в лазерной дальнометрии и локации в окне прозрачности атмосферы 2–3 мкм, к тому же безопасном для глаза человека.

Есть два полупроводниковых материала III–V, которые могут быть положены в основу создания фотодиодов, работающих в спектральном диапазоне с граничной

длиной волны 2.4–2.6 мкм: твердые растворы GaInAsSb, согласованные по параметру решетки с подложкой GaSb, и твердые растворы InGaAs с высоким содержанием индия (In), выращиваемые на подложках InP. В случае использования в активной области фотодиодов твердых растворов GaInAsSb применяется технология получения — жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ) [5], а в случае твердых растворов InGaAs — газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений (МОСVD) [6]. Для преодоления значительного рассогласования по параметру решетки с подложкой проводится наращивание большого количества слоев InGaAs с переменным составом. Фотодиоды на основе гетероструктур  $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{InP}$ , работающие при комнатной температуре, выпускает ряд фирм, таких как Epitaxx, Sensors Unlimited (USA) и Hamamatsu (Japan) [3]. Одним из недостатков ФД на основе InGaAs/InP является трудность достижения в таких структурах низкой емкости приборов, что приводит в конечном итоге к ситуации, когда созданы великолепные по своим параметрам (темновые токи, обнаружительная способность) фотоприемники, но относительно плохие с точки зрения быстродействия.

Фотодиоды на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с диаметрами чувствительных площадок 0.1–2.0 мм были созданы и исследованы в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. Выпуск таких фотодиодов налажен в ООО „АИБИ“ (IBSG Co Ltd) при ФТИ [7]. Возможность получения низкой, на уровне собственной, концентрации носителей (электронов  $n$ , дырок  $p$ ) в активном слое фотодиода GaInAsSb ( $n, p \sim 10^{14}\text{--}10^{15}$  см<sup>-3</sup>) позволило добиться низкой емкости фотодиодов с диаметром чувствительной площадки 100 мкм в спектраль-

<sup>†</sup> E-mail: igor@iropt9.ioffe.ru

ном диапазоне 1.1–2.5 мкм и получить быстродействие 150–300 пс (полоса пропускания 1–2 ГГц) [8].

Быстродействие фотодиода определяется тремя временами: временем пролета носителями области пространственного заряда (ОПЗ) ( $t_{dr}$ ), временем диффузии созданных излучением электронно-дырочных пар до ОПЗ  $p$ - $n$ -перехода ( $t_{diff}$ ) и временем зарядки–разрядки собственной емкости  $p$ - $n$ -перехода ( $t_{RC}$ ), т.е. величинами его емкости  $C$  и нагрузочного сопротивления  $R$ . Время пролета носителями ОПЗ при ее ширине  $W = 2$ –3 мкм и дрейфовой скорости  $V_{dr} = 3 \cdot 10^7$  см/с составляет  $t_{dr} < 10$  пс. Временем диффузии носителей  $t_{diff}$  можно пренебречь, поскольку в нашей конструкции гетерофотодиода генерация электронно-дырочных пар происходит непосредственно в слое ОПЗ и процесс диффузии отсутствует. Как следует из вышесказанного, быстродействие фотодиода определяется временем  $RC$ , т.е. произведением величины нагрузочного сопротивления и емкости  $p$ - $n$ -перехода. Снижение емкости обеспечивается за счет уменьшения концентрации носителей в активной области фотодиода и уменьшением площади  $p$ - $n$ -перехода. Создание высококачественных бездефектных эпитаксиальных слоев с низкой остаточной концентрацией носителей является сложной технологической задачей, так как необходимо создать материал с низкой концентрацией носителей, близкой к собственной  $n_i \approx (2-3) \cdot 10^{14}$  см $^{-3}$ . Высокая концентрация природных акцепторов в твердых растворах  $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$  затрудняет решение данной задачи. При легировании твердых растворов  $Ga_{0.78}In_{0.22}As_{0.18}Sb_{0.82}$  теллуридом удалось воспроизводимо получать слабо легированный материал  $n$ - или  $p$ -типа проводимости, с концентрацией носителей вплоть до  $n, p = (1-2) \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$  [9]. При уменьшении диаметра мезы активной площади фотодиода в 2 раза емкость уменьшается в 4 раза. Соответственно при минимальной концентрации носителей  $(1-2) \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$  с уменьшением диаметра мезы до значения 50 мкм емкость  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов будет достигать единиц пикофард и менее, что обеспечит достижение быстродействия фотодиодов в десятки пс.

В конструкции фотодиодов на основе твердых растворов  $GaInAsSb/GaAlAsSb$  появляется проблема создания верхнего омического контакта, который бы обеспечивал достаточную площадь для разварки контактной проволоки и при этом бы не затенял собою чувствительную часть площадки. Нами была использована идея разделения фотодиодной площадки на две функциональные части, „чувствительную“ и „контактную“, соединенные мостиковым контактом. Идея мостиковых контактов использовалась для создания таких типов полупроводниковых приборов, как транзисторы [10] и диоды Шоттки [11]. Для инфракрасных (ИК) фотодиодов на основе твердых растворов  $GaInAsSb/GaAlAsSb$  проблема увеличения эффективности за счет одновременного увеличения его обнаружительной способности и быстродействия не решена. Данная работа направлена на создание и исследование быстродействующих

фотодиодов с мостиковым контактом для спектрального диапазона 1.2–2.4 мкм.

## 2. Конструкция быстродействующего фотодиода

Задача создания высокоэффективных быстродействующих ИК приемников, работающих при комнатной температуре, заставляет искать новые альтернативные подходы к принципам работы и конструкции приборов. Увеличение эффективности фотодиодов возможно за счет повышения обнаружительной способности и повышения быстродействия. Обнаружительная способность  $D^*$  фотодиода определяется по следующей формуле [12]:

$$D^* = R_i A^{1/2} / i_n, \quad (1)$$

где  $R_i$  — токовая монохроматическая чувствительность в А/Вт,  $A$  — площадь чувствительной площадки в см $^2$ ,  $i_n$  — величина шумового тока в А.

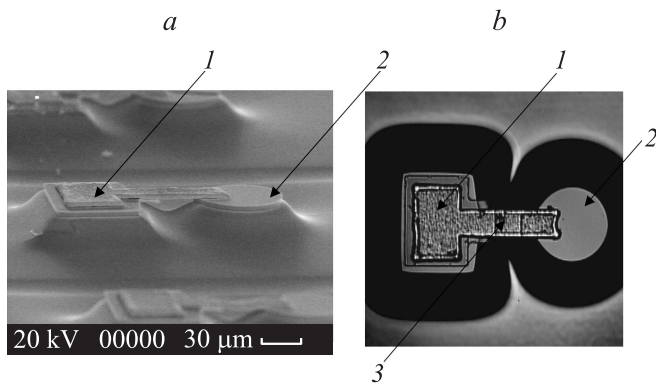
Из формулы (1) следует, что для повышения обнаружительной способности фотодиода необходимо снижать величину шумового тока, которая связана следующим образом с величиной обратного темнового тока:

$$i_n = (2qI_d \Delta f)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $I_d$  — величина обратного темнового тока в А,  $q$  — заряд электрона в Кл,  $\Delta$  — полоса пропускания фотоприемника в Гц.

С другой стороны, для повышения  $D^*$  фотодиода необходимо увеличивать площадь чувствительной площадки  $A$ , что ведет к увеличению собственной емкости и, следовательно, к снижению быстродействия фотодиода. Эффективность фотодиодов для спектрального диапазона 1.2–2.4 мкм на основе гетероструктур  $GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb$  снижается из-за затенения чувствительной площадки расположенным на ее поверхности металлическим фронтальным контактом. Площадь чувствительной площадки  $A$  уменьшается на величину площади контакта на ее поверхности, при этом уменьшается  $D^*$  фотодиода. В формуле (1) под  $A$  понимается эффективная площадь чувствительной площадки, а именно площадь чувствительной к ИК излучению поверхности, не занятой контактами.

Главной конструктивной особенностью фотоприемника с мостиковым контактом является отделение чувствительной мезы от контактной мезы, что позволяет уменьшить емкость фотоприемника и, как следствие, увеличить его быстродействие. Конструкция фотоприемника включает чувствительную мезу с близко расположенной контактной мезой и перекинутым от одной мезы к другой металлическим контактом, нанесенным на диэлектрик. В работе была решена задача вытравливания материала под металлической балкой таким образом, чтобы разорвать электрическую связь между слоями структуры. При решении данной задачи было учтено



**Рис. 1.** Изображение фотодиода „мостиковой“ конструкции, полученное с помощью растрового электронного микроскопа (а), и микрофотография фотодиода (б). 1 — меза с контактной площадкой, 2 — светочувствительная меза, 3 — фронтальный мостиковый контакт.

влияние ориентации мостикового контакта относительно кристаллографических плоскостей и малое расстояние между фоточувствительной и контактной мезами, что значительно затрудняет травление.

Полупроводниковый фотодиод был создан на основе выращенной на подложке GaSb гетероструктуры, состоящей из активной области  $n\text{-Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$  толщиной 2.5–3 мкм и широкозонного „окна“  $p\text{-Ga}_{0.66}\text{Al}_{0.34}\text{As}_{0.975}\text{Sb}_{0.025}$  толщиной 0.5–1.5 мкм. На поверхности гетероструктуры были сформированы две мезы, соединенные мостиковым фронтальным контактом (рис. 1). Чувствительная площадка была выполнена в форме круга диаметром 50 мкм, контактная площадка — в форме прямоугольника с размерами 50×70 мкм. Тыльный омический контакт CrAuNiAu был нанесен на подложку  $n\text{-GaSb}$  и выполнен сплошным. Фронтальный омический контакт был сформирован к слою  $p\text{-GaAlAsSb}$  и представлял собой мостик шириной 20 мкм и длиной 85 мкм. Мостик формировался напылением Cr–Au толщиной 2200 Å с последующим нанесением гальванического слоя Au толщиной 3–6 мкм. Для обеспечения омического контакта одной стороной мостик заходил на чувствительную площадку не более чем на 10 мкм, а другой стороной — на контактную площадку, покрытую диэлектриком. Со стороны контактной площадки мостик заканчивался прямоугольной частью размером 60×40 мкм. Мезы формировались мокрым травлением после нанесения контактов. Мостиковый контакт изолирован от контактной площадки и, следовательно, полупроводникового материала гетероструктуры диэлектриком  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 0.3 мкм. На данную конструкцию фотодиода получен патент на изобретение [13]. Далее будут представлены результаты сравнения характеристик фотодиодов с диэлектриком и без диэлектрика в подконтактной области.

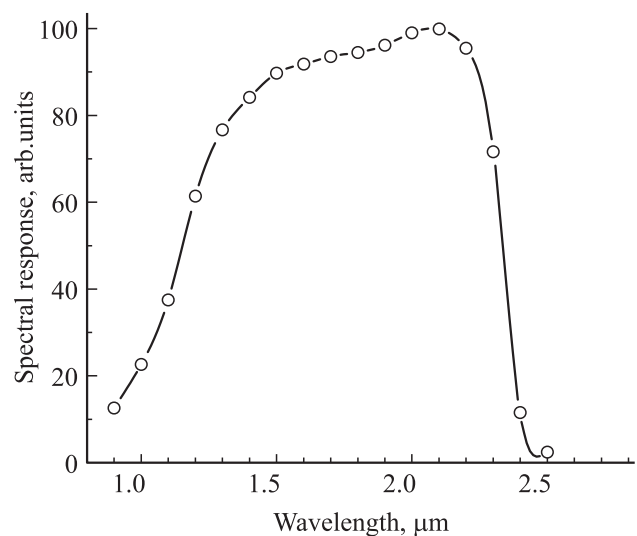
Нами проведено исследование спектральных, вольт-амперных и вольт-фарядных характеристик (ВАХ

и ВФХ) фотодиодов GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb, а также их быстродействия.

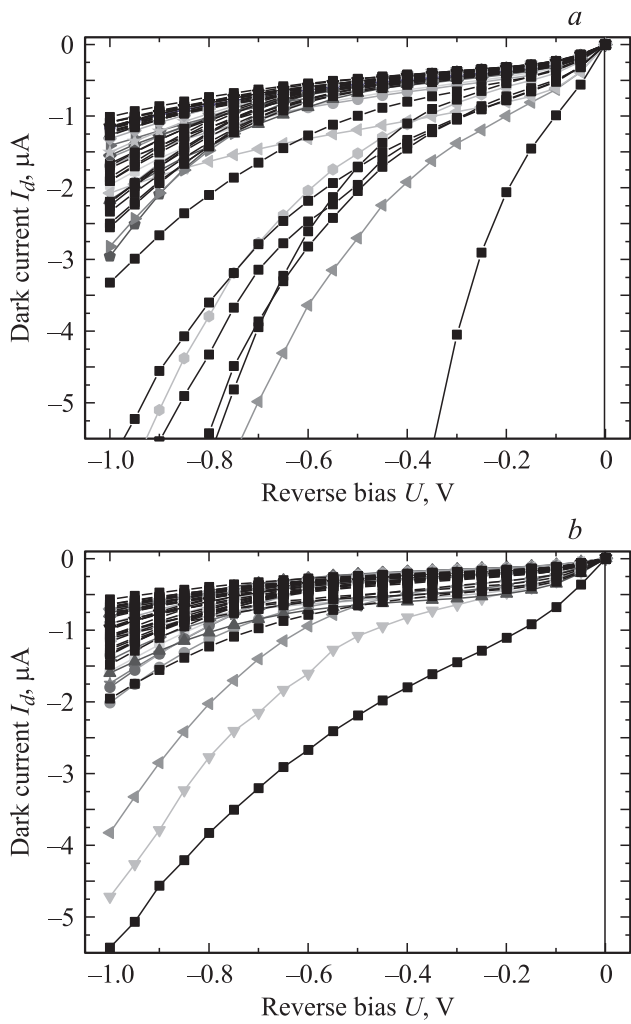
### 3. Исследование спектральных и вольт-амперных характеристик фотодиодов

Спектральное распределение чувствительности исследованных фотодиодов при комнатной температуре ( $T = 300$  К) представлено на рис. 2. Длинноволновая граница составляет 2.4 мкм при  $T = 300$  К. Спад чувствительности на уровне 50% от максимальной на длине волны 2.32 мкм соответствует ширине запрещенной зоны узкозонного твердого раствора  $\text{Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$   $E_g = 0.53$  эВ, что согласуется с данными, полученными из исследований фотолюминесценции и спектров пропускания. Спад чувствительности в коротковолновой области спектра обусловлен сильным поглощением излучения в широкозонном „окне“  $\text{Ga}_{0.66}\text{Al}_{0.34}\text{As}_{0.025}\text{Sb}_{0.975}$ , наличие которого существенно снижает потери на поверхностную рекомбинацию. Коротковолновая граница спектральной чувствительности фотодиода составляет 0.9 мкм (рис. 2). Точковая монохроматическая чувствительность на длине волны  $\lambda = 2.1$  мкм составила  $R_i = 0.9\text{--}1.1$  А/Вт, что соответствует квантовой эффективности 0.6–0.7 без антиотражающего покрытия. Обнаружительная способность фотодиодов, оцененная по измеренной величине уровня шумов и ампер-ваттной чувствительности, в максимуме спектра достигает величины  $D^*(\lambda_{\text{max}}, 1000, 1) = 0.9 \cdot 10^{11}$  Вт<sup>-1</sup>·см·Гц<sup>1/2</sup>. Нелинейность выходного сигнала не превышает 0.1%.

Были проведены измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) двух конфигураций приборов, созданных на основе одной гетероструктуры — фотоприемники



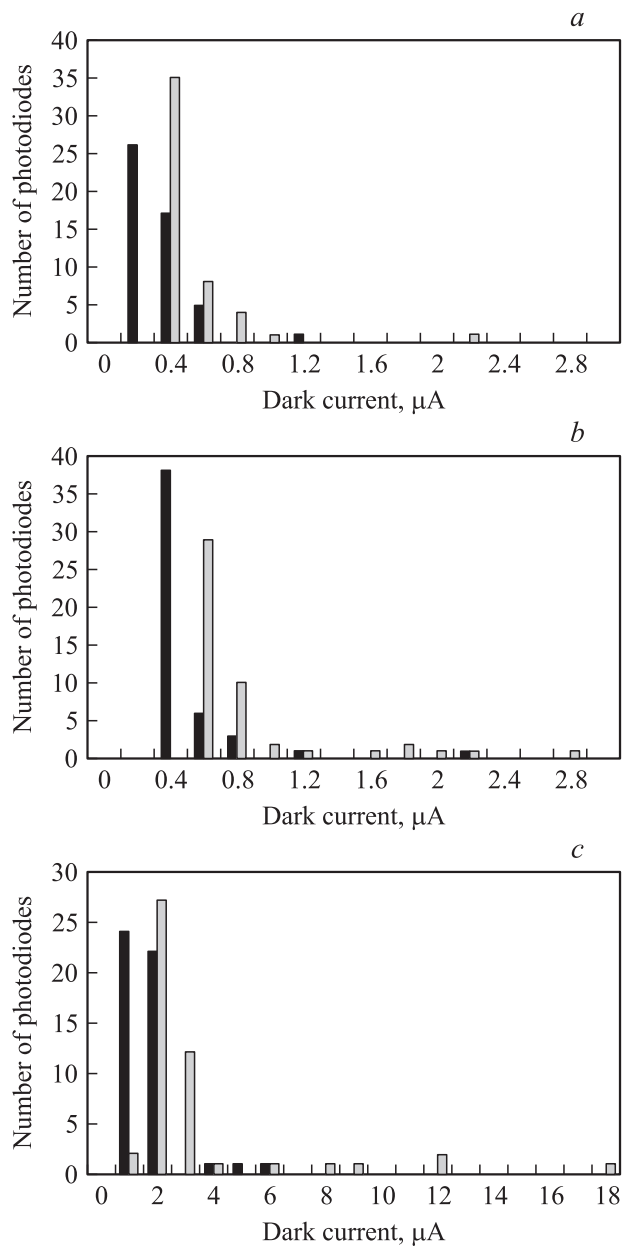
**Рис. 2.** Спектральное распределение чувствительности  $p\text{-}i\text{-}n$ -гетерофотодиода GaSb/GaSbInAs/GaAlAsSb при комнатной температуре.



**Рис. 3.** Вольт-амперные характеристики фотоприемников „мостиковой“ конструкции с диаметром чувствительной площадки 50 мкм без диэлектрика (а) и с диэлектриком в подконтактной области (b).

„мостиковой“ конструкции с диэлектриком и без диэлектрика в подконтактной области. Для этого были измерены по 50 образцов каждого типа на пластине с помощью установки на основе контактных щупов. Результаты представлены на рис. 3, а, b. Как видно из рис. 3, где приведены обратные ветви ВАХ, приборы с диэлектрическим подслоем в среднем имеют меньшие темновые токи, чем приборы без диэлектрического подслоя. При этом видно, что только 3 прибора из 50 показывают неудовлетворительные параметры темновых токов, что говорит о большей надежности данной конструкции прибора. Для фотоприемников без диэлектрика под контактной площадкой разброс величины темновых токов при различных смещениях намного больше. Это также хорошо иллюстрирует рис. 4, где приведены гистограммы распределения количества приборов с различными значениями темновых токов при обратных смещениях  $-0.2$ ,  $-0.5$  и  $-1.0$  В. Из гистограмм можно видеть, что для

каждой величины обратного смещения максимальное количество фотодиодов с диэлектриком в подконтактной области лежит в интервале темновых токов, меньших, чем для фотодиодов без диэлектрика. Так, при напряжении  $-0.2$  В 26 фотодиодов с диэлектриком имеют токи менее  $0.4$  мкА, в то время как без диэлектрика ни одного. В следующий диапазон,  $0.4-0.6$  мкА, попадает еще 17 фотодиодов с диэлектриком и 35 фотодиодов без него. Похожая ситуация и для напряжений  $-0.5$  и  $-1$  В. Максимальное количество фотодиодов в распределении по токам для приборов с диэлектриком сдвинуто на одну ступень по сравнению с максимальным количеством приборов без диэлектрика. Диэлектрик, следовательно,



**Рис. 4.** Гистограммы распределения количества фотодиодов с темновыми токами заданного диапазона при значениях обратного смещения  $U = -0.2$  (а),  $-0.5$  (b),  $-1.0$  В (с).

предотвращает прохождение тока через „контактную“ мезу, понижая уровень темнового тока в фотодиодной структуре. Величина обратного темнового тока для лучших образцов фотодиода составила 200–500 нА при обратном напряжении  $U = -(0.5–1.0)$  В.

#### 4. Исследование вольт-фарадных характеристик и быстродействия фотодиодов

Как отмечалось ранее, в предлагаемой конструкции фотодиода фактором, определяющим его быстродействие, является время зарядки и разрядки его собственной емкости. Таким образом, увеличение быстродействия фотодиода может быть достигнуто за счет снижения собственной емкости прибора. В свою очередь, собственная емкость полупроводникового фотодиода определяется концентрацией носителей в активной области и площадью чувствительной площадки. Концентрация носителей в активном эпитаксиальном слое  $\text{Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$  может быть снижена до уровня  $10^{14}–10^{15} \text{ см}^{-3}$  при высоком структурном совершенстве слоя и низкой плотности дислокаций несоответствия ( $< 10^4 \text{ см}^{-2}$ ) на гетерограницах. В предлагаемом фотодиоде, в отличие от стандартной конструкции, сформированы две мезы, что дает возможность независимо уменьшать площадь чувствительной площадки и увеличивать площадь контактной площадки. Чувствительная и контактная площадки мез соединены фронтальным омическим контактом, выполненным в виде металлического мостика, изолированного от подконтактной площадки слоем диэлектрика  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . При такой конструкции фотодиода травление слоев гетероструктуры под мостиковым контактом осуществляется одновременно с травлением мез. Кроме того, травление должно обеспечивать гладкий (без ступенек) профиль травления. В противном случае каждая из ступенек и неоднородностей будет приводить к возрастанию токов утечки фотодиода, вносящих, как обнаружено авторами в работе [14], основной вклад в величину обратного темнового тока фотодиодов с малыми диаметрами чувствительной площадки ( $< 300 \text{ мкм}$ ). Как результат, будет возрастать уровень шумов и будет падать обнаружительная способность фотодиода.

Была изготовлена полупроводниковая пластина с гетероструктурой  $\text{GaSb}/\text{GaInAsSb}/\text{GaAlAsSb}$ . Перед началом постростовой обработки пластина была разделена на две части. На одной из частей были созданы  $p-i-n$ -фотоприемники с диэлектрической изоляцией между контактной площадкой и опорной „контактной“ мезой для уменьшения емкости всего фотоприемника. На второй части пластины у фотоприемников отсутствует диэлектрическая изоляция между контактной площадкой и „контактной“ мезой. Эквивалентная емкостная схема быстродействующего фотодиода с двумя мезами и с мостиковым контактом и диэлектрическим слоем

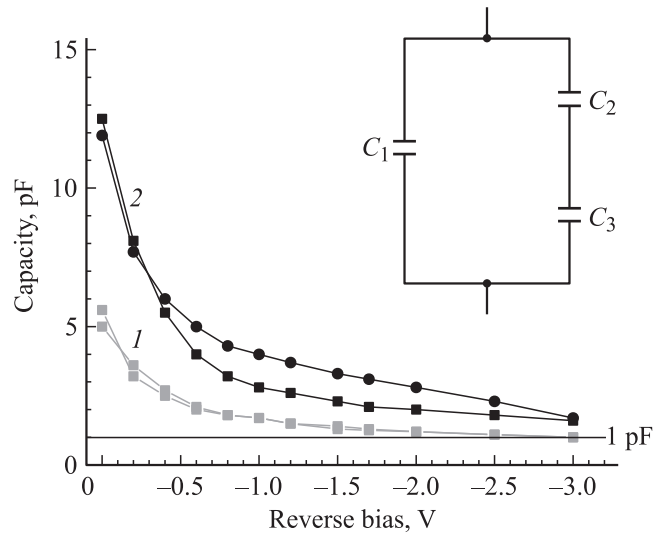
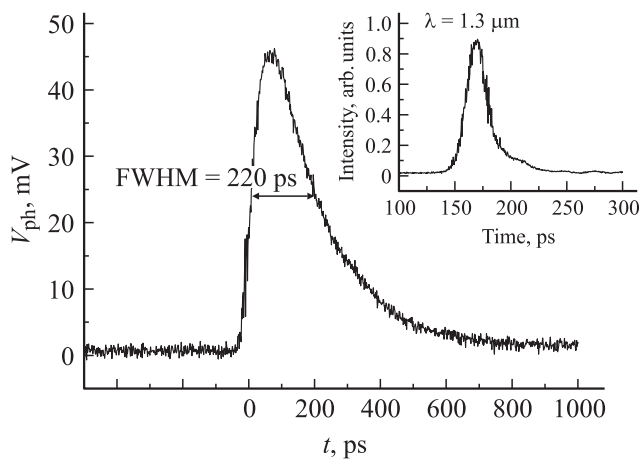


Рис. 5. Зависимости емкости от обратного напряжения при комнатной температуре фотоприемников с диэлектрическим подслоем (1) и без диэлектрического подслоя под контактом (2). На вставке — эквивалентная емкостная схема фотодиода:  $C_1$  — емкость чувствительной мезы  $p-n$ -структуры,  $C_2$  — емкость контактной мезы  $p-n$ -структуры,  $C_3$  — емкость, образуемая омическим контактом и диэлектрическим подслоем.

представлена на вставке к рис. 5. Емкости чувствительной мезы ( $C_1$ ) и контактной мезы ( $C_2$ ) близки по значениям. Емкость, образуемая диэлектрическими слоями и омическим контактом, —  $C_3$ . В таком случае собственная емкость фотодиода с двумя мезами составляет  $C = C_1 + C_2 C_3 / (C_2 + C_3)$ , что меньше, чем  $C_1 + C_2$ .

На рис. 5 представлены результаты измерения вольт-фарадных характеристик двух типов фотодиодов. Как видно, при использовании варианта „мостиковой“ технологии с созданием диэлектрического подслоя между опорной мезой и контактной площадкой емкость  $p-i-n$ -фотоприемника при нулевом смещении в 2 раза ниже, чем на аналогичном приборе без диэлектрической площадки: 12 и 6 пФ (пластина М508). При обратном смещении  $-3$  В емкости фотодиодов снижались до 1.5 и 1 пФ соответственно. Проверялись несколько пластин с фотодиодами, и на всех наблюдался эффект снижения емкости фотодиода при создании диэлектрической изоляции между контактной площадкой и „контактной“ мезой. Для исследуемых фотодиодов концентрация в активном слое составила  $5 \cdot 10^{15}–2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  для различных образцов.

Теперь о результатах измерения быстродействия фотодиодов и полосы их пропускания. Фотодиоды были собраны в разрыве микрополосковой линии с волновым сопротивлением 50 Ом для согласования с измерительным трактом. Быстродействие  $p-i-n$ -фотодиодов исследовалось при накачке его импульсами излучения от полупроводникового лазера с длиной волны  $\lambda = 1.3 \text{ мкм}$ . Ширина на половине высоты максимума (FWHM) импульса накачки составляла 25 пс [15]. Излучение полу-



**Рис. 6.** Осциллограмма импульса фотосигнала  $V_{ph}$   $p-i-n$ -гетерофотодиода GaSb/GaSbInAs/GaAlAsSb при засветке лазерным импульсом излучения с длиной волны 1.3 мкм (на вставке).

проводникового лазера вводилось в оптическое волокно, на выходе которого была размещена оптическая система, обеспечивающая фокусировку излучения на входное окно исследуемого фото диода. Фотоотклик диода регистрировался стробоскопическим осциллографом С1-91, имеющим полосу пропускания 18 ГГц. Типичная осциллограмма фотоответа приведена на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что ширина FWHM зарегистрированного импульса составляет  $\sim 220$  пс. Быстродействие фото диода, определяемое по времени нарастания импульса фотоотклика на уровне 0.1–0.9, составило величину  $t_{0.1-0.9} = 50-100$  пс. Полоса пропускания фото диодов достигает значения 2–5 ГГц. Если сравнить полученный результат с осциллограммой для фото диода с диаметром чувствительной площадки 100 мкм, то здесь прослеживаются: более интенсивный сигнал фотоотклика и меньшее время фотоотклика. При этом отметим, что концентрация носителей в активной области для данных фото диодов ( $5 \cdot 10^{15} - 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) далека от оптимальной ( $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и менее). В соответствии с оценкой времени нарастания/спада импульса фотоответа, приведенной выше, уменьшение концентрации носителей до  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  в структуре с диаметром фоточувствительной мезы 50 мкм позволит ожидать увеличения предельной частоты работы рассматриваемых фото диодов до 10 ГГц.

## 5. Заключение

Созданы и исследованы неохлаждаемые быстродействующие  $p-i-n$ -фото диоды с мостиковым фронтальным контактом для регистрации коротких импульсов излучения в спектральном диапазоне 1.2–2.4 мкм. Разработан и оптимизирован технологический цикл создания быстродействующих фото диодов, включающий выращивание на подложке GaSb (100) изопериодных гетеро-

структур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb методом жидкофазной эпитаксии, постростовую технологию, корпусирование фото диодов для исследования кинетики фотоотклика и измерения полосы пропускания.

Главной конструктивной особенностью фото приемника с мостиковым контактом является отделение чувствительной мезы от контактной. Чувствительная площадка была выполнена в форме круга диаметром 50 мкм, контактная площадка — в форме прямоугольника с размерами  $50 \times 70$  мкм. Фронтальный омический контакт был сформирован к слою  $p$ -GaAlAsSb и представлял собой мостик шириной 20 мкм и длиной 85 мкм. Мостик формировался напылением Cr–Au толщиной 2200 Å и нанесением гальванического слоя Au толщиной 3–6 мкм. Мостиковый контакт изолирован от контактной площадки диэлектриком  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 0.3 мкм. Показано, что создание диэлектрической площадки позволяет уменьшить емкость всего прибора и соответственно увеличить его быстродействие. Величина собственной емкости фото диодов составляет  $C = 3-5$  пФ при смещении  $U = 0$  В и  $C = 0.8-1.5$  пФ при обратном смещении  $U = -3$  В. Быстродействие фото диодов GaInAsSb/GaAlAsSb, определяемое по времени нарастания импульса фотоотклика на уровне 0.1–0.9, составляет величину  $t_{0.1-0.9} = 50-100$  пс. Ширина полосы пропускания достигает 2–5 ГГц. Фото диоды характеризуются низкой величиной обратных темновых токов,  $I_d = 200-1500$  нА при обратном смещении  $U = -(0.5-3.0)$  В, высокими значениями токовой монохроматической чувствительности,  $R_i = 1.10-1.15$  А/Вт, и обнаружительной способности  $D^*(\lambda_{\max}, 1000, 1) = 9.0 \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$  на длинах волн 2.0–2.2 мкм.

Работа частично поддержана грантами РФФИ № 10-02-93110-НЦНИЛа, 11-02-00234а.

## Список литературы

- [1] M.T. Kelemen, J. Gilly, R. Moritz, J. Schleife, M. Fatscher, M. Kaufmann, S. Ahlert, J. Biesenbach. Proc. SPIE, **7686**, 20 (2010).
- [2] Н.Г. Захаров, О.Л. Антипов, В.В. Шарков, А.П. Савикин. Квант. электрон., **40** (2), 98 (2010).
- [3] Hamamatsu Photonics (Japan): www.hamamatsu.com
- [4] K. Kincade. Laser Focus World, **12**, 69 (2003).
- [5] И.А. Андреев, Н.Д. Ильинская, Е.В. Куницына, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев. ФТП, **37** (8), 974 (2003).
- [6] Tiemin Zhang, Guoqing Miao, Yixin Jin, Shuzhen Yu, Hong Jiang, Zhiming Li, Hang Song. Mater. Sci. Semicond. Process, **12** (4–5), 156 (2009).
- [7] ООО АИБИ\* (JBSG Co Ltd\*): http://www.ibsg.ru
- [8] И.А. Андреев, О.Ю. Серебренникова, Г.С. Соколовский, Е.В. Куницына, В.В. Дюделев, И.М. Гаджиев, А.Г. Дерягин, Е.А. Гребенщикова, Г.Г. Коновалов, М.П. Михайлова, Н.Д. Ильинская, В.И. Кучинский, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, **36** (9), 43 (2010).
- [9] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, Е.В. Куницына, Я.А. Пархоменко, М.А. Сиповская, Ю.П. Яковлев. ФТП, **36** (8), 917 (2002).

- [10] Xian-Jie Li, Dao-Min Cai, Qing-Ming Zeng, Shi-Yong Liu, Chun-Guang Liang. *Chin. Phys. Lett.*, **20** (2), 311 (2003).
- [11] A. Notargiacomo, R. Bagni, E. Giovine, V. Foglietti, S. Carta, M. Pea, L. Di Gaspare, G. Capellini, F. Evangelisti. *Microelectronic Engin.*, **88** (8), 2714 (2011).
- [12] R.C. Jones. In: *Advances in Electronics* (N.Y., Academic, 1953) v. 5, p. 1.
- [13] И.А. Андреев, Н.Д. Ильинская, О.Ю. Серебренникова, Г.С. Соколовский, Е.В. Куницына, В.В. Дюделев, Ю.П. Яковлев. Патент на изобретение N 2469438. Приоритет от 16 июня 2011.
- [14] И.А. Андреев, Е.В. Куницына, В.М. Лангратов, Т.В. Львова, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **31** (6), 653 (1997).
- [15] А.Е. Губенко, Г.Б. Венус, И.М. Гаджиев, Н.Д. Ильинская, Е.Л. Портной. *Письма ЖТФ*, **25** (13), 15 (1999).

Редактор Л.В. Шаронова

### Ultrafast (bandwidth 2–5 GHz) GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb *p-i-n* photodiodes for the 1.2–2.4 μm mid-infrared spectral range

*I.A. Andreev, O.Yu. Serebrennikova, G.S. Sokolovskii,  
V.V. Dudelev, N.D. Ilynskaya, G.G. Konovalov,  
E.V. Kunitsyna, Yu.P. Yakovlev*

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

**Abstract** High-efficiency, broad bandwidth (2–5 GHz) GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb *p-i-n* photodiodes with air-bridge frontal contact operating in the 1.2–2.4 μm spectral range at room temperature have been developed for the first time. The distinguishing feature of photodiodes with air-bridge frontal contact is separation of photosensitive (50 μm diameter) and contact areas. Air-bridge contact was isolated from contact area by 0.3 μm thick Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> dielectric layer. The best results on value capacity and reverse dark current were obtained for photodiodes with dielectric layers under frontal contact at the contact mesa. The photodiodes demonstrate the capacitance as low as 3.0–5.0 pF at reverse bias 0 V and 0.8–1.5 pF at –3 V, respectively. The response time of the *p-i-n* photodiode is estimated as 50–100 ps, a FWHM is about 220 ps. The photodiode bandwidth of 2–5 GHz was reached. The photodiodes are characterized by low level of the reverse dark current (200–1500 nA at reverse bias  $U = -(0.5–3.0)$  V), high monochromatic current sensitivity (1.10–1.15 A/W at  $\lambda = 2.0–2.2$  μm) and high detectivity  $D^*(\lambda_{\max}, 1000, 1) = 0.9 \cdot 10^{11} \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ ).