

06

Быстродействующие $p-i-n$ -фотодиоды для спектрального диапазона $0.9-2.4 \mu\text{m}$

© 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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: igor@iropt9.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 11 января 2010 г.

Созданы и исследованы неохлаждаемые быстродействующие GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb $p-i-n$ -фотодиоды с длинноволновой границей спектральной чувствительности $\lambda = 2.4 \mu\text{m}$. Низкий уровень легирования активного слоя ($10^{14}-10^{15} \text{cm}^{-3}$) позволяет добиться низкой емкости фотодиода (менее 1 pF при диаметре чувствительной площади $100 \mu\text{m}$) и получить рекордное быстродействие (на уровне 100–150 ps). Полоса пропускания фотодиодов достигает значения 2 GHz. Созданные фотодиоды характеризуются малой величиной обратного темнового тока (500–1000 nA, при обратном смещении 1–3 V) и обнаружительной способностью, достигающей $9 \cdot 10^{10} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ в спектральном диапазоне максимальной чувствительности 1.9–2.2 μm .

Актуальность постановки работ по созданию быстродействующих неохлаждаемых приемников инфракрасного (ИК) излучения обусловлена необходимостью создания нового поколения систем лазерной дальнометрии, локации, связи, а также оптической спектроскопии загрязняющих атмосферу примесей. Существующее в настоящее время промышленное производство ИК-фотодиодов в основном опирается на использование дорогостоящих кадмий–ртуть–теллур материалов [1], что существенно ограничивает доступность таких фотодиодов для массового применения. Данная работа направлена на использование более экономичных узкозонных материалов на основе соединений A^3B^5 для создания высокоэффективных фотодиодов на спектральный диапазон с красной границей спектральной чувствительности до 2.4 μm .

Есть два полупроводниковых материала A^3B^5 , которые могут быть положены в основу создания фотодиодов, работающих в рассматрива-

емом спектральном диапазоне: твердые растворы GaInAsSb, согласованные по параметру решетки с подложкой GaSb и твердые растворы InGaAs с высоким содержанием индия, выращиваемые на подложках InP газофазной эпитаксией из металлорганических соединений, где для преодоления значительного рассогласования по параметру решетки с подложкой производится наращивание большого количества слоев InGaAs с переменным составом. Фотодиоды на основе гетероструктур In_{0.8}Ga_{0.2}As/InP, работающие при комнатной температуре, выпускают ряд фирм, например Hamamatsu Photonics (Japan) [2].

Разработка быстродействующих фотоприемников обсуждаемого диапазона на основе антимонидов получила дополнительный мощный импульс благодаря развитию инфракрасных волоконно-оптических систем (ВОЛС) на основе флюоридных стекол с аномально низкими потерями (10^{-2} – 10^{-3} dB/km) в спектральном диапазоне 2–4 μm . Наличие окна прозрачности атмосферы в этом диапазоне позволит создавать высококомбинированные высокочастотные оптические линии связи в открытом пространстве FSO (free-space optical communications) [3] без прокладки дорогостоящих каналов ВОЛС.

К преимуществам гетерофотодиодов на основе твердых растворов GaInAsSb/GaAlAsSb следует отнести возможность получать эпитаксиальные слои высокого качества с низкой плотностью дислокаций несоответствия ($< 10^4 \text{ cm}^{-2}$). Получение низкого уровня легирования активного слоя (10^{14} – 10^{15} cm^{-3}) позволяет добиться низкой емкости и получить высокое быстродействие фотодиодов. На основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb были созданы первые образцы неохлаждаемых как $p-i-n$, так и лавинных фотодиодов [4,5]. Данная работа является продолжением исследований высокочувствительных фотоприемников для спектрального диапазона 0.9–2.4 μm и посвящена созданию быстродействующих $p-i-n$ -фотодиодов на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb. В настоящей работе впервые сообщается об исследовании динамики отклика фотодиодов на основе гетероструктур GaInAsSb/GaAlAsSb при возбуждении коротким лазерным импульсом.

$P-i-n$ -фотодиоды были выращены методом жидкофазной эпитаксии на подложках GaSb, с ориентацией (100). Диаметр чувствительной площадки мезоструктур составлял 100 μm . Омические контакты AuGe/Au и AuTe/Au формировались соответственно к слою p -GaAlAsSb и подложке n -GaSb. Выбор диаметра фотодиода в 100 μm обусловлен следующими соображениями. Возможность получения низкого уровня легирования активного слоя (10^{14} – 10^{15} cm^{-3}) позволяет добиться

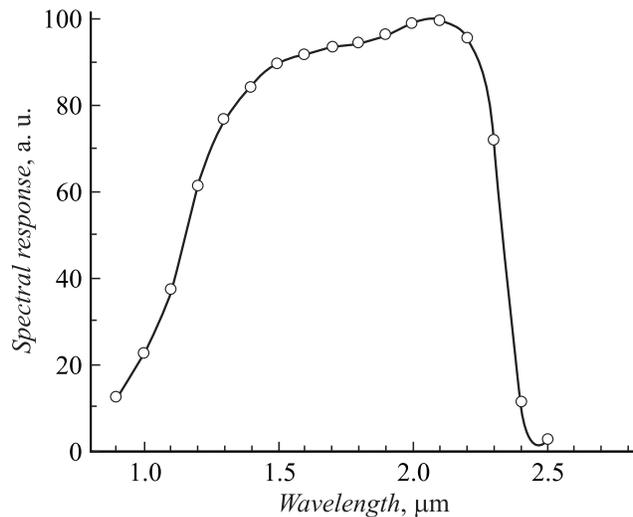


Рис. 1. Спектральное распределение fotocувствительности $p-i-n$ -фотодиода на основе GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb при комнатной температуре.

низкой емкости фотодиода. Как известно, быстродействие фотодиода определяется тремя факторами — временем диффузии созданных излучением носителей до области пространственного заряда (ОПЗ), временем пролета ОПЗ носителями и постоянной времени RC . Фотодиоды, исследованные в настоящей статье, сконструированы так, чтобы обеспечить генерацию носителей в области пространственного заряда и, таким образом, исключить диффузионную составляющую. Поэтому, учитывая, что время пролета ОПЗ составляет, по нашим оценкам, десяток пикосекунд ($t = 10^{-11} - 10^{-12}$ s), определяющее значение имеет собственная емкость фотодиода.

Нами проведено исследование спектральных, вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик фотодиодов GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb, а также их быстродействия. Спектральное распределение чувствительности исследованных фотодиодов при комнатной температуре представлено на рис. 1. Длинноволновая граница составляет $2.4 \mu\text{m}$ при $T = 300$ К. Спад чувствительности на уровне 50% от максимальной на длине волны $2.32 \mu\text{m}$ соответствует ширине запрещенной зоны узкозонного твердого

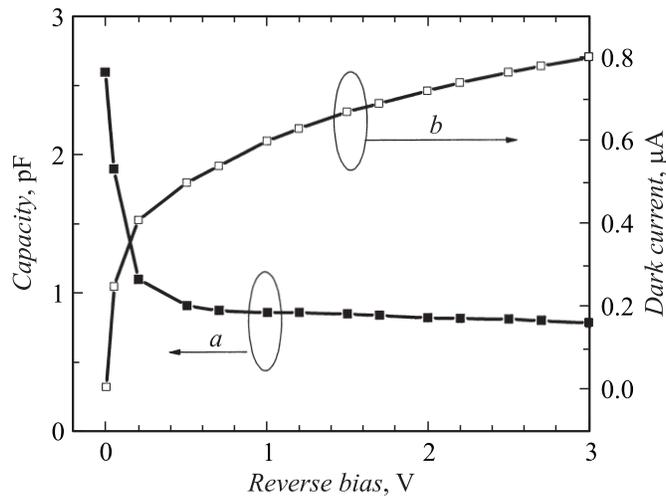


Рис. 2. Зависимость емкости фотодиода (а) и темного тока (b) от обратного напряжения GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb $p-i-n$ -фотодиода при комнатной температуре.

раствора $\text{Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ 0.53 eV, что согласуется с данными, полученными при исследовании 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 $0.9 \mu\text{m}$ (рис. 1). Точковая монохроматическая чувствительность на длине волны $\lambda = 2.1 \mu\text{m}$ составила $S_{\lambda} = 0.9-1.1 \text{ A/W}$, 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 $D^*(\lambda_{\text{max}}, 1000, 1) = 9.0 \cdot 10^{10} \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$. Нелинейность выходного сигнала не превышает 0.1%. Вольт-амперная характеристика фотодиода с диаметром чувствительной площадки $100 \mu\text{m}$ представлена на рис. 2. Величина обратного темного тока для лучших диодов составила 500–1000 nA при обратном напряжении $U = -(0.5-3.0) \text{ V}$.

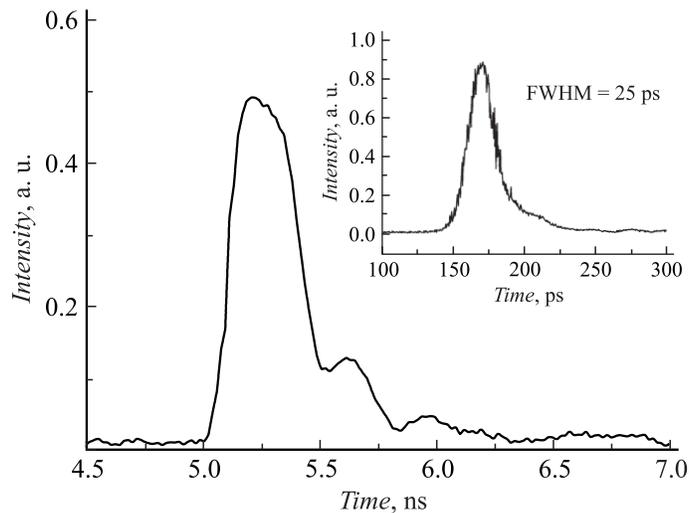


Рис. 3. Осциллограмма фотосовета $p-i-n$ GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb фотодиода при освещении импульсом излучения с длиной волны $1.3\ \mu\text{m}$. На вставке осциллограмма импульса накачки.

В данной работе первоочередной технологической задачей являлось снижение концентрации основных носителей в узкозонном слое GaInAsSb. Для этой цели в качестве легирующей примеси использовался теллур. Исследование вольт-емкостных характеристик (рис. 2) показало, что распределение примеси в гетероструктуре было резким, а концентрация носителей в активной области составила $(0.7-2) \cdot 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$. При нулевом смещении фотодиоды имели собственную емкость $2.0-3.0\ \text{pF}$. При обратном смещении $3.0\ \text{V}$ емкость фотодиода составляла величину $0.9-1.2\ \text{pF}$. Фотодиоды были собраны в разрыве микрополосковой линии с волновым сопротивлением $50\ \Omega$ для согласования с измерительным трактом.

Быстродействие $p-i-n$ -фотодиодов исследовалось при накачке его импульсами излучения от полупроводникового лазера с длиной волны $\lambda = 1.3\ \mu\text{m}$. Полуширина импульса накачки составляла $25\ \text{ps}$ [6,7]. Излучение полупроводникового лазера вводилось в оптическое волокно, на выходе которого была размещена оптическая система, обеспечивающая фокусировку излучения на входное окно исследуемого фотодиода. Фотоотклик диода регистрировался при помощи стро-

боскопического осциллографа С1-91, имеющего полосу пропускания 18 GHz. Типичная осциллограмма фотоответа приведена на рис. 3. Из рисунка видно, что полуширина зарегистрированного импульса составляет около 300 ps. Быстродействие фотодиода, определяемое по времени нарастания импульса фотоотклика на уровне 0.1–0.9, составило величину $t_{0.1-0.9} = 130-150$ ps. Полоса пропускания фотодиодов достигает значения 2 GHz. Основной причиной ограничения предельной частоты работы фотодиодов, исследуемых в данной работе, является, по-видимому, RC-компонента, что следует из очевидной симметрии фронтов нарастания и спада импульса фотоответа на рис. 3. Колебания, сопровождающие спад импульса фотоответа на уровне менее $1/e$ от максимума, связаны, в первую очередь, с рассогласованием волнового сопротивления нагрузки и фотодиода в цепи регистрации [8,9].

В соответствии с оценкой времени нарастания/спада импульса фотоответа, приведенной выше, двукратное уменьшение диаметра мезы со 100 до 50 μm и соответствующая оптимизация контактной области позволит ожидать увеличения предельной частоты работы рассматриваемых фотодиодов до 10 GHz.

Таким образом, в настоящей работе созданы и исследованы неохлаждаемые быстродействующие GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb $p-i-n$ -фотодиоды с длинноволновой границей спектральной чувствительности $\lambda = 2.4 \mu\text{m}$. Получение низкого уровня легирования активного слоя ($10^{14}-10^{15} \text{ cm}^{-3}$) позволило добиться низкой емкости фотодиода (менее 1.0 pF при диаметре чувствительной площадки 100 μm) и получить рекордное быстродействие (на уровне 130–150 ps). Полоса пропускания фотодиодов достигает значения 2 GHz. Фотодиоды характеризуются малой величиной обратного темнового тока (500–1000 nA при смещении 1–3 V) и обнаружительной способностью до $9 \cdot 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ в максимуме спектральной чувствительности 1.9–2.2 μm .

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант N 07-02-01359a, N 09-08-91224-CT_a) и Научной программы президиума РАН.

Список литературы

- [1] Norton P. // Opto-Electron. Rev. 2002. V. 10. P. 159–174.
- [2] Веб-страница Hamamatsu Photonics (Japan)- www.hamamatsu.com.
- [3] Kincade K. // Laser Focus World. Dec. 2003. P. 69–72.

- [4] Андреев И.А., Ильинская Н.Д., Куницына Е.В. и др. // ФТП. 2003. Т. 37. В. 8. С. 974–979.
- [5] Mikhailova M.P., Andreev I.A., Kunitsyna E.V. et al. // Proc. of SPIE. 2009. V. 7355. P. 735511-(1–11).
- [6] Губенко А.Е., Венус Г.Б., Гаджиев И.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 13. С. 15–22.
- [7] Волков Л.А., Гурьев А.И., Данильченко В.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 13. С. 6–9.
- [8] Sokolovskii G.S., Rafailov E.U., Deryagin A.G. et al. // Proc. of SPIE. 1996. V. 2816. P. 106–109.
- [9] Очий М., Рафаилов Э.У., Дерягин А.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 7. С. 72–77.