

07.2,07.3

Мощные высокоскоростные фотодиоды Шоттки для аналоговых волоконно-оптических линий передачи СВЧ-сигналов

© А.Л. Чиж¹, К.Б. Микитчук¹, К.С. Журавлев^{2,3,¶}, Д.В. Дмитриев^{2,3}, А.И. Торопов², Н.А. Валишева², М.С. Аксенов², А.М. Гилинский², И.Б. Чистохин²

¹ ГНПО „Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника“ НАН Беларуси, Минск, Беларусь

² Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

³ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

¶ E-mail: zhur@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 4 марта 2019 г.

В окончательной редакции 17 апреля 2019 г.

Принято к публикации 17 апреля 2019 г.

Разработаны конструкция и технология изготовления мощных СВЧ-фотодиодов Шоттки с микрополосковыми выводами на основе двойной гетероструктуры InAlAs/InGaAs. Рабочая частота фотодиодов диаметром $15\ \mu\text{m}$ составляет более $25\ \text{GHz}$, а максимальная выходная СВЧ-мощность — свыше $50\ \text{mW}$ на частоте $20\ \text{GHz}$, что позволяет применять такие фотодиоды в аналоговых волоконно-оптических линиях передачи СВЧ-сигналов, а также для генерации и обработки СВЧ-сигналов оптическими методами в системах радиолокации и измерительной СВЧ-техники.

Ключевые слова: мощные СВЧ-фотодиоды, барьер Шоттки, гетероструктуры InAlAs/InGaAs.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.14.48026.17764

Развитие волоконно-оптических технологий открыло новые возможности для создания систем радиофотоники, в которых генерация, передача и обработка СВЧ-сигналов осуществляются оптическими и оптоэлектронными методами. Такие системы и устройства обладают характеристиками, недостижимыми в случае традиционных электронных средств [1]. Аналоговые волоконно-оптические линии передачи являются базовыми элементами систем радиофотоники и выступают в качестве альтернативы коаксиальным кабелям при передаче СВЧ-сигналов на расстояние более $10\ \text{m}$ вследствие сверхнизких потерь в оптическом волокне (менее $0.0004\ \text{dB/m}$) по сравнению с потерями в коаксиальном кабеле (около $1\ \text{dB/m}$ для частоты $18\ \text{GHz}$ [2]). Для использования преимуществ волоконно-оптических линий передачи СВЧ-сигналов (низких потерь, сверхширокой полосы пропускания, устойчивости к помехам, малой массы [3]) требуется применение мощных высокоскоростных фотодиодов [4]. Как известно, при высокой мощности оптического излучения для фотодиодов характерно насыщение фототока, обусловленное влиянием пространственного заряда, а также эффектом саморазогрева при протекании фототока [5–8]. Это указывает на необходимость оптимизации отвода тепла от фотодиода и снижения влияния эффекта пространственного заряда.

В настоящей работе представлена конструкция мощных СВЧ-фотодиодов с барьером Шоттки для применения в аналоговых волоконно-оптических линиях передачи СВЧ-сигналов с широким динамическим диапазоном.

Фотодиоды изготавливаются на основе двойной гетероструктуры InAlAs/InGaAs, конструкция которой представлена в таблице. Гетероструктура выращивает-

ся на подложке полуизолирующего InP(001) методом молекулярно-лучевой эпитаксии и содержит контактный слой $n^+-\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$, легированный поглощающий слой $n^+-\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ малой толщины, нелегированные поглощающий слой $n^0-\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, варизонный слой $n^0-\text{InAlGaAs}$, барьерный слой $n^0-\text{InAlAs}$ и защитный слой $n^0-\text{InGaAs}$. Контактный слой $n^+-\text{InAlAs}$ используется для формирования омического контакта. Тонкий поглощающий слой $n^+-\text{InGaAs}$ и варизонный слой $n^0-\text{InAlGaAs}$ используются для устранения эф-

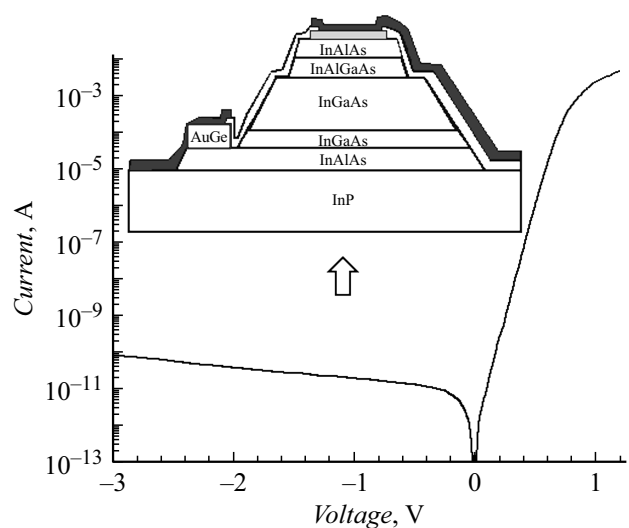


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика мощного СВЧ-фотодиода Шоттки с диаметром $15\ \mu\text{m}$. На вставке — схематическое изображение меза-структуры фотодиода (не в масштабе). Направление подачи оптического излучения указано стрелкой.

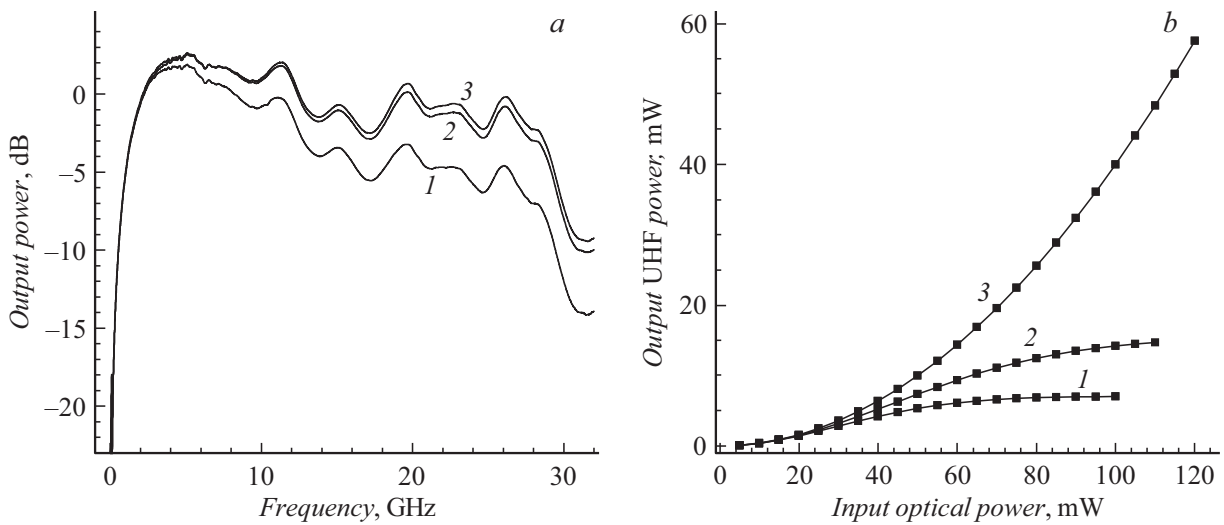


Рис. 2. *a* — амплитудно-частотная характеристика СВЧ-фотодиода Шоттки InGaAs/InAlAs с диаметром меза-структуры 15 μm , установленного в копланарную СВЧ-линию, при различных напряжениях обратного смещения; *b* — зависимость мощности СВЧ-сигнала на выходе фотодиода от входной оптической мощности при 100% глубине модуляции на частоте 20 GHz, измеренная при различных напряжениях обратного смещения. Напряжение смещения, V: 1 — 1, 2 — 2, 3 — 3.

Конструкция гетероструктуры для изготовления фотодиодов

Состав слоя	Толщина, nm	Уровень легирования, cm^{-3}
$n^0\text{-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	30	Остаточное
$n^0\text{-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	30	\gg
$n^0\text{-InAlGaAs}$	30	\gg
$n^0\text{-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	560	$< 3 \cdot 10^{14}$
$n^+\text{-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	50	$5 \cdot 10^{18}$
$n^+\text{-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	300	$5 \cdot 10^{18}$
Подложки InP	—	—

факта накопления носителей заряда на гетерограницах InAlAs/InGaAs, снижающего предельную рабочую частоту фотодиодов. Барьер Шоттки формируется напылением слоев Ti/Au на широкозонный слой $n^0\text{-InAlAs}$, что обеспечивает увеличение высоты потенциального барьера и снижение величины темнового тока прибора при обратном смещении [9]. Для защиты от окисления алюминийсодержащего слоя $n^0\text{-InAlAs}$ до формирования барьера Шоттки применяется защитный слой $n^0\text{-InGaAs}$.

Фотодиод содержит меза-структуру с барьером Шоттки и массивными металлическими контактами толщиной 5 μm , обеспечивающими высокую электро- и теплопроводность. Такая конструкция фотодиода обладает низким тепловым сопротивлением благодаря отводу тепла из области пространственного заряда через оба контакта [10]. Меза-структура фотодиода схематично показана на вставке к рис. 1. Контакты фотодиода выполняются в виде микрополосковых выводов, с помощью которых обеспечивается монтаж фотодиода методом перевернутого кристалла непосредственно на копланар-

ную СВЧ-линию передачи, являющуюся также теплопроводом. Для пассивации межслоевой изоляции и поверхности структуры используются слои диэлектриков. Подача оптического излучения в фоточувствительную область фотодиодов производится через полуизолирующую подложку InP, прозрачную в рабочем спектральном диапазоне 1.26–1.65 μm распространенных волоконно-оптических систем на основе волокон $\text{SiO}_x/\text{SiO}_y$. Для снижения величины коэффициента отражения от поверхности фотодиода на подложку наносится просветляющее покрытие на длину волны 1.55 μm .

Типичная вольт-амперная характеристика фотодиода с диаметром меза-структуры 15 μm приведена на рис. 1. Темновой ток фотодиодов при обратном напряжении 2–3 V равен 0.05–0.2 nA. Высота барьера Шоттки фотодиодов, определенная по прямой ветви вольт-амперной характеристики, составляет 0.7 V. Емкость фотодиодов при напряжении обратного смещения 2 V равна 100–110 fF, что при использовании линии передачи с волновым сопротивлением 50 Ω соответствует полосе рабочих частот 30 GHz. Чувствительность фотодиодов на длине волны излучения 1.55 μm составляет 0.40–0.55 A/W.

На рис. 2, *a* приведена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) СВЧ-фотодиода Шоттки, установленного в копланарную СВЧ-линию с волновым сопротивлением 50 Ω , при различных напряжениях обратного смещения. Спад АЧХ на низких частотах обусловлен используемой цепью подачи смещения фотодиода, а неравномерности АЧХ связаны с неполным согласованием импеданса фотодиода и линии передачи. Полоса рабочих частот фотодиода на уровне -3 dB составляет 28 GHz. На рис. 2, *b* показана зависимость выходной мощности

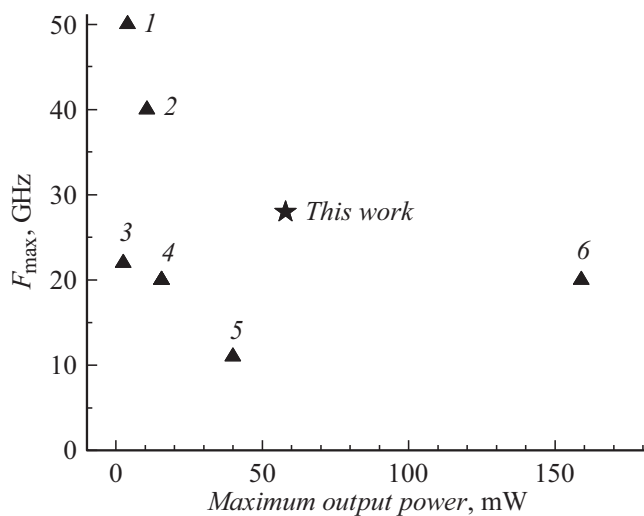


Рис. 3. Максимальная выходная мощность и полоса рабочих частот F_{\max} коммерчески доступных моделей СВЧ-фотодиодов (1–6) и фотодиодов, разработанных в настоящей работе. Позиции 1–6 соответствуют фотодиодам Finisar HPDV2120R (1), Apic Corp. ARx40 (2), Discovery Semiconductor DSC30S (3), Apic Corp. ARx20 и Optilab PH-20-HP-M (4), Apic Corp. ARx10 (5) и Finisar VPDV2120 (6).

СВЧ-фотодиода, установленного в копланарную СВЧ-линию, от входной оптической мощности при 100% глубине модуляции на частоте 20 GHz для различных напряжений обратного смещения. Как видно из рисунка, увеличение напряжения смещения приводит к увеличению максимальной выходной СВЧ-мощности. При напряжении смещения 3 V выходная СВЧ-мощность квадратично зависит от входной оптической мощности. Максимальное значение выходной СВЧ-мощности фотодиода составляет 58 mW. При напряжении смещения 3 V и входной оптической мощности свыше 120 mW наблюдается необратимый пробой фотодиодов.

На рис. 3 приведено сравнение параметров максимальной выходной мощности и полосы рабочих частот изготовленных фотодиодов с характеристиками ряда коммерчески доступных моделей СВЧ-фотодиодов. Величина максимальной выходной мощности коммерческих образцов указывается в соответствии с данными производителей либо (при отсутствии результатов прямых измерений) рассчитана из приводимых значений максимального выходного постоянного тока для сопротивления нагрузки 50 Ω .

Таким образом, достигнутый уровень полосы рабочих частот и выходной мощности разработанных СВЧ-фотодиодов на основе гетероструктуры InAlAs/InGaAs позволяет использовать их в аналоговых волоконно-оптических линиях передачи СВЧ-сигналов с широким линейным динамическим диапазоном, а также для генерации и обработки СВЧ-сигналов оптическими методами в системах радиолокации, радиосвязи и измерительной СВЧ-техники.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания 0306-2019-00008 „Гетероструктуры на основе материалов A_3B_5 для СВЧ-электроники и СВЧ-фотоэлектроники“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Seeds A.J., Williams K.J. // J. Lightwave Technol. 2006. V. 24. N 12. P. 4628–4641.
- [2] Малышев С.А., Чиж А.Л., Микитчук К.Б. Волоконно-оптические лазерные и фотодиодные модули СВЧ-диапазона и системы радиопоники на их основе // Материалы 4-й Всерос. конф. „Электроника и микроэлектроника СВЧ“. СПб., Россия, 2015. С. 10–18.
- [3] Ridgway R.W., Dohrman C.L., Conway J.A. // IEEE/OSA J. Lightwave Technol. 2014. V. 32. N 20. P. 3428–3439.
- [4] Чистохин И.Б., Журавлев К.С. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 1. С. 85–94.
- [5] Liu P.L., Williams K.J., Frankel M.Y., Esman R.D. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1999. V. 47. N 7. P. 1297–1303.
- [6] Beling A., Xie X., Campbell J.C. // Optica. 2016. V. 3. N 3. P. 328–338.
- [7] Williams K.J., Esman R.D. // J. Lightwave Technol. 1999. V. 17. N 8. P. 1443–1454.
- [8] Malyshev S.A., Chizh A.L., Vasilevski Yu.G. // J. Lightwave Technol. 2008. V. 26. N 15. P. 2732–2739.
- [9] Chistokhin I.B., Aksenov M.S., Valisheva N.A., Dmitriev D.V., Kovchavtsev A.P., Gutakovskii A.K., Prosvirin I.P., Zhuravlev K.S. // Mater. Sci. Semicond. Proc. 2018. V. 74. P. 193–198.
- [10] Chizh A., Malyshev S., Mikitchuk K. High-speed high-power InAlAs/InGaAs/InP Schottky photodiode // IEEE Int. Topical Meeting on microwave photonics (MWP2015). Paphos, Cyprus, 2015. P. 1–4.