

**Чижев А.Л.<sup>1</sup>, Малышев С.А.<sup>1</sup>, Микитчук К.Б.<sup>1</sup>,  
Журавлев К.С.<sup>2</sup>, Дмитриев Д.В.<sup>2</sup>, Торопов А.И.<sup>2</sup>,  
Аксенов М.С.<sup>2</sup>, Валишева Н.А.<sup>2</sup>,  
Гилинский А.М.<sup>2</sup>, Чистохин И.Б.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Национальной академии наук Беларуси

<sup>2</sup>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова

Сибирского отделения РАН

## **Мощный СВЧ-фотодиод Шоттки на основе двойной гетероструктуры InAlAs/InGaAs**

*В статье представлен мощный СВЧ-фотодиод Шоттки с микрополосковыми выводами на основе двойной гетероструктуры InAlAs/InGaAs. Предельная частота фотодиодов Шоттки равна 28 ГГц, а максимальная выходная СВЧ-мощность составила величину 58 мВт на частоте 20 ГГц, что позволяет использовать такие фотодиоды в аналоговых волоконно-оптических линиях с широким линейным динамическим диапазоном, а также для генерации СВЧ-сигналов оптическими методами в системах радиолокации, радиосвязи и измерительной СВЧ-техники.*

**Ключевые слова:** мощный СВЧ-фотодиод, барьер Шоттки, двойная гетероструктура InAlAs/InGaAs

Аналоговые волоконно-оптические линии передачи СВЧ-сигналов перспективны для использования в радиолокационных системах, системах радиоэлектронной борьбы, распределенных системах радиосвязи и измерительной СВЧ-технике [1,2]. Основные преимущества аналоговых волоконно-оптических линий по сравнению с коаксиальными СВЧ-кабелями связаны со свойствами оптического волокна: сверхнизкие потери 0.5 дБ/км и дисперсия, сверхширокополосность, невосприимчивость к электромагнитным помехам, полная гальваническая развязка, а также механическая гибкость, малая масса и размеры.

Для аналоговых волоконно-оптических линий с широким линейным динамическим диапазоном требуются мощные высокоскоростные фотодиоды, работающие в спектральном диапазоне 1250–1650 нм, в котором оптическое волокно имеет минимальные потери [3]. Известно, что для фотодиодов характерно насыщение фототока при большой мощности падающего оптического излучения, которое обусловлено последовательным сопротивлением фотодиода, экранированием внутреннего электрического поля фотоносителями (эффект пространственного заряда), а также джоулевым нагревом фотодиода вследствие протекания фототока (эффект саморазогрева) [4–6]. В данной работе представлен мощный СВЧ фотодиод на основе гетероэпитаксиальных слоев InAlAs/InGaAs на подложке InP (001), представляющий собой фотодиод Шоттки, освещаемый со стороны подложки, в котором выводы изготовлены в виде микрополосков. Благодаря таким выводам фотодиод может быть непосредственно установлен на микрополосковую или копланарную СВЧ-линию передачи, которая дополнительно является теплоотводом.

СВЧ-фотодиод Шоттки содержит двойную мезаструктуру InAlAs/InGaAs круглого сечения с диаметром фоточувствительной области 15 мкм (Рис. 1). Гетероструктура

фотодиода выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке Riber Comtract-21t на полуизолирующей подложке InP (001) и состоит из следующих слоев: контактный  $n^+$ -In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As слой толщиной 300 нм с концентрацией электронов  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , поглощающий  $n^+$ -In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As слой толщиной 50 нм с концентрацией электронов  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , нелегированный поглощающий  $n^0$ -InGaAs слой толщиной 560 нм с концентрацией электронов менее  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , нелегированный варизонный  $n^0$ -InGaAlAs слой толщиной 50 нм, нелегированный барьерный  $n^0$ -InAlAs слой толщиной 30 нм и нелегированный защитный  $n^0$ -InGaAs слой толщиной 30 нм. Контактный, прилежащий к подложке,  $n^+$ -InAlAs слой используется для формирования омического контакта. Тонкий поглощающий  $n^+$ -InGaAs слой и варизонный  $n^0$ -InGaAlAs слой используются для устранения эффекта захвата носителей заряда на гетерограницах InAlAs/InGaAs, который может значительно увеличить время переноса фотоносителей и, следовательно, ограничить предельную рабочую частоту фотодиода. Широкозонный  $n^0$ -InAlAs слой служит для увеличения высоты барьера Шоттки, а верхний  $n^0$ -InGaAs слой защищает барьерный слой от окисления во время технологических процессов, предшествующих процессу напыления контакта Шоттки.

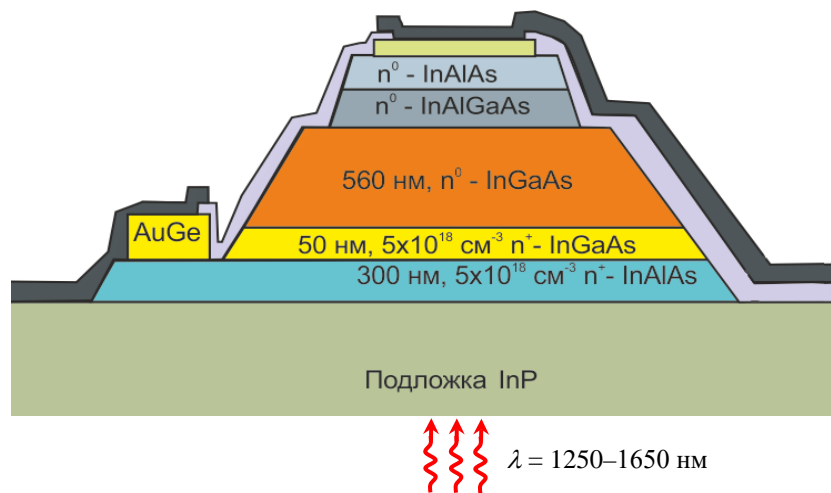


Рис. 1. Сечение мощного СВЧ-фотодиода Шоттки на основе двойной гетероструктуры InAlAs/InGaAs

Такая конструкция СВЧ-фотодиода Шоттки обладает низким тепловым сопротивлением, так как отвод тепла из области пространственного заряда фотодиода происходит через оба контакта [7]. В фотодиоде Шоттки барьерный контакт покрывает всю фоточувствительную область, поэтому такой фотодиод имеет меньшее контактное сопротивление по сравнению с фотодиодом с традиционным кольцевым контактом, имеющим отверстие по центру для ввода оптического излучения. Более того, в таком фотодиоде при его освещении со стороны контактного  $n^+$ -слоя металлический контакт Шоттки представляет собой зеркало для падающего на фотодиод оптического излучения, что значительно увеличивает эффективную длину поглощения оптического излучения в СВЧ-фотодиоде, имеющего тонкий поглощающий слой.

Изготовление фотодиода методом планарной технологии начинается с формирования мезоструктуры двухстадийным анизотропным химическим травлением. Первая мезоструктура формируется травлением  $n^0$ -InGaAs слоя, барьерного  $n^0$ -InAlAs слоя и варизонного  $n^0$ -InGaAlAs слоя вплоть до поглощающего  $n^0$ -InGaAs слоя, вторая – путем травления, поглощающего  $n^0$ -InGaAs слоя вплоть до контактного  $n^+$ -InAlAs слоя. Омический контакт на контактном  $n^+$ -InAlAs слое изготавливается методом обратной

фотолитографии по многослойной металлизации Ge/Au/Ni/Au. Контакт Шоттки изготавливается методом обратной фотолитографии напылением двухслойной металлизации Ti/Au на поверхность InAlAs предварительно обработанную в растворе HCl:H<sub>2</sub>O (1:10) после удаления защитного слоя  $n^0$ -InGaAs в селективном травителе. Далее для формирования периферийного мезапрофиля вокруг InAlAs/InAlGaAs/InGaAs активной области фотодиода контактный  $n^+$ -InAlAs слой вытравливается до полуизолирующей подложки InP. Затем вся поверхность структуры пассивируется слоем SiO<sub>2</sub> с толщиной 800 нм. После формирования химическим травлением окон в диэлектрическом слое изготавливается разводка из двухслойной металлизации Ti/Au методом обратной фотолитографии, на которой электрохимическим осаждением золота формируются микрополосковые выводы толщиной 5 мкм.

На рис. 2 приведены вольтамперная и вольтфарадная характеристики экспериментальных образцов мощного InAlAs/InGaAs СВЧ-фотодиода Шоттки с диаметром фоточувствительной области 15 мкм. Изготовленные фотодиоды характеризуются низкими значениями темнового тока порядка 0.1 нА при напряжении смещения -3 В. Высота барьера Шоттки составляет величину 0.7 В [8]. Емкость фотодиодов равна 105 фФ при напряжении смещения -2 В, что соответствует предельной частоте фотодиода 30 ГГц при сопротивлении нагрузки 50 Ом. Точковая чувствительность фотодиодов составляет 0.4 А/Вт на длине волны 1550 нм.

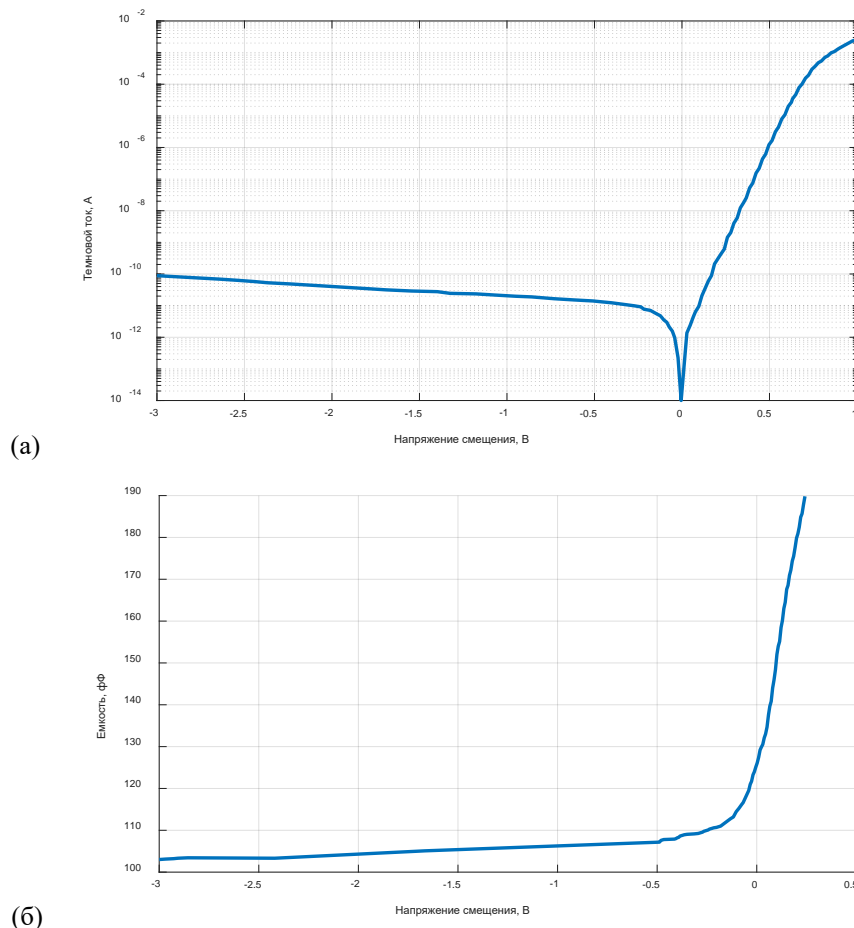


Рис. 2. Вольтамперная (а) и вольтфарадная (б) характеристики мощного СВЧ-фотодиода Шоттки на основе двойной гетероструктуры InAlAs/InGaAs

На рис. 3 приведена частотная характеристика экспериментального образца мощного InAlAs/InGaAs СВЧ-фотодиода Шоттки, установленного в копланарную СВЧ-линию с

волновым сопротивлением 50 Ом при различных напряжениях обратного смещения. Предельная полоса частот фотодиода на уровне 3 дБ составляет величину 28 ГГц. Спад частотной характеристики на частотах ниже 1 ГГц связан с влиянием цепи смещения, а неравномерности на частотной характеристике обусловлены не полным согласованием импеданса фотодиода и копланарной СВЧ-линии передачи.

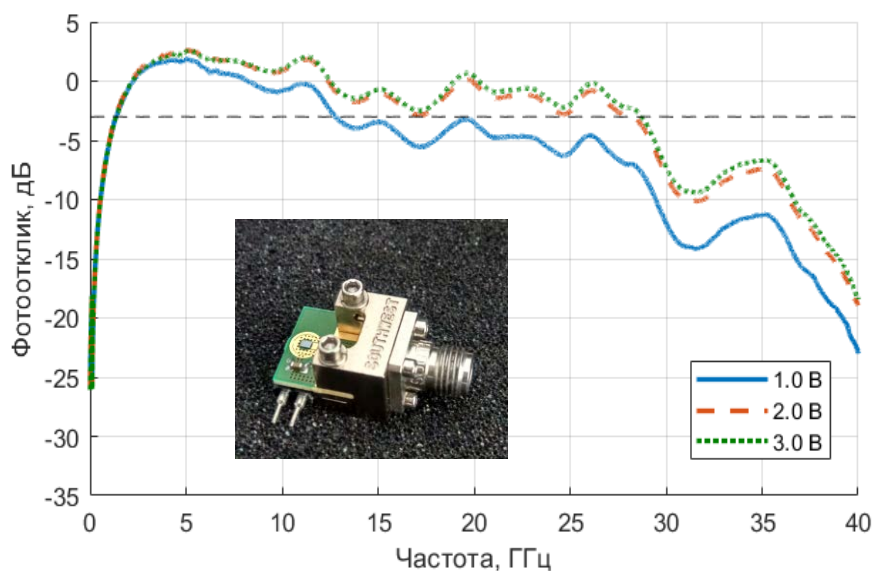


Рис. 3. Частотная характеристика InGaAs/InAlAs СВЧ-фотодиода Шоттки, установленного в копланарную СВЧ-линию, при различных напряжениях обратного смещения. На вставке приведена фотография экспериментального образца фотодиода установленного в СВЧ-плату с коаксиальным СВЧ-разъемом

На рис. 4 приведена зависимость выходной СВЧ мощности InGaAs/InAlAs СВЧ-фотодиода Шоттки, установленного в копланарную СВЧ-линию, от входной оптической мощности при 100% глубине модуляции на частоте 20 ГГц и различных напряжениях обратного смещения. Из рисунка видно, что при мощности входного оптического сигнала 60 мВт и при напряжении обратного смещения 1 В начинается насыщение выходной СВЧ-мощности фотодиода. Увеличение напряжения обратного смещения фотодиода приводит к увеличению максимальной выходной СВЧ-мощности, однако при напряжении обратного смещения 3 В и мощности входного оптического сигнала свыше 120 мВт происходит тепловой пробой фотодиода. Следует отметить, что при напряжении обратного смещения 3 В фототок линейно зависит от входной оптической мощности вплоть до наступления теплового пробоя, поэтому выходная СВЧ-мощность квадратично зависит от входной оптической мощности.

Таким образом, максимальная выходная СВЧ-мощность исследуемого СВЧ-фотодиода Шоттки равна 58 мВт на частоте 20 ГГц, что позволяет использовать такие фотодиоды в аналоговых волоконно-оптических линиях с широким линейным динамическим диапазоном, а также для генерации СВЧ-сигналов оптическими методами в системах радиолокации, радиосвязи и измерительной СВЧ-техники.

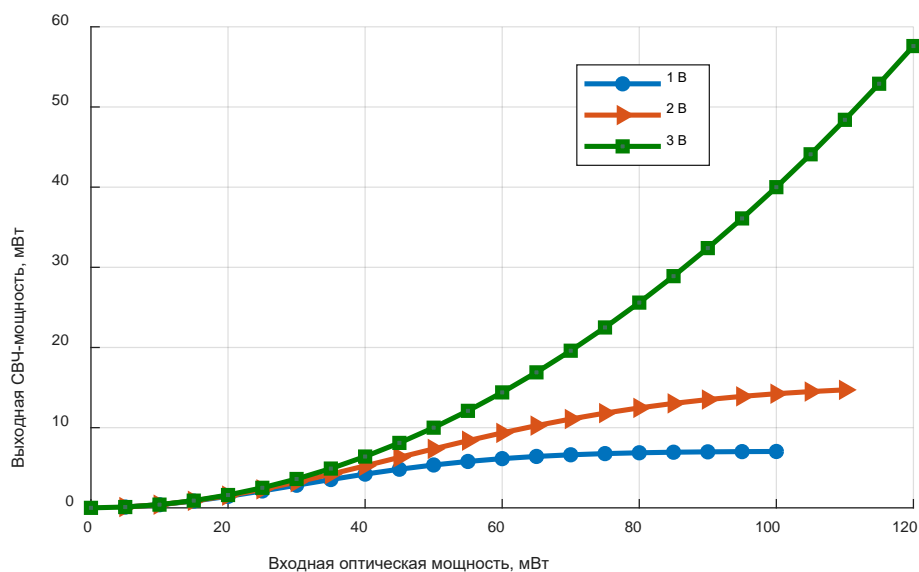


Рис. 4. Зависимость мощности СВЧ-сигнала на выходе InGaAs/InAlAs СВЧ-фотодиода Шоттки, установленного в копланарную СВЧ-линию, от входной оптической мощности при 100% глубине модуляции на частоте 20 ГГц и различных напряжениях обратного смещения

#### Библиографический список

1. Microwave photonics / A.J. Seeds, K.J. Williams // *J. Lightwave Technology*. – 2006. – V.24. – №12. – pp. 4628-4641.
2. Волоконно-оптические лазерные и фотодиодные модули СВЧ-диапазона и системы радиофотоники на их основе / С.А. Малышев, А.Л. Чиж, К.Б. Микитчук // *Материалы 4-й Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ»*. — Санкт-Петербург, Россия. — 2015. — С. 10-18.
3. Microwave Photonics Programs at DARPA / R. W. Ridgway, Carl L. Dohrman, and Joshua A. Conway // *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*. – 2014. – Vol. 32, № 20. – pp. 3428-3439.
4. Saturation characteristics of fast photodetectors / Pao-Lo Liu, Williams K.J., Frankel M.Y., Esman R.D. // *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* – 1999. – V.47. – №7. – pp. 1297-1303.
5. Design considerations for high-current photodetectors / K.J. Williams, R.D. Esman // *J. Lightwave Technology*. – 1999. – V.17. – №8. – pp. 1443-1454.
6. High-power InGaAs/InP partially depleted absorber photodiodes for microwave generation / S.A. Malyshev, A.L. Chizh, Yu.G. Vasileuski // *J. Lightwave Technology*. – 2008. – V.26. – №15. – pp. 2732-2739.
7. High-speed high-power InAlAs/InGaAs/InP Schottky photodiode/ A.Chizh, S. Malyshev, K. Mikitchuk // *IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP2015)* – Paphos, Cyprus, 24-29 October, 2015. – pp. 1-4.
8. Barrier characteristics and interface properties of Au/Ti/n-InAlAs Schottky contacts / I.B. Chistokhin, M.S. Aksenov, N.A. Valisheva, D.V. Dmitriev, A.P. Kovchavtsev, A.K. Gutakovskii, I.P. Prosvirin, K.S. Zhuravlev / *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2018. – V. 74. – pp. 193-198.