

# Амплитудно-фазовое преобразование в мощных СВЧ-фотодиодах Шоттки

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

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

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

**Аннотация:** В данной работе исследовалось амплитудно-фазовое преобразование в мощных СВЧ-фотодиодах Шоттки, которое приводит к появлению избыточного фазового шума на выходе фотодиода. Показано, что с помощью управления напряжением обратного смещения СВЧ-фотодиода возможно снизить амплитудно-фазовое преобразование шумов, причем для напряжения обратного смещения 3 В и при фототоках менее 30 мА коэффициент амплитудно-фазового преобразования InAlAs/InGaAs фотодиодов Шоттки с диаметром активной области 15 мкм составляет величину менее 1.5 рад/Вт.

**Ключевые слова:** мощный СВЧ-фотодиод, барьер Шоттки, двойная гетероструктура InAlAs/InGaAs, амплитудно-фазовое преобразование шума, фазовый шум

## 1. Введение

Аналоговые волоконно-оптические линии передачи являются базовыми элементами систем радиофотоники и являются альтернативой коаксиальным кабелям при генерации, передаче и обработке СВЧ-сигналов вследствие сверхнизких потерь в оптическом волокне, сверхширокой полосы частот; возможности многоканальной передачи СВЧ-сигналов; низкого уровня фазовых шумов; высокой помехоустойчивости к электромагнитным помехам; малой массы и размеров [1]. Эффективность оптоэлектронного преобразования в аналоговых волоконно-оптических линиях ограничивается низкой выходной мощностью СВЧ-сигнала, а также избыточным фазовым шумом, который добавляется в выходному СВЧ-сигналу из-за нелинейности энергетической характеристики СВЧ-фотодиодов.

Для аналоговых волоконно-оптических линий с широким динамическим диапазоном требуются мощные высокоскоростные фотодиоды спектрального диапазона 1250–1650 нм (вблизи минимума затухания в оптическом волокне) [2]. Известно, что для фотодиодов характерно насыщение фототока при большой мощности падающего оптического излучения, которое обусловлено эффектом саморазогрева вследствие выделения джоулева тепла при протекании фототока [3-5], экранированием внутреннего электрического поля фотоносителями (эффект пространственного заряда [6]). Авторами ранее представлен мощный СВЧ-фотодиод Шоттки на основе двойной гетероструктуры InAlAs/InGaAs, позволяющий достичь максимальной выходной мощности СВЧ-сигнала 58 мВт на частоте 20 ГГц [7]. Однако, при исследовании указанных мощных СВЧ-фотодиодов Шоттки была обнаружена связь фазы выходного СВЧ-сигнала и величины мощности оптической несущей. То есть, из-за нелинейностей энергетической характеристики фотодиодов, шум интенсивности оптической несущей преобразуются в фазовый шум СВЧ-сигнала на выходе фотодиода, что отрицательно сказывается на характеристиках аналоговых волоконно-оптических линий [8,9]. В данной работе исследовалось амплитудно-фазовое преобразование в мощных СВЧ-фотодиодах Шоттки, которое приводит к появлению избыточного фазового шума.

## 2. Избыточный фазовый шум и коэффициент амплитудно-фазового преобразования

Преобразование шума интенсивности лазерного излучения в СВЧ-фотодиодах является следствием совместного влияния нелинейностей зависимости импеданса фотодиода и времени переноса носителей заряда от распределения электрического поля в полупроводниковой структуре СВЧ-фотодиода [9–11]. По этой причине относительная интенсивность шума лазерного излучения на малых отстройках от оптической несущей  $RIN_{LD}(\Delta f)$  преобразуется в фазовый шум на таких же отстройках  $\Delta f$  от частоты выходного СВЧ-сигнала фотодиода  $f_0$ . В современных мощных СВЧ-фотодиодах, в том числе исследуемых фотодиодах Шоттки, работающих в линейном режиме, вклад преобразования шума интенсивности оптического излучения во флуктуации амплитуды СВЧ-сигнала оказывается пренебрежимо малым по сравнению с преобразованием шума интенсивности оптического излучения во флуктуации фазы. В этом случае спектральная плотность мощности избыточного фазового шума на выходе СВЧ-фотодиода может быть записана в следующем виде [9]:

$$L(\Delta f) = \frac{1}{2} K_{PD}^2(f_0) RIN_{LD}(\Delta f) P_{opt}^2, \quad (1)$$

где  $K_{PD}(f_0)$  – коэффициент преобразования шума интенсивности оптического излучения в фазовый шум СВЧ-сигнала на выходе фотодиода – то есть коэффициент амплитудно-фазового преобразования шума для частоты  $f_0$ ,  $P_{opt}$  – средняя оптическая мощность, падающая на фотодиод, множитель  $\frac{1}{2}$  используется, так как фазовый шум по определению рассчитывается как односторонняя спектральная плотность мощности. Коэффициент преобразования шума интенсивности оптического излучения в фазовый шум на выходе СВЧ-фотодиода [рад/Вт], рассчитывается из зависимости фазы выходного СВЧ-сигнала  $\varphi_{PD}$  на частоте  $f$  от постоянной составляющей оптической мощности  $P_{opt}$  следующим образом [9]:

$$K_{PD}(f_0) = \Delta\varphi_{PD}(f_0) / \Delta P_{opt} \quad (2)$$

Для лазерного диода с распределенной обратной связью и током накачки, значительно превышающем пороговый, низкочастотная зависимость спектральной относительной интенсивности шума лазерного излучения для частот отстройки свыше 10 Гц от оптической несущей, может быть аппроксимирована следующим выражением [9]:

$$RIN_{LD}(\Delta f) \approx b_{-1,LD} / \Delta f \quad (3)$$

где  $b_{-1,LD}$  – весовой коэффициент составляющей низкочастотной спектральной относительной интенсивности шума излучения лазерного диода с  $1/f$  спектральной плотностью мощности. Спектральная плотность мощности избыточного фазового шума, обусловленного амплитудно-фазовым преобразованием в СВЧ-фотодиоде, вблизи СВЧ-несущей принимает следующий вид:

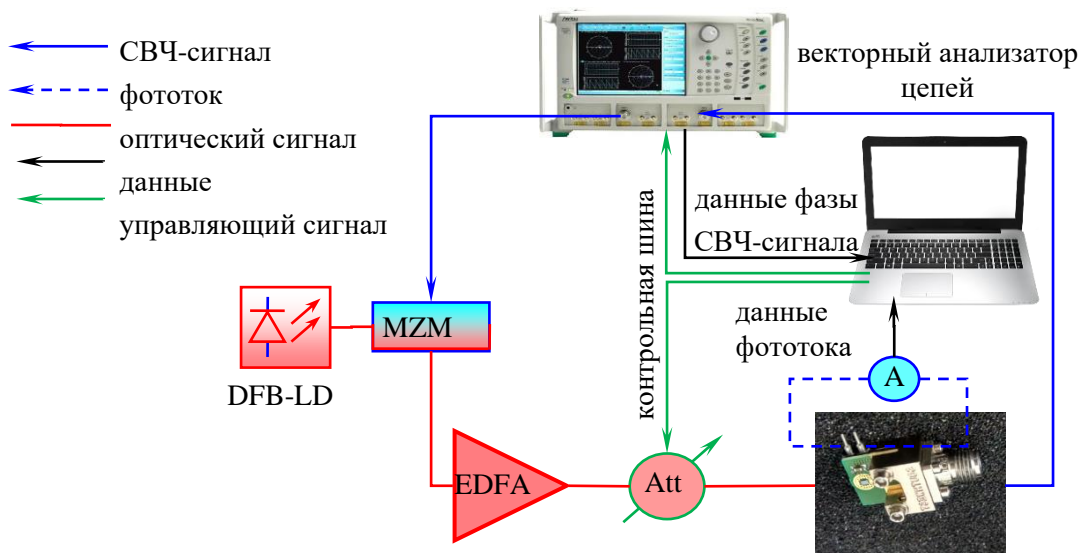
$$L(\Delta f) \approx b_{-1} / \Delta f, \quad b_{-1} = \frac{1}{2} K_{PD}^2(f_0) P_{opt}^2 b_{-1,LD} \quad (4)$$

где  $b_{-1}$  – весовой коэффициент избыточного фазового шума СВЧ-фотодиода с  $1/f$  спектральной плотностью мощности. Таким образом, из-за нелинейностей энергетической характеристики фотодиодов,  $1/f$ -шум интенсивности излучения лазерного диода с спектральной плотностью мощности преобразуются в собственный  $1/f$  фазовый шум на выходе фотодиода, что значительно ограничивает возможность применения последнего в системах генерации СВЧ-сигналов с низким фазовым

шумом оптическими методами, например, оптоэлектронных генераторах [9].

### 3. Экспериментальные исследования

На рисунке показана схема стенда для исследования зависимости фазы СВЧ-сигнала от постоянной составляющей фототока. В экспериментальном стенде лазерный диод с распределенной обратной связью и электрооптический модулятор Маха-Цендера с рабочей полосой частот до 40 ГГц используются для электрооптического преобразования, в результате которого электрический СВЧ-сигнал преобразуется в модулированный по интенсивности оптический сигнал с глубиной модуляции 100%. Оптический усилитель на легированном эрбием волокне с постоянным коэффициентом усиления и волоконно-оптический аттенуатор используются для изменения мощности падающей на фотодиод оптической несущей. Фаза СВЧ-сигнала измеряется векторным анализатором цепей. Следует отметить, что для минимизации влияния воздушных потоков и флуктуаций температуры на фазу сигнала в оптическом волокне требуется быстрая перестройка величины мощности оптической несущей (все время измерения не превышает нескольких десятков секунд), что достигается использованием управляемого с компьютера моторизированного волоконно-оптического аттенуатора. Данные о величине постоянной составляющей фототока собираются одновременно со значениями фазы СВЧ-сигнала.

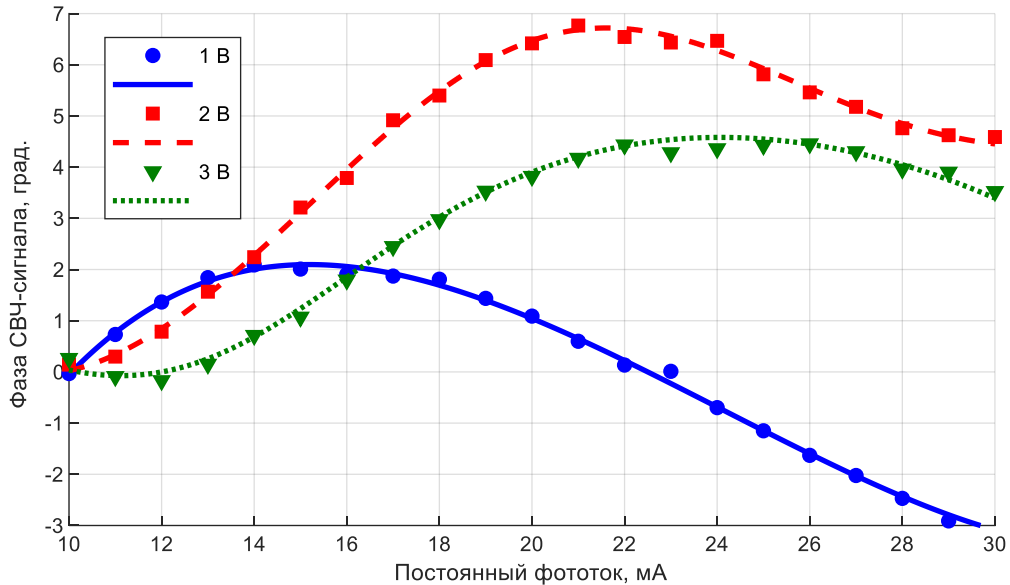


**Рисунок 1.** Схема стенда для исследования зависимости фазы СВЧ-сигнала от постоянной составляющей фототока, где DFB-LD – лазерный диод с распределенной обратной связью, EDFA – оптический усилитель на легированном эрбием волокне, Att – волоконно-оптический аттенуатор, управляемый с компьютера, А – цепь смещения с цифровым амперметром

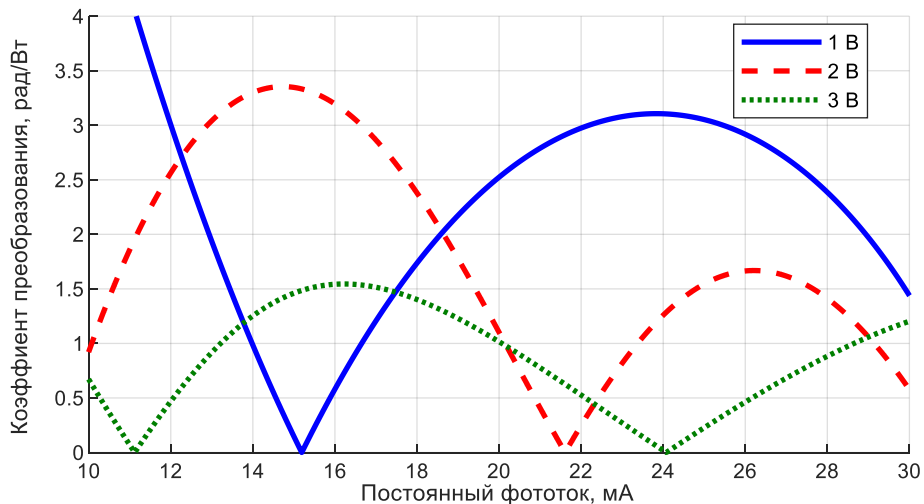
На рисунке 2 представлены зависимости изменения фазы СВЧ-сигнала на выходе мощного InAlAs/InGaAs фотодиода Шоттки с диаметром активной области 15 мкм от постоянного фототока, измеренные для различных напряжений смещения на частоте 20 ГГц. Следует отметить, что для измерений чип СВЧ-фотодиода был оптически состыкован с оптическим волокном и включен в копланарную заземленную СВЧ-линию передачи, размещенную на печатной плате из диэлектрического материала RO4003C с выходным коаксиальным СВЧ-разъемом. Из рисунка видно, что зависимость фазы СВЧ-сигнала от постоянного фототока немонотонная, причем в зависимости от приложенного напряжения обратного смещения интервалы монотонности также смещаются.

На рисунке 3 представлены зависимости коэффициента преобразования шума интенсивности оптического излучения в фазовый шум на выходе мощного фотодиода

Шоттки от постоянного фототока, измеренные для различных напряжений смещения на частоте 20 ГГц. Из рисунка видно, что при увеличении напряжения обратного смещения коэффициент амплитудно-фазового преобразования шума в мощном СВЧ-фотодиоде Шоттки уменьшается, причем для напряжения обратного смещения 3 В достигается величина коэффициента амплитудно-фазового преобразования менее 1.5 рад/Вт для фототоков величиной до 30 мА. Следует отметить, что у лучшего на сегодняшний день коммерчески доступного мощного СВЧ-фотодиода коэффициент амплитудно-фазового преобразования составляет величину 5 рад/Вт [12].



**Рисунок 2.** Фаза СВЧ-сигнала на выходе СВЧ-фотодиода в зависимости от среднего фототока, измеренная для различных напряжений смещения мощного СВЧ-фотодиода Шоттки (частота передаваемого СВЧ-сигнала – 20 ГГц)



**Рисунок 3.** Коэффициент амплитудно-фазового преобразования шума для мощного СВЧ-фотодиода Шоттки в зависимости от постоянного фототока, измеренные для различных напряжений смещения и частоты 20 ГГц

#### 4. Заключение

В работе установлено, что с помощью управления напряжением обратного смещения СВЧ-фотодиода Шоттки возможно снизить амплитудно-фазовое преобразование шумов, причем для напряжения обратного смещения 3 В достигается

величина коэффициента амплитудно-фазового преобразования менее 1.5 рад/Вт для фототоков величиной до 30 мА, что позволяет использовать такие фотодиоды в аналоговых волоконно-оптических линиях для передачи СВЧ-сигналов с низким фазовым шумом, а также для генерации СВЧ-сигналов оптическими методами в системах радиолокации, радиосвязи и измерительной СВЧ-техники.

#### Список литературы

1. Seeds A.J., Williams K.J., "Microwave photonics", *Lightwave Technology*, V.24, n.12, p.4628-4641, Dec. 2006.
2. Urick V.J., Hastings A.S., McKinney J.D., Devgan P.S., Williams K.J., Sunderman C., Diehl J.F., Colladay K., "Photodiode linearity requirements for radio-frequency photonics and demonstration of increased performance using photodiode arrays", *IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics*, p.86-89, Oct. 2008.
3. Pao-Lo Liu, Williams K.J., Frankel M.Y., Esman R.D. "Saturation characteristics of fast photodetectors", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, V.47, n.7, p.1297-1303, Jul. 1999.
4. Williams K.J., Esman R.D. "Design considerations for high-current photodetectors", *J. Lightw. Technol.*, V.17, n.8, p.1443-1454, Aug. 1999.
5. 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.
6. Kato K., "Ultrawide-band/high-frequency photodetectors", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, V.47, n.7, p.1265-1281, Jul. 1999.
7. Чиж, А.Л. Мощный СВЧ-фотодиод Шоттки на основе двойной гетероструктуры InAlAs/InGaAs / А.Л. Чиж [и др.] // Сб. ст. 7-ой Всеросс. науч. конф. «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – С.-Петербург, Россия. – 28-30 мая 2018. – С. 120-124.
8. E. Rubiola, *Phase noise and frequency stability in oscillators*, Cripps, S.C., Ed. Cambridge, UK: Cambridge Univ. 2008.
9. D. Eliyahu, D. Seidel, and L. Maleki "RF amplitude and phase-noise reduction of an optical link and an optoelectronic oscillator," *Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 56, no. 2, pp. 449–456, 2009.
10. Xiaojun Xie, Jizhao Zang, A. Beling, and J. Campbell, "Characterization of amplitude noise to phase noise conversion in charge-compensated modified untravelling carrier photodiodes," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 35, no. 9, pp. 1718–1724, May 2017.
11. Yue Hu, C. Menyuk, Xiaojun Xie, M. Hutchinson, V. Urick, J. Campbell, and K. Williams, "Computational study of amplitude-to-phase conversion in a modified unitraveling carrier photodetector," *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 2, art. no. 5501111, April 2017.
12. [https://www.discoverysemi.com/Product\\_Pages/DSC-xHLPD.php](https://www.discoverysemi.com/Product_Pages/DSC-xHLPD.php)