

# **Моделирование динамики оптоэлектронного генератора на основе лазерного диода с внешним резонатором**

**А. А. Афоненко, А. Б. Матюхин**

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, e-mail: [afonenko@bsu.by](mailto:afonenko@bsu.by)*

На основе скоростных уравнений проведен анализ динамики генерации полупроводникового лазера с внешним резонатором и оптоэлектронной обратной связью. Рассчитаны спектры фазового шума в режиме автопульсаций оптической мощности при свободной генерации и при оптоэлектронной обратной связи. Показано, что использование оптоэлектронной обратной связи снижает фазовый шум на 50–60 дБ/н для частот, меньших обратного времени задержки оптоэлектронной связи.

**Ключевые слова:** полупроводниковый лазер, внешний резонатор; оптоэлектронная обратная связью, оптоволоконный генератор, фазовый шум.

## **Modeling the dynamics of an optoelectronic oscillator based on a laser diode with an external cavity**

**A. A. Afonenko, A. B. Matyukhin**

*Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: [afonenko@bsu.by](mailto:afonenko@bsu.by)*

The lasing dynamics of a semiconductor laser with an external cavity and optoelectronic feedback has been analyzed based on rate equations. The phase noise spectra have been calculated in self-pulsations mode of optical power at free-running and with optoelectronic feedback. It has been shown that optoelectronic feedback reduces phase noise by 50–60 dBc for frequencies below the inverse delay time of the optoelectronic feedback.

**Keywords:** semiconductor laser, optical feedback; external cavity, fiberoptic oscillator, phase noise

## **Введение**

Режим генерации регулярных пульсаций излучения в инжекционном лазере в СВЧ диапазоне может быть реализован с помощью внешнего резонатора или создания в лазерном резонаторе области насыщающегося поглотителя [1]. Внешний оптический резонатор может быть создан пристыковке лазерного чипа с оптическим волокном с брэгговской решеткой показателя преломления. Технически это проще, чем формировать область насыщающегося поглотителя внутри лазерного чипа путем облучения высокоэнергетическими ионами. Для увеличения стабильности частоты генерируемых пульсаций можно использовать запаздывающую оптоэлектронную связь [2]. Целью данной работы является анализ влияния запаздывающей оптоэлектронной связи на стабильность частоты пульсаций излучения в лазере с внешним резонатором.

## **1. Модель генератора с запаздывающей оптоэлектронной связью**

Излучение из лазерного диод с внешним резонатором вводится в одномодовое волокно (рис. 1). После прохождения волокна запаздывающее излучение попадает

на фотодиод, преобразуется в электрический сигнал и через узкополосный фильтр подается в цепь питания лазера.

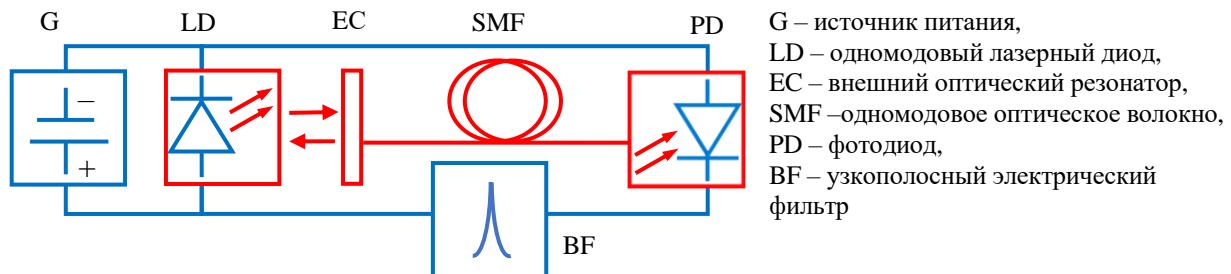


Рис. 1. Схема оптоэлектронного генератора на основе лазерного диода с внешним резонатором

Численный анализ основывался на скоростных уравнениях для комплексной амплитуды поля и концентрации электронов в активной области полупроводникового лазера [1]. Внешняя оптическая обратная связь включалась в уравнение для амплитуды в виде слагаемого, пропорционального амплитуде излучения, вернувшегося в резонатор после отражения от волоконной решетки. Флуктуации амплитуды и фазы излучения, связанные со спонтанными переходами, учитывались соответствующими скачками этих величин на каждом шаге интегрирования. Параметры активной области брались для лазера с длиной волны генерации 1.55 мкм.

## 2. Результаты численного моделирования

Режим автопульсаций интенсивности излучения возникает, когда коэффициент отражения во внешнем резонаторе превышает некоторую величину, зависящую от времени запаздывания и фазы возвращающегося излучения [1]. Фаза возвращающегося излучения ( $\phi = \omega \tau_{\text{ext}}$ ) зависит от частоты генерируемого оптического излучения  $\omega$  и времени задержки излучения во внешнем резонаторе  $\tau_{\text{ext}}$ . Для уменьшения флуктуаций фазы из-за нестабильности оптической частоты целесообразно выбирать время задержки излучения во внешнем резонаторе как можно меньшим. Как видно из рис. 1, генерацию пульсаций излучения можно получить, например, при времени запаздывания около  $\tau_{\text{ext}} = 0.05$  нс, амплитудном коэффициенте отражения  $r_{\text{ext}} = 0.1$  и набеге фазы во внешнем резонаторе  $\phi = -5\pi/12$ . При стабилизации температуры лазера с точностью 0.1° с учетом температурной перестройки длины волны генерации 0.1 нм/град (12 ГГц/град) флуктуация фазы составит  $0.12\pi$ , что приемлемо для поддержания работы лазера в требуемой области неустойчивости.

Основным фактором нестабильности пульсаций излучения являются спонтанные переходы. Различие формы последовательных импульсов излучения обнаруживается даже визуально (рис. 3). Фазовый шум лазерного диода с внешним резонатором, функционирующего в режиме самоподдерживающихся пульсаций, в режиме свободной генерации на частоте 100 кГц составляет около 30 дБн/Гц. Фильтрация с помощью узкополосного фильтра с шириной полосы пропускания 1 % уменьшает фазовый шум только для больших частот ( $> 0.1$  ГГц).

Использование оптоэлектронной обратной связи с максимальным коэффициентом передачи снижает фазовый шум на 30 дБн/Гц для частот, больших обратного времени задержки оптоэлектронной связи, и на 50–60 дБн/Гц для низких частот. При этом фазовый шум на частоте 100 кГц составляет около 82 дБн/Гц.

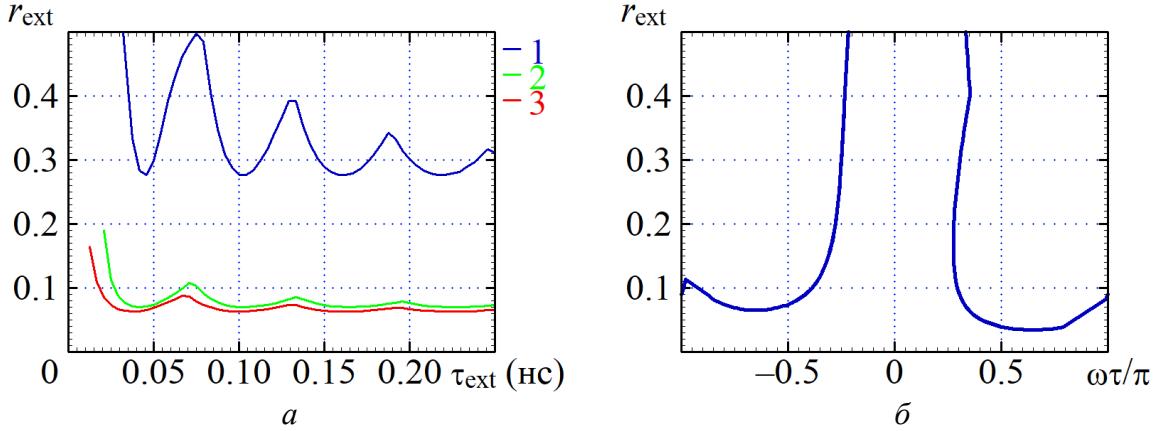


Рис. 2. Границы устойчивости лазера с внешним резонатором:

- a* – в зависимости от амплитудного коэффициента отражения внешнего зеркала и времени запаздывания при набеге фазы во внешнем резонаторе  $-\pi/4$  (1),  $-\pi/2$  (2) и  $-3\pi/4$  (3);  
*б* – в зависимости от амплитудного коэффициента отражения внешнего зеркала и набега фазы во внешнем резонаторе при  $\tau_{\text{ext}} = 0.05$  нс

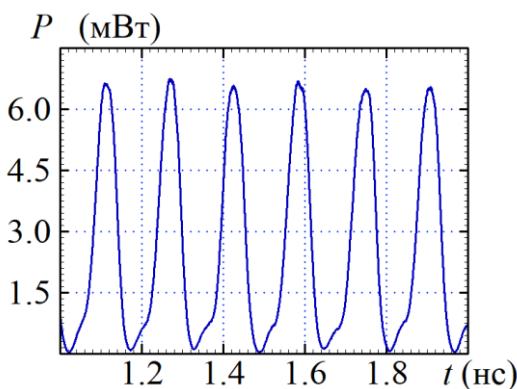


Рис. 3. Временная зависимость мощности генерации с частотой 6.3 ГГц

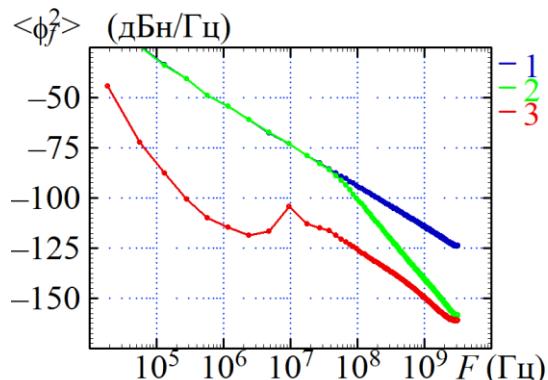


Рис. 4. Фазовый шум лазерного диода с внешним резонатором, функционирующего в режиме самоподдерживающихся пульсаций:  
1 – в режиме свободной генерации; 2 – после узкополосного электрического фильтра;  
3 – при наличии оптоэлектронной обратной связи с запаздыванием на 100 нс

## Библиографические ссылки

1. Афоненко А. А., Манак И. С. Кинетическая теория полупроводниковых инжекционных лазеров. Минск: Белгосуниверситет, 1998. 69 с.
2. Афоненко А. А. Анализ фазовых шумов лазерных диодов с насыщающимся поглотителем при оптоэлектронной обратной связи / А. А. Афоненко, Е. В. Бизюк, А. Л. Чиж // Квантовая электроника: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–22 ноябр. 2019 г. редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск: РИВШ, 2019. С. 140–141.