

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

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 связь, 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

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 при стыковке 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 диода 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.

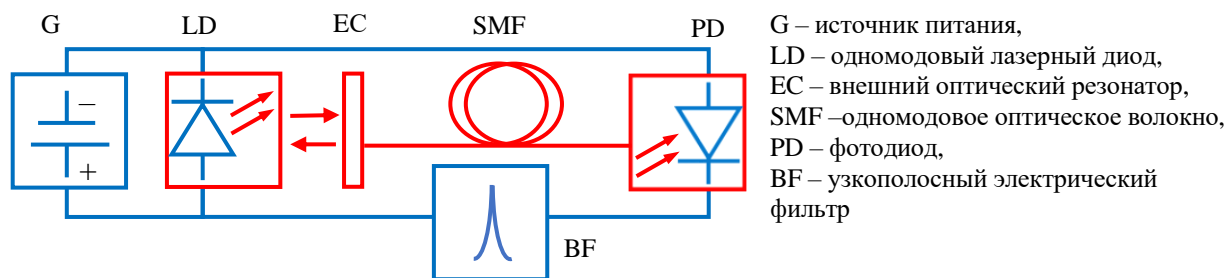


Рис. 1. Схема оптоэлектронного генератора на основе лазерного диода с внешним резонатором

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 ($\varphi = \omega \tau_{\text{ext}}$) зависит от частоты генерируемого оптического излучения ω и времени задержки излучения во внешнем резонаторе τ_{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 $\varphi = -5\pi/12$. 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 0.12π , 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.

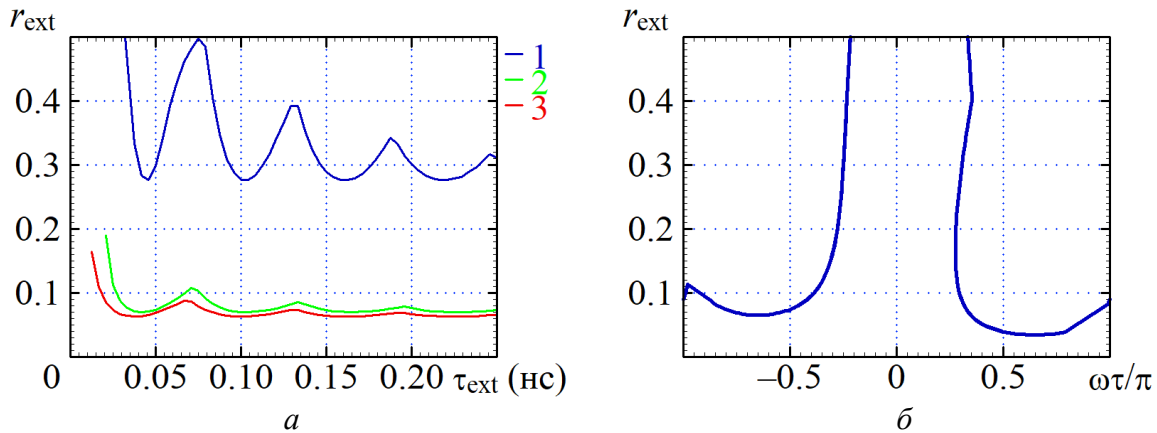


Рис. 2. Границы устойчивости лазера с внешним резонатором:

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 $-\pi/4$ (3);
 b – в зависимости от амплитудного коэффициента отражения внешнего зеркала и набеге фазы во внешнем резонаторе при $\tau_{\text{ext}} = 0.05$ нс

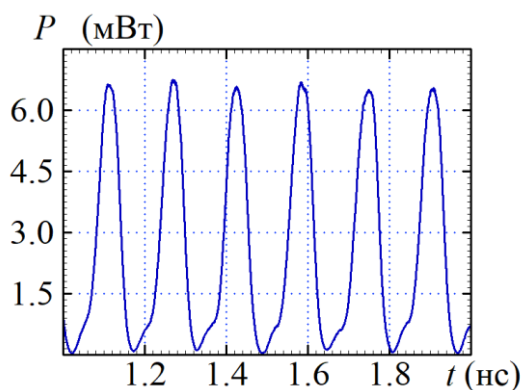


Рис. 3. Временная зависимость мощности генерации с частотой 6.3 ГГц

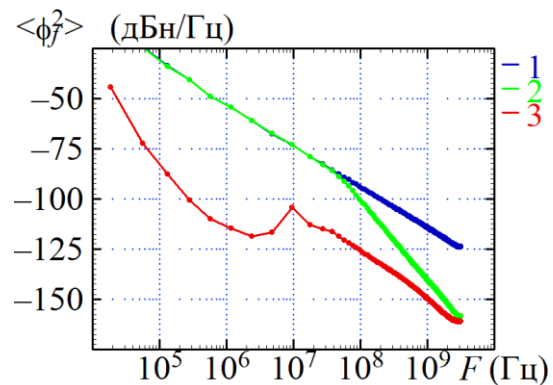


Рис. 4. Фазовый шум лазерного диода с внешним резонатором, функционирующего в режиме самоподдерживающихся пульсаций: 1 – в режиме свободной генерации; 2 – после узкополосного электрического фильтра; 3 – при наличии оптоэлектронной обратной связи с запаздыванием на 100 нс

Библиографические ссылки

1. Афоненко А. А., Манак И. С. Кинетическая теория полупроводниковых инжекционных лазеров. Мн.: 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 нояб. 2019 г. редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск: РИВШ, 2019. С. 140–141.