

Моделирование динамики генерации в полупроводниковом лазере с резонатором Фабри–Перо с оптической обратной связью на основе волоконной решетки

А. А. Афоненко, А. Б. Матюхин

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, e-mail: afonenko@bsu.by

На основе распределенной модели резонатора проведен анализ динамических режимов генерации в полупроводниковом лазере с резонатором Фабри–Перо с внешней оптической обратной связью на основе волоконной решетки. Проанализирована зависимость доли мощности боковых мод от времени запаздывания обратной связи, коэффициента отражения и ширины спектра волоконной решетки. Показано, что наилучшая селекция одной продольной моды при неконтролируемом набеге фазы во внешнем резонаторе реализуется при максимальной величине коэффициента обратной связи, сохраняющей режим устойчивой генерации и обеспечивающей одновременное существование нескольких мод внешнего резонатора.

Ключевые слова: полупроводниковый лазер; оптическая обратная связь; волоконная решетка; селекция продольных мод.

Modeling of generation dynamics in a semiconductor laser with Fabry-Perot resonator with optical feedback based on fiber grating

A. A. Afonenko, A. B. Matyukhin

Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: afonenko@bsu.by

Dynamic regimes of generation in a semiconductor laser with a Fabry–Perot resonator with external optical feedback based on a fiber grating are analyzed on the basis of a distributed model of the resonator. The dependence of the power fraction of side modes on the feedback delay time, reflection coefficient, and spectrum width of the fiber grating is analyzed. It is shown that the best selection of one longitudinal mode at uncontrolled phase raid in the external resonator is realized at the maximum value of the feedback coefficient, which preserves the mode of stable generation and provides simultaneous existence of several modes of the external resonator.

Keywords: semiconductor laser; optical feedback; fiber grating; longitudinal mode selection.

Введение

Использование внешнего резонатора позволяет уменьшить ширину линии генерации полупроводникового лазера [1]. При этом для подавления мод собственного резонатора используется антиотражающее покрытие выходной грани кристалла. С практической точки зрения интерес представляют схемы, использующие коммерческие лазерные диоды без последующей модификации их конструкции. Целью настоящей работы является анализ возможности селекции одной продольной моды резонатора в лазере с резонатором Фабри–Перо без просветляющего покрытия с помощью создания оптической обратной связи с использованием волоконной решетки.

1. Модель лазера с внешним резонатором

Численный анализ основывался на распределенной модели резонатора [2]. Для резонатора Фабри–Перо базовая система уравнений включала два укороченных волновых уравнений, описывающих динамику двух встречных волн внутри собственного резонатора. Флуктуации амплитуды и фазы излучения, связанные со спонтанными переходами, учитывались соответствующими скачками этих величин на протяжении резонатора на каждом шаге интегрирования. Спектральная зависимость усиления учитывалась с помощью динамической фильтрации амплитуды излучения при отражении от грани резонатора. Внешняя оптическая обратная связь включалась в граничные условия как интерференция отраженного от грани резонатора излучения и излучения, вернувшегося в резонатор после отражения от волоконной решетки. Волоконная решетка моделировалась фильтром второго порядка с шириной, соответствующей спектру брегговского отражения.

2. Результаты численного моделирования

При времени запаздывания оптического излучения, много меньшем времени когерентности излучения, наличие обратной связи может приводить к неустойчивой генерации [3]. Автопульсации излучения возникают, если фаза возвращающегося излучения не кратна 2π и коэффициент отражения превышает некоторую величину, зависящую от времени запаздывания (рис. 1). При неконтролируемой фазе возвращающегося излучения, несмотря на селективное отражение одной продольной моды собственного резонатора, обеспечиваемое волоконной решеткой, в многомодовом лазере это приводит к увеличению количества генерирующих продольных мод. На рис. 2 видно, как переход от неустойчивой генерации к устойчивой уменьшает долю боковых мод при времени запаздывания около 0.16 нс, что коррелирует с зависимостью границы устойчивости (рис. 1).

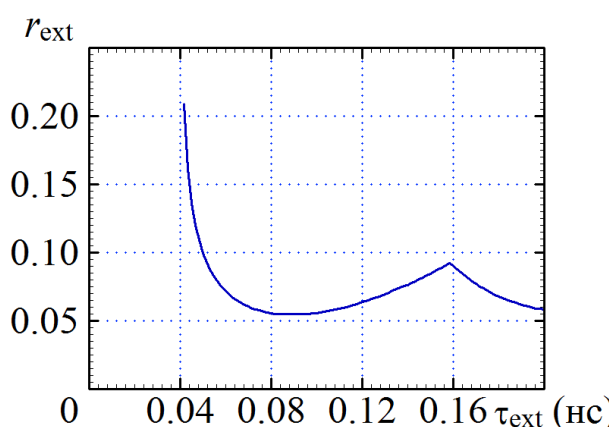


Рис. 1. Границы устойчивости лазера с внешним резонатором в зависимости от времени запаздывания при набеге фазы во внешнем резонаторе -90° . Область устойчивости расширяется вблизи $\tau_{\text{ext}} = 0.16$ нс

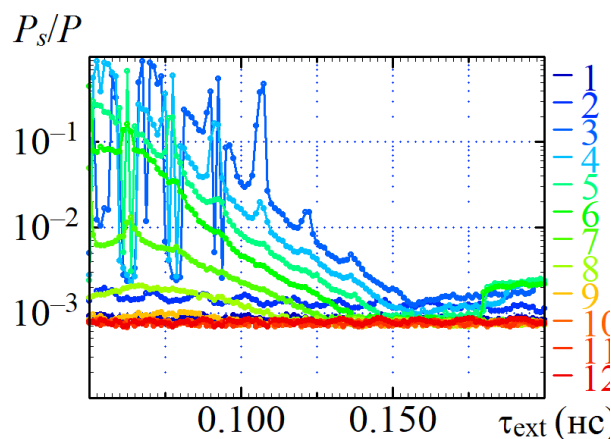


Рис. 2. Доля мощности боковых мод в зависимости от времени запаздывания оптической обратной связи. Цифры соответствуют набегу фазы во внешнем резонаторе 0, 30, 60, ... 330°

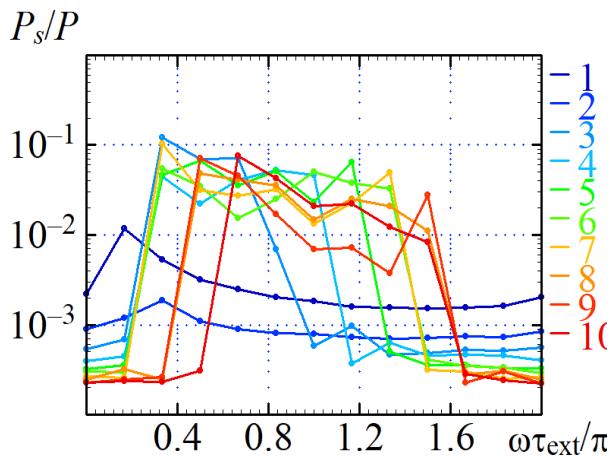


Рис. 3. Доля мощности боковых мод в зависимости от набега фазы во внешнем резонаторе. Цифры соответствуют амплитудному коэффициенту отражения решетки 0.05, 0.10, 0.15, ... 0.5. Ширина спектра отражения 0.2 нм, $\tau_{\text{ext}} = 0.15$ нс

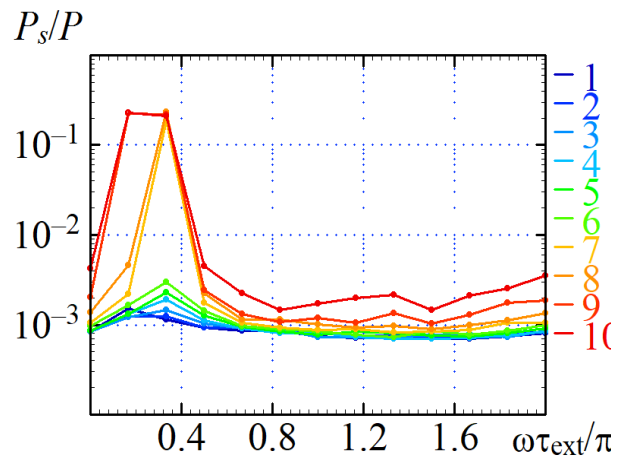


Рис. 4. Доля мощности боковых мод в зависимости от набега фазы во внешнем резонаторе. Цифры соответствуют ширине спектра отражения 0.05, 0.10, 0.15, ... 0.5 нм. Коэффициент отражения решетки по амплитуде 0.1, $\tau_{\text{ext}} = 0.15$ нс

Резкое ухудшение спектра генерации при превышении критической величины коэффициента отражения иллюстрирует рис. 3. При устойчивой генерации увеличение селективного отражения одной моды во внешнем резонаторе от 0.05 до 0.1 приводит к подавлению соседних мод (кривые 1 и 2). При дальнейшем увеличении коэффициента отражения возникает и далее расширяется область набега фаз, где генерация неустойчива и доля мощности боковых мод резко возрастает (кривые 3–10).

При ширине спектра отражения волоконной решетки, меньшем или сравнимом с межмодовым интервалом полупроводникового лазера (здесь $\Delta\lambda_m = 0.16$ нм), возникают флуктуации выходной мощности из-за неконтролируемого дрейфа частоты генерации. Для уменьшения флуктуации выходной мощности необходимо максимально увеличивать ширину спектра брегговского отражения. Как видно на рис. 4, эффективное подавление боковых мод сохраняется при увеличении ширины спектра отражения до 0.3 нм ($\sim 2\Delta\lambda_m$), а далее наблюдаются резкое увеличение мощности боковых мод.

Изменение спектра генерации лазера с резонатором Фабри–Перо длиной 600 мкм после его стыковки с волоконной решеткой показано на рис. 5. Исходный спектр является многомодовым, межмодовый интервал составляет 66 ГГц, интенсивности мод имеют случайный характер. После создания оптической обратной связи в волокне на расстоянии 15 мм от края (задержка 0.15 нс) с коэффициентом отражения решетки по мощности 0.01 осуществляется селекция одной продольной моды собственного резонатора, боковые моды собственного резонатора подавляются и становятся различимы моды внешнего резонатора с межмодовым интервалом 6.7 ГГц.

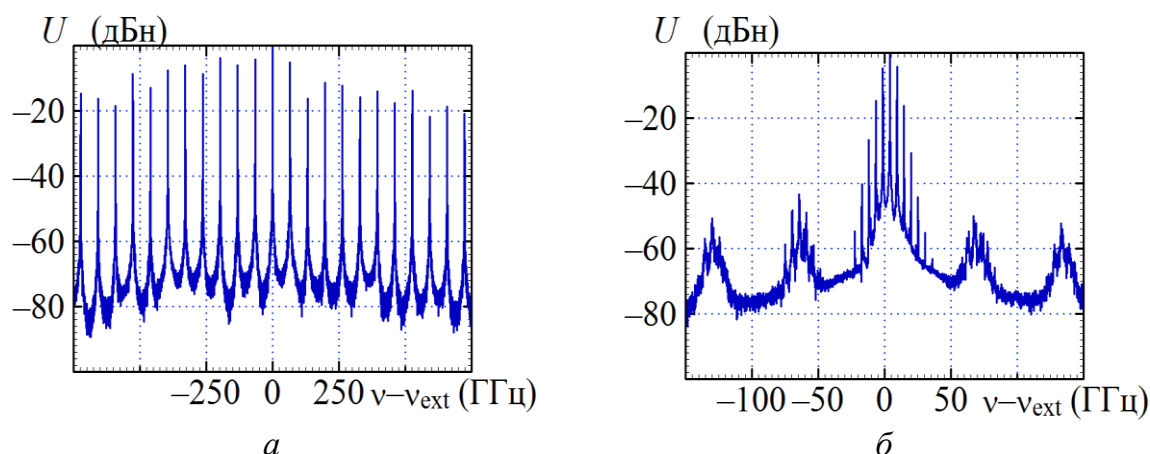


Рис. 5. Спектр излучения лазера без волоконной решетки (а) и с волоконной решеткой (б) при набега фазы во внешнем резонаторе $\omega t = 60^\circ$. Коэффициент отражения решетки по мощности 0.01, ширина спектра отражения брегговской решетки 0.2 нм, время запаздывания во внешнем резонаторе 0.15 нс

3. Заключение

Проведено численное моделирование динамики генерации в полупроводниковом лазере с резонатором Фабри–Перо с оптической обратной связью на основе волоконной решетки и проанализированы параметры обратной связи для получения одномодового режима генерации. Показано, что одномодовый режим генерации и отсутствие перескоков генерации на соседние продольные моды собственного резонатора реализуется при ширине спектра отражения менее двух межмодовых интервалов. Увеличение коэффициента отражения до некоторой критической величины обеспечивает подавление боковых мод в одомодовый режим генерации, однако при дальнейшем увеличении коэффициента отражения режим генерации становится неустойчивым и доля мощности боковых мод резко возрастает. Наилучшая селекция одной продольной моды при неконтролируемом набега фазы во внешнем резонаторе реализуется при максимальной величине коэффициента обратной связи, сохраняющей режим устойчивой генерации и обеспечивающей одновременное существование нескольких мод внешнего резонатора. Доля мощности боковых мод имеет минимум в зависимости от времени запаздывания, что соответствует локальному максимальному коэффициенту отражения внешнего резонатора на диаграмме устойчивости.

Библиографические ссылки

1. An experimental study on stable single-frequency semiconductor laser with external cavity / R. Hui [et al.] // IEEE Photon. Technol. Lett. 1989. Vol. 1, No 9. С. 255–257.
2. Сравнительный анализ частотных и шумовых характеристик лазерных диодов с резонатором Фабри–Перо и с распределенной обратной связью в режиме внешней оптической синхронизации / А. А. Афоненко [и др.] // Квантовая электроника. 2015. Т. 45, № 11. С. 993–999.
3. Афоненко А. А., Манак И. С. Кинетическая теория полупроводниковых инжекционных лазеров. Мн.: Белгосуниверситет, 1998. 69 с.