

# Экспериментальное исследование низкочастотных амплитудных шумов лазерного диода с волоконной брэгговской решеткой

В.С.Жолнеров, А.В.Иванов, В.Д.Курносков, К.В.Курносков, В.И.Романцевич, Р.В.Чернов

*Исследованы амплитудные шумы лазерного диода с волоконной брэгговской решеткой. Показано, что разрывы на шумовых характеристиках коррелируют с разрывами на его ватт-амперных и спектральных характеристиках, при этом шумовые характеристики источника накачки подобных разрывов не имеют. Максимальный уровень шумов наблюдается в области токов накачки, соответствующей одновременной генерации двух продольных мод излучения.*

**Ключевые слова:** одночастотный лазерный диод, волоконная брэгговская решетка, шумы излучения.

## 1. Введение

Исследованию низкочастотных амплитудных шумов посвящено большое количество работ (см., напр., монографии [1, 2] и ссылки в них), что говорит о важности проведения этих исследований для улучшения характеристик разрабатываемых электронных приборов. Для лазерных диодов (ЛД) шумы в высокочастотной области спектра (0.1–10 ГГц) хорошо изучены, причем между теорией и экспериментом нет серьезных расхождений [3]. В низкочастотной (НЧ) области (до частот  $f = 10^5$ – $10^6$  Гц) спектральная плотность флуктуаций интенсивности излучения имеет фликкерную зависимость типа  $1/f$ . Существующая теория не дает описания шумовых характеристик ЛД в этом диапазоне частот, а результаты экспериментальных работ иногда оказываются противоречивыми. В работе [4] сообщается о корреляции низкочастотных шумов интенсивности и флуктуаций тока накачки. Вместе с тем эксперименты, описанные в [5], корреляции между этими величинами не выявили.

В работе [6] отмечена взаимосвязь между НЧ флуктуациями интенсивности излучения и флуктуациями напряжения в ЛД. Изменяя сопротивление в цепи питания лазера, авторы установили, что трансформации флуктуаций тока накачки в флуктуации интенсивности не происходит. В [7] исследовано влияние технических шумов тока накачки ЛД на низкочастотный ( $10$ – $10^5$  Гц) спектр флуктуаций его излучения и сделан вывод, что шумовые характеристики излучателей в этом диапазоне частот определяются не техническими источниками нестабильности, а квантовыми причинами, связанными с динамикой самого лазера.

Амплитудные шумы, возникающие за счет биения мод в одночастотном инжекционном лазере, исследованы в [8]. В работе [9] сделан вывод о том, что уровень флуктуаций мощности зависит от переключений мод в ЛД. Показано, что  $1/f$ -компонента шума связана с переходами из «спокойного» режима генерации в режим частого переключения мод. При этом возрастает также и компонента белого шума, а закон распределения амплитуды флуктуаций становится отличным от нормального.

В настоящей работе исследованы низкочастотные амплитудные шумы одночастотного лазерного диода с волоконной брэгговской решеткой (ВБР), предназначенного для накачки и детектирования эталонного квантового перехода атомов цезия в квантовых стандартах частоты [10–13].

## 2. Эксперимент

Для изготовления лазеров была выращена гетероструктура в системе AlGaAs/GaAs с одной квантовой ямой толщиной 9 нм и волноведущими слоями толщиной по 120 нм каждый. Из этой гетероструктуры формировался активный элемент с шириной полоскового контакта 2.5–3 мкм и длиной резонатора 600 мкм. На одну из граней резонатора напылялось защитное оптическое покрытие, на другую – просветляющее покрытие с коэффициентом отражения не более 0.5%. Лазерный диод напаялся на контактную пластину активной областью вверх. После этого осуществлялась юстировка и фиксация одномодового волокна с брэгговской решеткой. Диод и решетка устанавливались на два отдельных термоэлектрических охладителя (ТЭО), с помощью одного из них осуществлялась стабилизация температуры контактной пластины с напаянным лазерным диодом, а с помощью другого – стабилизация температуры решетки. Двухлинзовый просветленный ( $R < 0.5\%$ ) микрообъектив формировал квазипараллельный пучок излучения.

Схема установки показана на рис.1. Шумовые характеристики измерялись с помощью селективного микровольтметра и фотоприемного устройства (фотодиод ФД-24К). Нагрузкой фотодиода являлось сопротивление  $R_2 = 1$  кОм. К выходным клеммам источника питания лазера с помощью ключа К подключалась емкость  $C = 3400$  мкФ

В.С.Жолнеров. ОАО «РИРВ», Россия, 191124 С.-Петербург, пл. Растрелли, 2; e-mail: zholnerov@mail.ru

А.В.Иванов, В.Д.Курносков, К.В.Курносков, В.И.Романцевич, Р.В.Чернов. ОАО «НИИ "Полус" им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп.1; e-mail: mail@dilas.ru, webeks@mail.ru

Поступила в редакцию 11 февраля 2013 г., после доработки – 22 марта 2013 г.

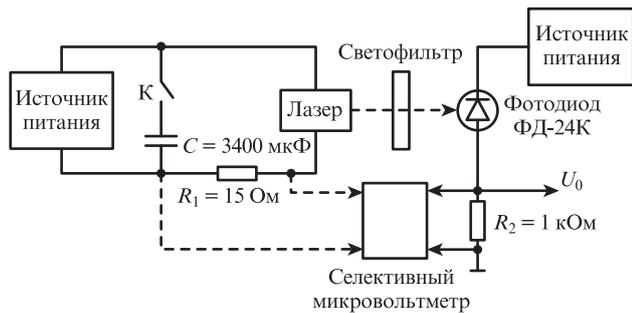


Рис.1. Схема установки для измерения шумовых характеристик и длины волны излучения. При измерении последней использовался анализатор спектра (на рисунке не показан), который устанавливался вместо фотоприемника.

для уменьшения уровня шумов. Интенсивность шумов излучения измерялась селективным микровольтметром, а значения постоянного напряжения  $U_0$ , пропорционального выходной мощности излучения ЛД с ВБР, на сопротивлении  $R_2 = 1$  кОм – вольтметром. Шумы источника питания измерялись селективным микровольтметром на сопротивлении  $R_1 = 15$  Ом. Для определения длины волны излучения использовался оптический анализатор спектра (на рис.1 не показан).

Шумовые характеристики ЛД с ВБР при изменении тока накачки снимались на фиксированных частотах 0.167, 1 и 60 кГц. Частота 0.167 кГц выбрана из условия минимального влияния сети (частоты 50 Гц и ее гармоник). Селективный микровольтметр калибровался с помощью генератора синусоидальных колебаний, определялась его полоса пропускания  $\Delta f$  по уровню 0.7 на указанных частотах.

Для работы на линейном участке фотоприемного устройства применялся светофильтр; светофильтр и фотодиод наклонялись под определенным углом относительно светового пучка ЛД во избежание обратного отражения излучения в ЛД.

Относительная интенсивность шума излучения ЛД определялась по формуле

$$RIN = 20 \lg \left( \frac{U_{noise} / \sqrt{\Delta f}}{U_0} \right), \tag{1}$$

где  $U_{noise}$  – напряжение шума, измеренное селективным микровольтметром на сопротивлении  $R_2 = 1$  кОм фотодиода;  $U_0$  – постоянное напряжение, измеренное вольтметром на этом же сопротивлении. Относительная интенсивность шума источника накачки также определялась по формуле (1), но в ней  $U_{noise}$  и  $U_0$  – напряжения, измеренные на сопротивлении  $R_1$  селективным микровольтметром и вольтметром соответственно.

В настоящей работе использовался источник питания Pilot-4DC [14], разработанный для накачки светодиодов и лазерных диодов, в котором предусмотрены специальные меры по защите ЛД от бросков напряжения сети питания, а само напряжение на ЛД подается только после выхода ТЭО на стационарный режим. Точность поддержания температуры не хуже  $\pm 0.1$  °С.

### 3. Результаты измерений

На рис.2,а для частоты  $f = 60$  кГц при выключенной емкости  $C$  показаны измеренные значения RIN ЛД и источника накачки (кривые 1 и 2), а также зависимость напря-

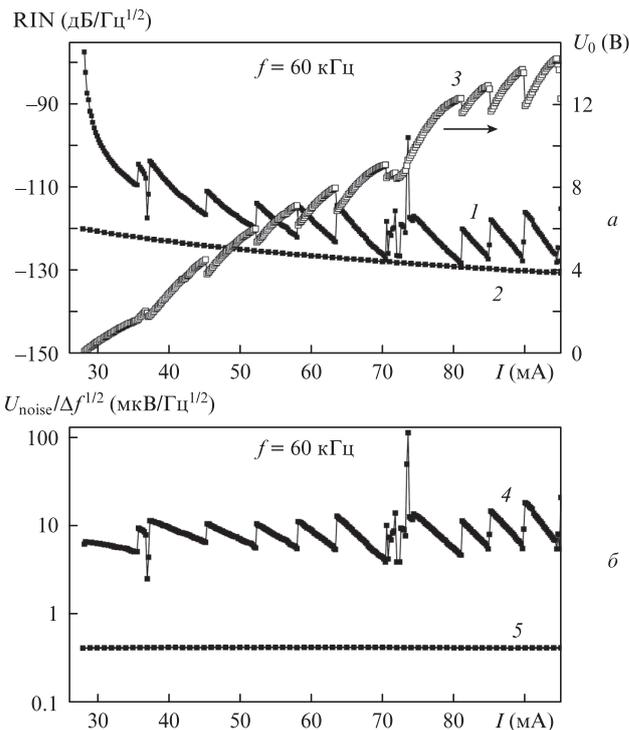


Рис.2. Зависимости относительной интенсивности флуктуаций напряжения на ЛД ( $I$ ) и относительной интенсивности шумов источника накачки (2), напряжения  $U_0$  на сопротивлении 1 кОм фотоприемника (3) (а), а также спектральной плотности флуктуаций напряжения на ЛД (4) и спектральной плотности шумов источника накачки (5) (б) от тока накачки лазера для  $f = 60$  кГц при выключенной емкости  $C$ .

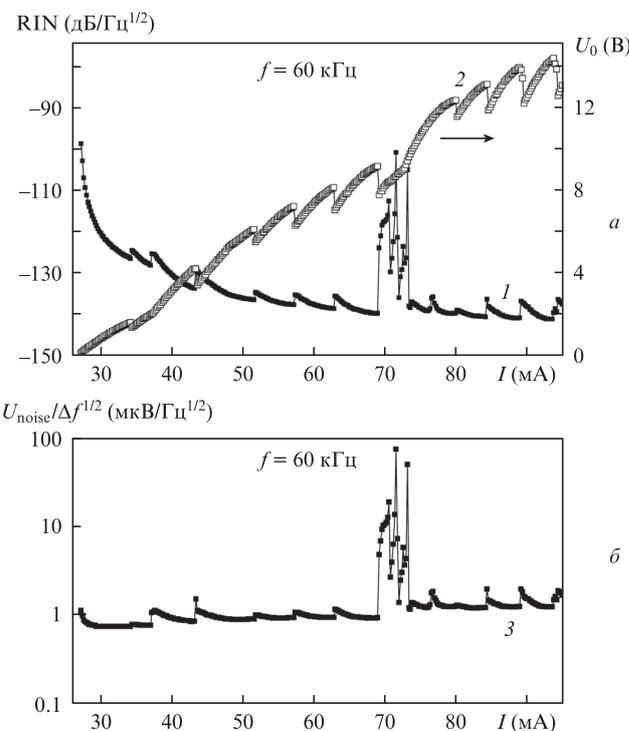


Рис.3. Зависимости относительной флуктуации напряжения на ЛД ( $I$ ) и напряжения  $U_0$  на сопротивлении 1 кОм фотоприемника (2) (а) и спектральной плотности напряжения на ЛД (3) (б) от тока накачки лазера для  $f = 60$  кГц при подключенной емкости  $C$ .

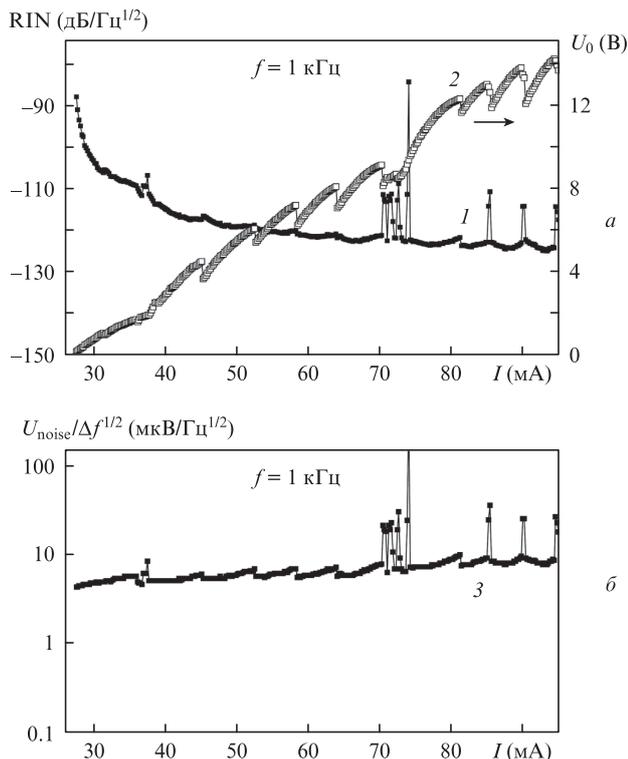


Рис.4. То же, что и на рис.3, для частоты 1 кГц.

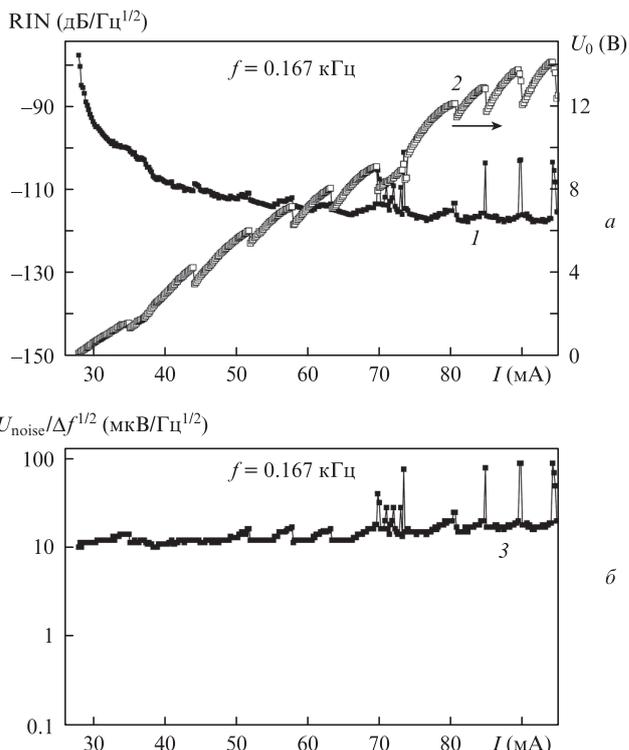


Рис.5. То же, что и на рис.3, для частоты 0.167 кГц.

жения  $U_0$ , измеренная на сопротивлении  $R_2 = 1$  кОм (кривая 3), при различных токах накачки. На рис.2,б представлены спектральная плотность флуктуаций напряжения, пропорциональная спектральной плотности флуктуаций мощности излучения и измеренная на сопротивлении  $R_2$  (кривая 4), а также спектральная плотность шумов источника накачки, измеренная на сопротивлении  $R_1 = 15$  Ом (кривая 5). Видно, что шумы ЛД более чем в 10 раз превышают шумы источника накачки (кривые 4 и 5 на рис.2). На приведенных графиках значения  $U_{noise}$  и  $U_0$ , снимаемые с сопротивления  $R_2$ , умножены на поправочный коэффициент, учитывающий ослабление, вносимое светофильтром.

Подключение емкости  $C$  параллельно выходным клеммам источника накачки (рис.1) значительно улучшает шумовые характеристики ЛД (рис.3). Из сравнения кривых 1 на рис.2 и 3 видно существенное уменьшение относительной интенсивности шума после подключения емкости. Так, при токе накачки 60 мА и  $f = 60$  кГц относительная интенсивность шума без подключенной емкости (рис.2) составляет  $-118$  дБ/Гц<sup>1/2</sup>, а с подключенной емкостью (рис.3) равна  $-138$  дБ/Гц<sup>1/2</sup>.

Результаты измерения шумов с подключенной емкостью на частотах  $f = 1$  и  $0.167$  кГц представлены на рис.4 и 5. Сравнение кривых 1 и 3 на рис.3–5 показывает, что уровень шумов растет при уменьшении частоты. В диапазоне токов накачки 80–95 мА начинается сильный (по сравнению с диапазоном токов 30–70 мА) рост шумов в точках переключения излучения по модам внешнего резонатора.

На рис.6 приведены зависимости длины волны (кривая 1) и мощности излучения (кривая 2) ЛД с ВБР от тока накачки. С помощью оптического анализатора спектра установлено, что в диапазоне токов накачки 70–73 мА происходит переключение излучения с одной моды на другую. Также возможна одновременная генерация двух мод с приблизительно равными амплитудами при изменении тока накачки.

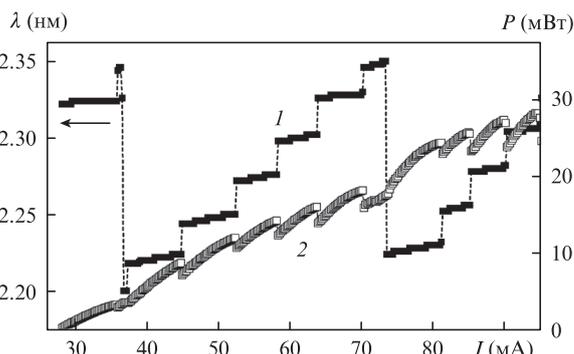


Рис.6. Зависимость длины волны (1) и мощности излучения (2) ЛД от тока накачки.

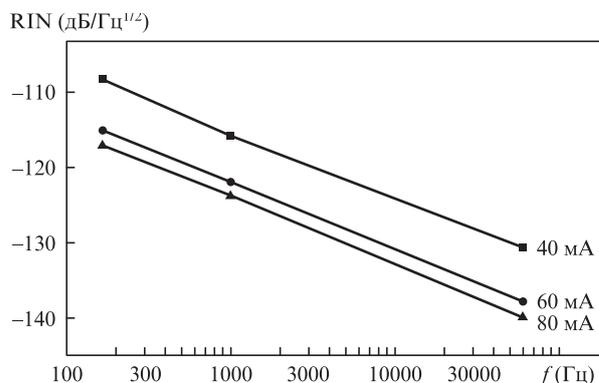


Рис.7. Зависимости относительной флуктуации интенсивности излучения от частоты для токов накачки 40, 60 и 80 мА.

На рис.7 показаны зависимости RIN от частоты для токов накачки 40, 60 и 80 мА (использованы данные, представленные кривыми 3 на рис.3–5). Видно, что экспериментальные точки удовлетворительно ложатся на прямую линию.

#### 4. Обсуждение полученных результатов и выводы

В работе [13] теоретически и экспериментально показано, что разрывы на ватт-амперной характеристике (ВтАХ) коррелируют с разрывами на спектральной характеристике (при переключении излучения как по модам внешнего резонатора, так и по модам ЛД). В настоящей работе мы показали, что с разрывами на ВтАХ коррелируют и шумовые характеристики (кривые 1 и 4 на рис.2 и кривые 1 и 3 на рис.3). При этом наиболее сильные шумы наблюдаются в области токов накачки, соответствующих переключению излучения по модам ЛД при токах накачки 70–73 мА (рис.6).

Установлено, что аномально большой уровень шумов в диапазоне токов накачки 70–73 мА связан с многомодовым (две продольные моды) режимом генерации излучения. В диапазонах токов накачки 30–70 и 73–95 мА наблюдается одномодовый режим генерации.

Несмотря на разрывы на ВтАХ и шумовых кривых (1, 3, 4 на рис.2), шумовые характеристики источника накачки разрывов не имеют (кривые 2, 5 на рис.2).

Сравнение кривых 1 на рис.2 и 3 показывает, что введение в схему емкости резко уменьшает шумы ЛД. Так, при токе  $I = 60$  мА значение RIN после подключения емкости уменьшилось приблизительно на 20 дБ. Шумы источника накачки (кривая 5 на рис.2) после подключения емкости уменьшались более чем на порядок и определялись шумами регистрирующей аппаратуры. Таким образом, уменьшение шумов источника накачки приводит к уменьшению шумов ЛД. В отличие от работы [7] показано, что шумы ЛД определяются не только квантовыми эффектами, связанными с динамикой самого лазера, но и техническими источниками нестабильности.

Из анализа кривых 1 и 3 на рис.3–5 следует, что с уменьшением частоты  $f$  и увеличением тока накачки уровень шумов возрастает. Также сильно растут шумы и в точках переключения ЛД по модам внешнего резонатора в диапазоне токов накачки 80–95 мА при изменении  $f$  с 60 кГц (рис.3) до 0.167 кГц (рис.5).

В диапазоне частот 0.167–60 кГц относительные флуктуации напряжения, пропорциональные спектральной плотности флуктуаций мощности излучения, имеют фликкерную зависимость (рис.7).

1. Букингем М. *Шумы в электронных приборах и системах* (М.: Мир, 1986).
2. Жигальский Г.П. *Флуктуации и шумы в электронных твердотельных приборах* (М.: Физматлит, 2012).
3. Petermann K. *Laser diode modulation and noise* (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988).
4. Бессонов Ю.Л., Корнилова Н.Б. *Квантовая электроника*, **12**, 2370 (1985).
5. Dendridge A., Taylor H. *IEEE J. Quantum Electron.*, **18**, 1738 (1982).
6. Геликонов В.М., Миронов Ю.М., Ханин Я.И. *Квантовая электроника*, **15**, 1999 (1988).
7. Маругин А.В., Харчев А.В. *ЖТФ*, **57**, 2380 (1987).
8. Bogatov A.P., Eliseev P.G., Kobildzhanov O.A., Madgazin V.R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **23**, 1064 (1987).
9. Богатов А.П., Дракин А.Е., Плисюк С.А. и др. *Квантовая электроника*, **32**, 809 (2002).
10. Журавлева О.В., Иванов А.В., Леонович А.И. и др. *Квантовая электроника*, **36**, 741 (2006).
11. Журавлева О.В., Иванов А.В., Курносов В.Д. и др. *Квантовая электроника*, **38**, 319 (2008).
12. Иванов А.В., Курносов В.Д., Курносов К.В. и др. *Квантовая электроника*, **41**, 692 (2011).
13. Жолнеров В.С., Иванов А.В., Курносов В.Д. и др. *ЖТФ*, **82**, 63 (2012).
14. <http://www.superlumdiodes.com>