

Исследование спектров излучения дискового полупроводникового лазера с длиной волны 1320 нм и его второй гармоники

К.С.Гочелашвили, С.И.Державин, О.Н.Евдокимова, И.О.Золотовский, С.В.Подмазов

Выполнены экспериментальные исследования спектральных характеристик излучения вблизи $\lambda = 1320$ нм дискового полупроводникового лазера с внешним резонатором и оптической накачкой. Получена внутрирезонаторная генерация второй гармоники с использованием нелинейного кристалла LBO. Выходная мощность излучения на длине волны 660 нм в непрерывном режиме составила 620 мВт, пиковая мощность в импульсном режиме – 795 мВт.

Ключевые слова: полупроводниковый дисковый лазер, генерация второй гармоники, вертикально-излучающие лазеры с внешним резонатором, оптическая накачка.

1. Введение

Хотя с момента открытия русскими учеными возможности получения лазерной генерации на полупроводниковых структурах прошло немногим более полувека [1], сегодня полупроводниковые лазеры используются уже практически во всех сферах человеческой деятельности.

За последние двадцать лет дисковые полупроводниковые лазеры (ДПЛ), известные также как вертикально излучающие полупроводниковые лазеры [2, 3], начали широко использоваться в исследованиях, связанных с созданием полупроводниковых лазеров большой мощности с высоким качеством излучения. Симметрия выходного пучка ДПЛ, превосходящего по качеству пучки полупроводниковых лазеров планарно-волноводной структуры [4], отсутствие тепловой линзы из-за малой толщины диска активного слоя – вот отличительные черты этого класса полупроводниковых лазеров. Вертикально излучающие полупроводниковые лазеры могут отличаться друг от друга типом накачки – оптической [5], электронной [6] или инжекционной (токовой) [7], наличием внешнего резонатора [4–5] или его отсутствием [7]. ДПЛ с внешним резонатором и оптической накачкой сочетают в себе большую мощность диодных полупроводниковых лазеров планарной структуры и высокое качество излучения ДПЛ без внешнего резонатора. Именно поэтому на сегодняшний день они являются лидерами по выходной мощности и качеству излучения с одного элемента [8]. Наличие внешнего резонатора позволяет интегрировать в оптическую схему различные элементы: нелинейные кристаллы,

оптические фильтры, насыщающиеся поглотители. Как и все полупроводниковые лазеры, ДПЛ могут излучать в широком диапазоне длин волн за счет изменения материала активного элемента, чего невозможно достичь при использовании твердотельных и других типов лазеров. Кроме того, диапазон длин волн излучения ДПЛ с внешним резонатором и оптической накачкой можно увеличить путем включения в резонатор нелинейных кристаллов. На сегодняшний день область длин волн генерации вертикально излучающих лазеров с оптической накачкой и внешним резонатором простирается от 0.244 до 5 мкм [9–10].

Диапазон применения ДПЛ с оптической накачкой очень широк [11]: это квантовая криптография, проточная цитометрия, медицинская диагностика и терапия, изобразительные искусства, судебная экспертиза, метрология. Дисковые лазеры используются также для оптической накачки, например, лазеров на керамике [12].

Основной целью наших исследований было изучение спектральных характеристик ДПЛ с оптической накачкой и внешним резонатором с длиной волны генерации 1320 нм в импульсном режиме. Еще одна цель состояла в генерации второй гармоники излучения данного дискового лазера с мощностью на уровне в несколько ватт как в непрерывном, так и в импульсном режимах. Эта работа является первым этапом исследований по созданию источника излучения для квантовой криптографии и для лазерной селективной фотоионизации изотопов. Основные требования к лазеру для разделения изотопов – это мощность на уровне в несколько ватт как в импульсном, так и в непрерывном режимах (в зависимости от схемы разделения), стабильность и узкополосность спектра излучения. ДПЛ с внешним резонатором и оптической накачкой идеально удовлетворяет этим требованиям, т.к. обеспечивает необходимую мощность излучения в широком диапазоне длин волн, а наличие внешнего резонатора позволяет использовать эталоны для достижения малой ширины спектральной линии.

2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки для измерения спектральных характеристик дискового лазера в импульс-

К.С.Гочелашвили, С.И.Державин, О.Н.Евдокимова. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: knst@kapella.gpi.ru, derzh@kapella.gpi.ru
И.О.Золотовский. Научно-исследовательский технологический институт им. С.М.Капицы, Ульяновский государственный университет, Россия, 432017 Ульяновск, Университетская наб., 1; e-mail: rafzol.14@mail.ru

С.В.Подмазов. Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: sergei.podmazov@mail.ru

Поступила в редакцию 20 октября 2015 г., после доработки – 24 декабря 2015 г.

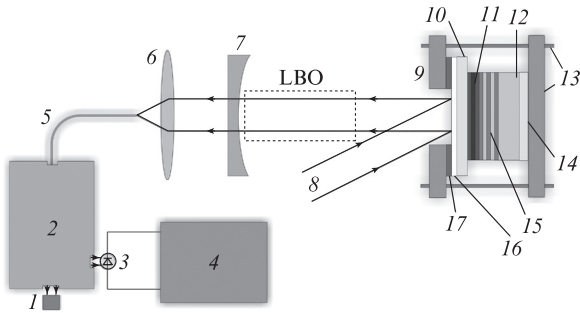


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – камера; 2 – монохроматор; 3 – фотодиод; 4 – осциллограф; 5 – световод; 6 – фокусирующая линза; 7 – выходное зеркало ($R = 100$ мм); 8 – накачка ($\lambda = 960$ нм); 9 – медный теплоотвод; 10 – алмазный теплоотвод; 11 – активная среда; 12 – подложка; 13 – зажим и крепление; 14 – тefлоновая прокладка; 15 – брэгговское зеркало; 16 – антиотражающее покрытие; 17 – индиевая прокладка.

ном режиме представлена на рис.1. На этом же рисунке схематически изображено устройство дискового полупроводникового чипа.

Активная среда дискового полупроводникового чипа состояла из пяти квантовых ям AlGaInAs/InP, выращенных с помощью осаждения из газовой фазы при низком давлении. Распределенное брэгговское зеркало состояло из 35 пар четвертьволновых слоев AlGaAs/GaAs, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Активная среда и зеркало были соединены с помощью технологии «сплавления разнородных структур» (wafer fusion technology) [13]. К активной среде посредством капиллярной пайки [14] прикреплялась алмазная пластинка, служащая теплоотводом, на поверхность которой было нанесено просветляющее покрытие для основной длины волны генерации. Одной стороной готовая конструкция прижималась к медному теплоотводу через индиевую фольгу, с другой ее стороны находились тefлоновая прокладка и алюминиевый зажим. Температурная стабилизация лазера осуществлялась с помощью водяного охлаждения через медный микроканальный теплоотвод. Температура воды поддерживалась равной 19°C .

Для оптической накачки на длине волны 960 нм использовался лазерный диодный модуль с волоконным выводом излучения мощностью 24 Вт. С помощью системы линз излучение накачки фокусировалось на дисковый чип в пятно диаметром 300 мкм. Внешний резонатор длиной 50 мм был образован внешним сферическим зеркалом с радиусом кривизны 100 мм, имеющим пропускание 0.12% на длине волны 1320 нм и 77.3% на длине волны второй гармоники, и распределенным брэгговским зеркалом на полупроводниковой структуре.

Спектральные характеристики излучения исследовались с помощью монохроматора МДР 23. На одном выходе монохроматора располагался германиевый фотодиод, регистрирующий импульсный спектр излучения вблизи длины волны 1320 нм. На другом выходе находилась камера MINTRON MS-168P, с помощью которой исследовался спектр генерации второй гармоники. Средняя выходная мощность излучения лазера измерялась калориметром COHERENT EMP-2000.

Генерация второй гармоники была получена с помощью нелинейного кристалла LBO с размерами $4 \times 4 \times 15$ мм в положении критического синхронизма первого типа ($\theta =$

90° , $\varphi = 0^\circ$). На рис.1 пунктиром показано положение кристалла в резонаторе. На торцы кристалла LBO были нанесены просветляющие покрытия для длин волн 1320 и 660 нм.

3. Результаты экспериментов

На рис.2 представлены спектры генерации полупроводникового дискового лазера на основной длине волны для мощностей лазера накачки 14.1 и 21.2 Вт. При увеличении мощности накачки спектр генерации уширяется и смещается в длинноволновую область из-за роста температуры активного элемента, что характерно для любого полупроводникового лазера. В спектре наблюдаются провалы с периодом 1.1 нм, за которые ответственна алмазная пластинка, являющаяся паразитным эталоном ФП даже несмотря на наличие на ней просветляющего покрытия.

Спектральные характеристики излучения исследовались в импульсном режиме при следующих параметрах оптической накачки: длительность импульса 5 мс, частота следования 15 Гц. На рис.3 представлен спектр генерации дискового лазера в течение всей длительности импульса. За начало отсчета времени принят момент начала генерации лазера. Из полученных данных следует, что

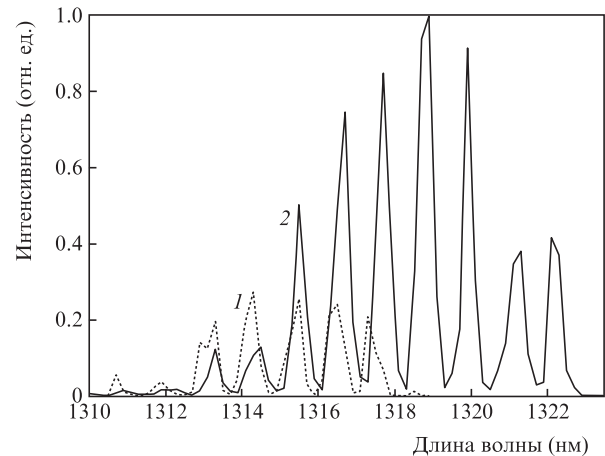


Рис.2. Спектры генерации дискового лазера при мощности накачки 14.1 (1) и 21.2 Вт (2).

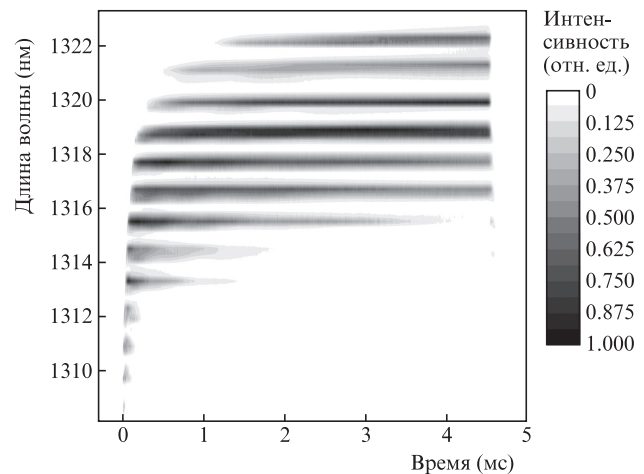


Рис.3. Временные зависимости спектра генерации лазера при импульсной накачке.

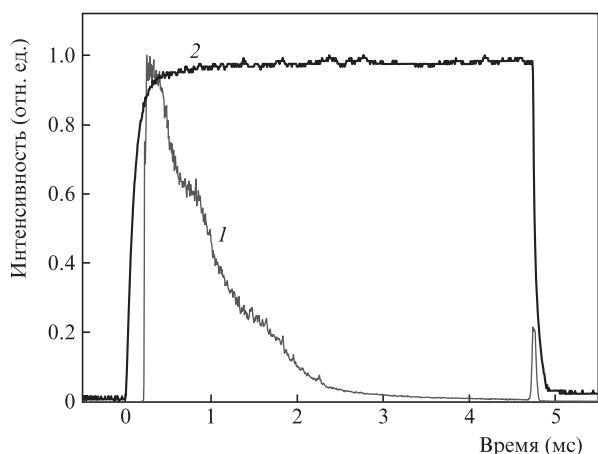


Рис.4. Импульсы генерации лазера на длине волны 1314.3 нм (1) и излучения накачки (2).

за первые 3.5 мс устанавливается тепловое равновесие активного элемента. После этого спектр остается неизменным до конца импульса накачки. В области длин волн 1314.3 и 1315.5 нм в конце импульса видны отчетливые пики. Более детально этот факт представлен на рис.4, где одновременно показаны импульсы накачки и генерации на длине волны 1314.3 нм. Пик возникает в середине заднего фронта импульса накачки. Также следует отметить, что спектральные линии в диапазоне 1316–1324 нм исчезают в самом начале заднего фронта импульса накачки, т.е. до возникновения пика. Подобное поведение спектра говорит о том, что за время спада импульса накачки активная среда успевает достаточно остыть для того, чтобы спектр генерации сместился в коротковолновую область. При этом мощности накачки все еще хватает для возникновения генерации.

Пиковая выходная мощность лазера в импульсном режиме на длине волны 1320 нм при пиковой мощности накачки 24 Вт составила 860 мВт. В непрерывном режиме на этой же длине волны при средней мощности накачки 24 Вт выходная мощность составила 720 мВт. Различие мощностей обусловлено недостаточным отводом тепла от активной среды.

На рис.5 представлен спектр генерации второй гармоники ДПЛ. Периодичность осцилляций в спектре сохранилась. Из-за паразитной засветки камеры отдельные пики в спектре не удалось разрешить полностью.

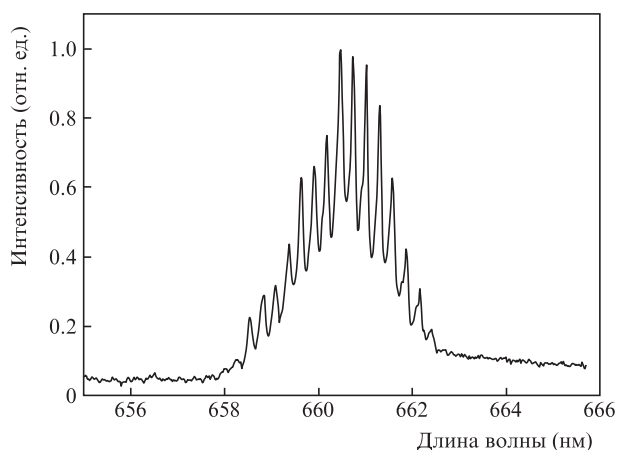


Рис.5. Спектр генерации второй гармоники ДПЛ.

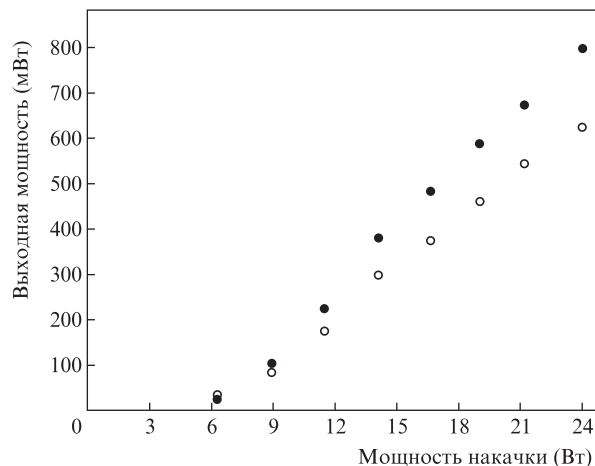


Рис.6. Зависимости выходной мощности излучения второй гармоники ДПЛ ($\lambda = 660$ нм) от мощности накачки в импульсном (●) и непрерывном (○) режимах.

Зависимости выходной мощности излучения второй гармоники от мощности накачки в импульсном и непрерывном режимах приведены на рис.6. Максимальная достигнутая мощность в непрерывном режиме составила 620 мВт. При использовании выходного зеркала, прощелоченного на длину волны 660 нм, мощность увеличивается до 770 мВт. Это мощность, излучаемая кристаллом LBO в одном направлении, поэтому, если нанести на одну грань кристалла LBO покрытие, полностью отражающее излучение второй гармоники (660 нм) и прозрачное для излучения ДПЛ (1320 нм), то можно говорить как минимум о 1.5 Вт выходной мощности через одну грань кристалла.

Таким образом, исследование спектральных характеристик дискового полупроводникового лазера с оптической накачкой и внешним резонатором в импульсном режиме выявило нестабильность спектра в течение импульса. Наличие алмазной пластинки (теплоотвода) приводит к паразитному эталонному эффекту, что необходимо учитывать при дальнейших попытках получения узкополосной генерации. Что касается второй цели исследований, то была получена генерация второй гармоники с использованием внутррезонаторного преобразования в нелинейном кристалле LBO. Выходная мощность излучения на длине волны 660 нм в непрерывном режиме составила 620 мВт, пиковая мощность в импульсном режиме – 795 мВт.

Институт общей физики им. А.М.Прохорова благодарит РНФ (грант №14-12-01338) за поддержку работ по созданию инфраструктуры для оптической накачки, преобразования во вторую гармонику и метрологии ДПЛ. Ульяновский государственный университет благодарит Министерство образования и науки РФ за поддержку работ по созданию конструкции ДПЛ (в рамках проекта №14.Z50.31.0015). Авторы выражают благодарность О.Г.Охотникову за предоставление полупроводниковой структуры дискового лазера.

1. Басов Н.Г., Крохин О.Н., Попов Ю.М. *ЖЭТФ*, **40**, 4 (1961).
2. Басов Н.Г. *УФН*, **85**, 4 (1965).
3. Okhotnikov O.G. (ed.) *Semiconductor Disk Lasers: Physics and Technology* (New York: John Wiley & Sons, 2010).
4. Lindberg H., Larsson A., Strassner M. *Opt. Lett.*, **30**, 17 (2005).
5. Alford W.J., Raymond T.D., Allerman A.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **19**, 4 (2002).

6. Козловский В.И., Кузнецов П.И., Свиридов Д.Е., Якушева Г.Г. *Квантовая электроника*, **42**, 7 (2012).
7. Zhou D., Seurin J.F., Xu G., Zhao P., Xu B., Chen T., Leeuwen R.V., Matheussen J., Wang Q., Ghosh C. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **9381**, 93810B (2015).
8. Zhang F., Heinen B., Wichmann M., Möller C., Kunert B., Rahimi-Iman A., Stolz W., Koch M. *Opt. Express*, **22**, 11 (2014).
9. Kaneda Y., Yarborough J.M., Li L., Peyghambarian N., Fan L., Hassenius C., Fallahi M., Hader J., Moloney J.V., Honda Y., Nishioka M., Shimizu Y., Miyazono K., Shimatani H., Yoshimura M., Mori Y., Kitaoka Y., Sasaki T. *Opt. Lett.*, **33**, 15 (2008).
10. Rahim M., Felder F., Fill M., Zogg H. *Opt. Lett.*, **33**, 24 (2008).
11. Kannengiesser C., Ostroumov V., Pfeufer V., Seelert W., Simon C., von Elm R., Zuck A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7578**, 75780W (2010).
12. Saarinen E.J., Vasileva E., Antipov O., Penttinen J., Tavast M., Leinonen T., Okhotnikov O., in *Advanced Solid-State Lasers Congress*. Ed. by G.Huber, P.Moulton. *OSA Techn. Dig.* (online) (OSA, 2013, paper JTh2A.48).
13. Salomonsson F., Streubel K., Bentell J., Hammar M., Keiper D., Westphalen R., Piprek L., Sagalowicz L., Rudra A., Behrend J. *J. Appl. Phys.*, **83**, 2 (1998).
14. Liao Z.L. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 5 (2000).