

Влияние тепловых эффектов на свойства насыщающихся поглотителей в мощных полупроводниковых дисковых лазерах в режиме синхронизации мод

А.Рантамяки, Я.Люттикайнен, Я.Никкинен, О.Охотников

Продemonстрировано значительное влияние тепловых эффектов в насыщающемся поглотителе на работу мощного дискового лазера в режиме пассивной синхронизации мод. Поглотитель с эффективным теплоотводом позволяет получать генерацию ультракоротких импульсов с высокой частотой следования и большой средней мощностью.

Ключевые слова: насыщающийся поглотитель, полупроводниковый дисковый лазер, ультракороткие импульсы, синхронизация мод.

1. Введение

Ранее было показано, что полупроводниковые дисковые лазеры (ПДЛ) являются перспективными генераторами коротких оптических импульсов с частотами следования порядка и более десятков ГГц. Подобные лазеры могут применяться для оптической синхронизации, в системах связи и в фотонных переключателях [1]. Работа ПДЛ в режиме больших оптических мощностей требует эффективного отвода тепла от активной среды, который обычно осуществляется при использовании технологии «перевернутого кристалла» (flip-chip) для изготовления лазерной структуры либо за счет внутрирезонаторного теплоотвода. Обычно считается, что такой теплоотвод необходим только для активной среды, однако в ряде работ обсуждается также необходимость температурного контроля полупроводникового насыщающегося поглотителя (SESAM) [2, 3].

Поскольку отношение средней мощности к пиковой мощности импульса возрастает с увеличением частоты следования, то импульсные лазеры с частотами следования порядка нескольких ГГц обладают относительно высокой средней мощностью, что вызывает рост тепловой нагрузки на насыщающийся поглотитель [4, 5]. Нагрев влияет на параметры поглотителя посредством различных физических механизмов, в том числе связанных с температурными зависимостями ширины запрещенной зоны квантовых ям, плотности состояний, поглощения, плотности энергии насыщения и глубины модуляции [6, 7]. Более того, в отсутствие эффективного отвода тепла эффект тепловой линзы может серьезно повлиять на работу лазера. Этот особенно критично в резонаторах, работающих близко к пределу устойчивости, что характерно для ПДЛ в режиме синхронизации мод с высокой частотой следования импульсов [8–10].

Antti Rantamäki, Jari Lyytikäinen, J.Nikkinen, O.Okhotnikov. Optoelectronics Research Centre Tampere University of Technology, Korkeakoulunkatu 3, 33720 Tampere, Finland, e-mail: antti.rantamaki@tut.fi, jari.lyytikainen@tut.fi, jari.nikkinen@tut.fi, oleg.okhotnikov@tut.fi

Поступила в редакцию 29 апреля 2011 г.

Технология «перевернутого кристалла» позволяет обеспечить лучший отвод тепла от полупроводникового поглотителя [3]. При этой технологии изготовления поглотителя используется обратный порядок роста слоев полупроводникового материала по мере удаления от подложки. В отличие от внутрирезонаторного теплоотвода, она требует удаления подложки путем травления выращенной структуры, при этом сохраняется высокое качество поверхности образца и предотвращается ее загрязнение.

Внутрирезонаторный теплоотвод «сажается» с помощью оптического контакта непосредственно на поглощающий элемент, что сокращает расстояние между областью нагрева и теплоотводящей средой. У насыщающегося поглотителя, закрепленного методом «перевернутого кристалла», тепло из поглощающего слоя отводится через распределенный брэгговский отражатель (РБО) в подложку, что малоэффективно в случае низкой теплопроводности РБО. Также вероятно, что тепловая линза будет сильнее для «перевернутого кристалла», чем для внутрирезонаторного алмазного теплоотвода [11]. Другое ограничение, налагаемое технологией «перевернутого кристалла» при изготовлении SESAM, заключается в том, что она не позволяет использовать ионную бомбардировку образца (через подложку до ее удаления или через РБО) в масштабе полноразмерной структуры и требует действия также иных механизмов, таких как поверхностные состояния, для достижения быстрых времен релаксации насыщающегося поглотителя.

Использование материалов на основе квантовых точек (КТ) вместо широко распространенных квантовых ям (КЯ) позволяет создавать насыщающиеся поглотители с низкой плотностью энергии насыщения, что дает возможность использовать моды большего поперечного размера и, соответственно, уменьшить тепловую нагрузку на SESAM [12, 13]. Однако использование материалов на основе КТ затруднительно на длинах волн более 1.3 мкм, поэтому SESAM на основе КЯ являются основными кандидатами для применения в длинноволновых лазерах с синхронизацией мод [14, 15].

В настоящей работе продемонстрировано, что SESAM с эффективным отводом тепла позволяет значительно

увеличить мощность лазеров, работающих в режиме синхронизации мод. Показано, что чрезмерный разогрев поглотителя может значительно ухудшить качество оптических импульсов и снизить выходную мощность.

2. Структура активной среды и полупроводникового насыщающегося поглотителя

Эпитаксиальные структуры были выращены в непрерывном процессе методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Активная отражающая среда, имеющая периодическую резонансную структуру из десяти квантовых ям на основе GaInAs и PBO, который состоит из слоев GaAs/AlAs, образует поворотное зеркало резонатора, как показано на рис.1. Полупроводниковое насыщающееся зеркало, состоящее из двух КЯ на основе GaInAs, было спроектировано для антирезонансной работы его микрорезонатора на длине волны лазера. Плотность энергии насыщения полупроводникового зеркала составила 10 мкДж/см^2 , глубина модуляции – 2%, пассивные потери – 0.5%. Отвод тепла от активной среды и поглотителя был реализован с помощью оптического контакта с алмазными теплоотводами толщиной 300 мкм. Полученная конструкция помещалась между двумя медными пластинами с прокладкой из тонкой индийской фольги, служившей контактным слоем для обеспечения хороших теплопроводных и механических характеристик в местах крепления. Алмазные теплоотводы с углом клина 2° имели просветляющее покрытие для устранения отражений от поверхности. Температура активной среды и полупроводникового насыщающегося зеркала поддерживалась на уровне 15°C .

3. Экспериментальная часть

Изображенный на рис.1 V-образный резонатор состоит из активной отражающей среды, полупроводникового зеркала с насыщающимся поглощением и сферического выходного зеркала с радиусом кривизны 50 мм и коэффициентом отражения $R > 97.5\%$.



Рис.1. Схема дискового лазера с пассивной синхронизацией мод с накачкой под углом 25° по отношению к плоскости резонатора ПДЛ.

Активная среда накачивалась через алмазный теплоотвод под углом в 25° излучением лазерного диода с волоконным выходом на длине волны 808 нм. Диаметр пятна моды накачки на элементе активной среды составил 290 мкм, а диаметр поля моды на SESAM – 94 мкм. Конструкция лазерного резонатора обеспечивала необходимое перекрытие поля накачки и основной гауссовой моды.

4. Результаты

На рис.2 изображены зависимости средней выходной мощности и длительности импульса лазера от мощности излучения накачки. Видно, что с ростом мощности накачки длительность импульса дискового лазера с SESAM и внутрирезонаторным алмазным теплоотводом увеличивается [16]. В условиях эффективного отвода тепла от полупроводникового насыщающегося зеркала основными факторами, определяющими длительность оптического импульса, по всей видимости, являются нелинейные фазовые эффекты в полупроводниковой среде и дисперсия резонатора.

Расчетный вклад теплоотводящего алмаза в полную дисперсию резонатора за один проход составляет 40 фс^2 , и им можно пренебречь по сравнению с вкладом в дисперсию периодической резонансной активной среды [10]. На рис.3 приведены автокорреляция и оптический

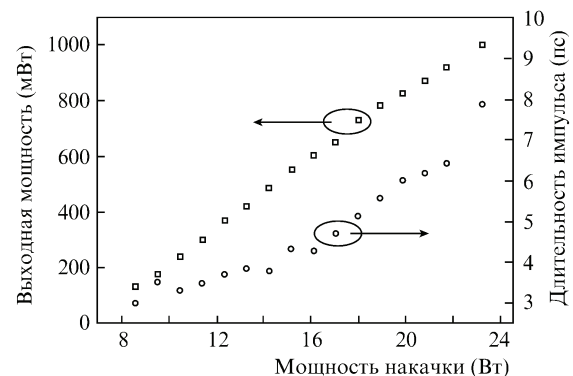


Рис.2. Зависимости средней выходной оптической мощности и длительности импульса (в приближении формы импульса функцией sech^2x) от мощности накачки для лазера с внутрирезонаторным алмазным теплоотводом, находящимся в оптическом контакте с SESAM.

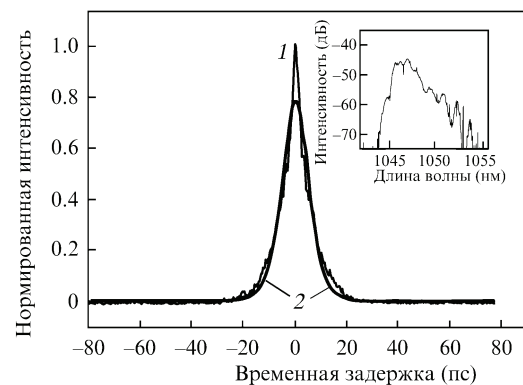


Рис.3. Автокорреляционная функция для импульсов с выходной средней мощностью 1 Вт (1) и функция sech^2x (2). Лазер содержит полупроводниковое насыщающееся зеркало, совмещенное с внутрирезонаторным алмазным теплоотводом. На вставке показан соответствующий оптический спектр импульсов.

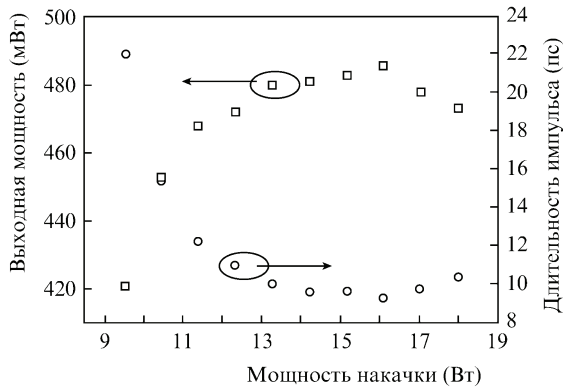


Рис.4. Зависимости средней выходной оптической мощности и длительности импульса (в приближении функцией sech^2x) от мощности излучения накачки для лазера без алмазного теплоотвода на полупроводниковом насыщающемся поглотителе.

спектр последовательности импульсов со средней мощностью 1 Вт. Частота следования импульсов составила 3.05 ГГц.

Радиочастотный спектр последовательности импульсов, измеренный с разрешением 3 кГц, состоит из основной частотной компоненты и ее гармоник с амплитудой, превышающей уровень шумов более чем на 60 дБ. Это свидетельствует о наличии стационарной, периодической последовательности импульсов, характерной для режима развитой синхронизации мод. Установлено, что неидеальность просветляющего покрытия алмаза, соединенного с SESAM, вызывает некоторые потери в резонаторе и ограничивает общую эффективность лазера.

Полупроводниковое насыщающееся зеркало было затем заменено на идентичное, полученное из той же полупроводниковой структуры, но собранное без теплоотводящего элемента. В этом случае тепловые эффекты в SESAM играют доминирующую роль, поскольку активная среда, содержащая эффективный теплоотвод, осталась без изменений. Экспериментальные результаты, приведенные на рис.4 и 5, были получены для резонатора с частотой следования импульсов 3.084 ГГц.

Основной механизм нагрева полупроводникового насыщающегося зеркала обусловлен пассивными потерями, а также потерями, связанными с насыщением поглощения [17]. Компьютерное моделирование показало, что локальный нагрев полупроводникового насыщающегося зеркала может создать в резонаторе тепловую

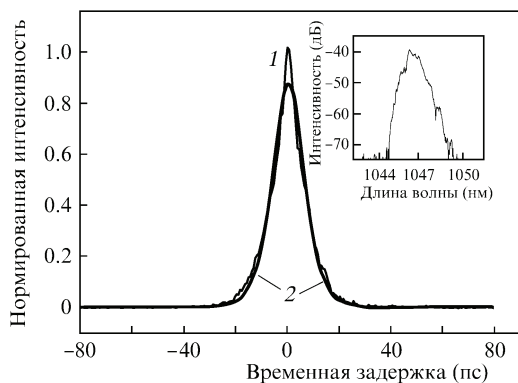


Рис.5. Автокорреляционная функция импульсов с выходной средней мощностью 485 мВт (1) и функция sech^2x (2) для лазера с полупроводниковым насыщающимся зеркалом без теплоотвода. На вставке показан соответствующий оптический спектр импульсов.

линзу (в дополнение к уже существующей в активной среде лазера). Это приводит к увеличению модового пятна на полупроводниковом зеркале и уменьшению размера моды на элементе активной среды. Результирующее уменьшение отношения размера моды на активной среде к размеру моды на полупроводниковом зеркале вызывает ухудшение качества синхронизации мод, зависящего от этого отношения, вплоть до срыва режима генерации коротких импульсов [17]. Сравнивая экспериментальные данные, приведенные на рис.2 и 4, можно отметить, что лазер без теплоотвода на SESAM имеет значительно меньшую выходную мощность и большую длительность импульса. Другой причиной, ухудшающей качество импульса, является увеличение энергии насыщения поглощения SESAM с ростом температуры из-за сдвига длины волны запрещенной зоны при разогреве в длинноволновую область [18]. Обусловленное этим фактором меньшее насыщение поглощения увеличивает потери поглотителя, вызывая тем самым еще более интенсивный его нагрев [3]. Полупроводниковое насыщающееся зеркало без теплоотвода в таком случае работает в режиме слабого насыщения, и стационарный режим синхронизации мод возникает при большей выходной мощности (420 мВт), чем в случае полупроводникового зеркала, оснащенного алмазным теплоотводом. Экспериментальные данные, представленные на рис.2 и 4, подтверждают этот факт. Следует заметить, что SESAM с низким уровнем насыщения поглощения имеет более высокие пассивные потери, что приводит к дополнительному его разогреву. С ростом выходной мощности насыщение поглощения становится все сильнее, приводя к возрастанию эффективной глубины модуляции. Это является причиной обратной зависимости оптической мощности и длительности импульса от мощности накачки (рис.4).

5. Заключение

В настоящей работе показано, что управление тепловыми эффектами в насыщающемся поглотителе оказывает значительное влияние на эффективность работы и качество импульсов лазеров в режиме пассивной синхронизации мод. Экспериментальные результаты свидетельствуют, что ухудшение рабочих характеристик импульсного лазера с увеличением оптической мощности связано с нагревом полупроводникового насыщающегося зеркала, который может приводить к росту потерь в резонаторе и неполному насыщению поглотителя. Эти эффекты становятся все более важными при высоких частотах повторения, когда возросшая средняя мощность приводит к большей плотности оптической энергии и к сильной температурной нагрузке насыщающегося поглотителя.

1. *Semiconductor disk lasers, physics and technology*. Ed. by O.G.Okhotnikov (Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010, pp. 51–52, 216–218).
2. Burns D., Hetterich M., Ferguson A., Bente E., Dawson M., Davies J., Bland S. *J. Opt. Soc. Am. B*, **17** (6), 919 (2000).
3. Lorensen D., Unold H., Maas D., Aschwanden A., Grange R., Paschotta R., Ebling D., Gini E., Keller U. *Appl. Phys. B*, **79** (8), 927 (2004).
4. Massoubre D., Oudar J., O'Hare A., Gay M., Bramerie L., Simon J., Shen A., Decobert J. *J. Lightwave Technol.*, **24** (9), 3400 (2006).
5. Krainer L., Paschotta R., Lecomte S., Moser M., Weingarten K., Keller U. *IEEE J. Quantum Electron.*, **38** (10), 1331 (2002).

6. Savitski V., Burns D., Calvez S. *Opt. Express*, **17** (7), 5373 (2009).
7. Savitski V., Kemp A., Calvez S., Burns D. *IEEE J. Quantum Electron.*, **46** (11), 1650 (2010).
8. Aschwanden A., Lorenser D., Unold H., Paschotta R., Gini E., Keller U. *Opt. Lett.*, **30** (3), 272 (2005).
9. Aschwanden A., Lorenser D., Unold H., Paschotta R., Gini E., Keller U. *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 131102 (2005).
10. Hoogland S., Garnache A., Sagnes I., Roberts J., Tropper A. *IEEE Photon Technol. Lett.*, **17** (2), 267 (2005).
11. Lindberg H., Strassner M., Gerster E., Bengtsson J., Larsson A. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **11** (5), 1126 (2005).
12. Lorenser D., Maas D., Unold H., Keller U. *IEEE J. Quantum Electron.*, **42** (8), 838 (2006).
13. Südmeyer T., Wittwer V.J., Rudin B., Maas D., Hoffmann M., Sieber O.D., Barbarin Y., Golling M., Keller U. *Proc. 19th Int. Laser Phys. Workshop 2010 (LPHYS'10)* (Brazil, 5–9 July, 2010).
14. Rautiainen J., Lyytikäinen J., Toikkanen L., Nikkinen J., Sirbu A., Mereuta A., Caliman A., Kapon E., Okhotnikov O. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **22**, 748 (2010).
15. Saarinen E., Puustinen J., Sirbu A., Mereuta A., Caliman A., Kapon E., Okhotnikov O. *Opt. Lett.*, **34** (20), 3139 (2009).
16. Saarinen E., Herda R., Okhotnikov O. *J. Opt. Soc. Am. B*, **24** (11), 2784 (2007).
17. Paschotta R., Aus der Au J., Spühler G., Morier-Genoud F., Hövel R., Moser M., Erhard S., Karszewski M., Giesen A., Keller U. *Appl. Phys. B*, **70** (7), 25 (2000).
18. Grange R., Rutz A., Liverini V., Haiml M., Schön S., Keller U. *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 132103 (2005).