

07

Влияние эффекта Штарка на увеличение мощности в двухсекционных лазерах с квантовыми ямами в режиме модуляции добротности

© М.С. Буяло^{1,3}, И.М. Гаджиев^{1,3}, А.А. Усикова¹,
Ю.М. Задиранов¹, Н.Д. Ильинская¹, А.Е. Губенко²,
А.Ю. Егоров^{1,3,4}, Е.Л. Портной¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Innolume GmbH, 11 Konrad-Adenauer-Allee, Dortmund, 44263, Germany

³ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Россия

⁴ ООО „Коннектор Оптик“, 194292 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: mikhail.buyalo@gmail.com

Поступило в Редакцию 14 мая 2015 г.

Исследованы двухсекционные лазерные диоды с активной областью, содержащей три квантовые ямы, излучающие импульсы света в режимах пассивной модуляции добротности (ПМД). Показано, что смещение края поглощения вследствие эффекта Штарка приводит к коротковолновому сдвигу линии лазерной генерации и к двукратному увеличению мощности импульсов в режиме ПМД.

В настоящее время наблюдается значительный интерес к малогабаритным полупроводниковым источникам пикосекундных оптических импульсов. Помимо приложений, связанных с использованием таких источников для лазерных радаров, спектроскопии и изучением биологических процессов [1,2], генераторы коротких и мощных импульсов имеют потенциал для задач пикосекундной акустики [3]. Самой простой и хорошо разработанной конструкцией для излучения пикосекундных импульсов является двухсекционная конструкция лазера, с электрически изолированными секциями усилителя и насыщающегося поглотителя (НП) [4]. Необходимый уровень поглощения в секции поглотителя при этом достигается за счет эффекта Штарка. Такая конструкция лазера

позволяет осуществлять генерацию импульсов света либо в режиме пассивной синхронизации мод (ПСМ), либо пассивной модуляции добротности (ПМД), при этом возможна реализация обоих режимов на одном образце [5,6]. Несмотря на существенное количество работ, опубликованных по упомянутым режимам в двухсекционных лазерах на квантовых ямах (КЯ), вопрос о влиянии спектральных свойств поглотителя на режимы ПСМ и ПМД остается актуальным. Так, нами было показано, что из-за экситонного характера края зоны поглощения и эффекта сужения зон необходимо прикладывать значительное обратное смещение к НП для реализации режима ПСМ [7]. Были предложены способы уменьшения величины обратного смещения для достижения режима ПСМ: так, в лазерах с двумя асимметричными связанными КЯ возникающая туннельная связь между электронными уровнями КЯ ведет к дополнительной области существования ПСМ при малых обратных смещениях [8], однако эффект туннельной связи не оказывает влияния на режим ПМД [6].

Известно, что увеличить импульсную мощность в режиме ПМД можно за счет увеличения числа накопленных неравновесных носителей. Достичь этого можно при увеличении поглощения на длине волны генерации. Одним из путей увеличения потерь является штарковский сдвиг края поглощения в длинноволновую область спектра. В настоящей работе проводилось исследование режима ПМД двухсекционных лазеров с тремя глубокими КЯ и его связи со спектральными свойствами поглотителя.

Лазерная структура была изготовлена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs. Активная область состояла из трех InGaAs квантовых ям толщиной 8 nm, разделенных барьером толщиной 18 nm, что исключает эффекты туннельного связывания между электронными уровнями ям. Квантовые ямы расположены в $Al_{0.25}GaAs$ волноводе толщиной 628 nm, ограниченном $Al_{0.25}GaAs$ эмиттерными слоями. Структура была изготовлена для лазерной генерации в спектральной области $1.06 \mu m$. Методами стандартной фотолитографии были изготовлены полосковые лазеры с шириной полоска $5 \mu m$, что обуславливало генерацию на основной пространственной моде. Исследование поглощения структуры проводилось на двухсекционных образцах с секциями одинаковой длины, с зеркалами, полученными при сколе лазеров. Динамические режимы излучения лазеров были реализованы на двухсекционных образцах длиной 0.6 mm, длина секции

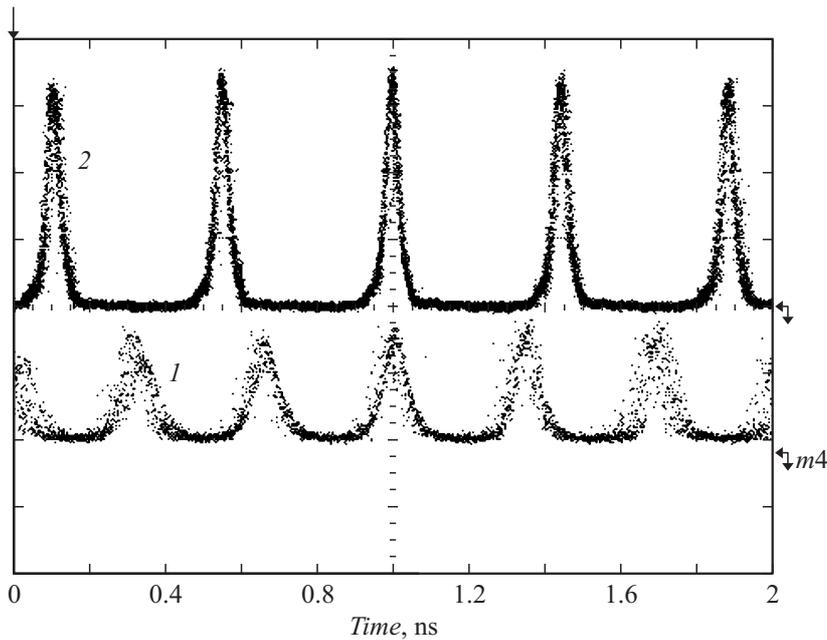


Рис. 1. Оциллограммы излучения лазера с тремя квантовыми ямами при токе накачки 47 мА и обратных смещениях: 1 — 5.5 В, 2 — 6.9 В. Масштаб по оси напряжения одинаков для обеих линий.

поглотителя 10% длины резонатора лазера, на одно из зеркал которых было нанесено 90% отражающее покрытие, а второе получено методом скола. Секции были изолированы электрическим разрывом в контакте, сопротивление между секциями составляло более 10 кΩ, лазеры монтировались на медный теплоотвод.

Измерения проводились при комнатной температуре. Лазеры исследовались при импульсном токе накачки длительностью 160 нс и различных обратных смещениях V_{rev} на секции НП. При малых V_{rev} лазер работал в непрерывном режиме. При обратных смещениях от 4 до 6 В наблюдается режим модуляции добротности с частотой следования импульсов порядка 2–3 ГГц. При $V_{rev} = 5.5$ В длительность импульсов Δt составляет около 70 пс (рис. 1, кривая 1). С увеличением V_{rev} в

этом диапазоне частота уменьшается, при этом длительность импульсов практически не изменяется, мощность в импульсе составляет 70 mW. Увеличение тока накачки приводит последовательно к росту частоты следования импульсов, а затем к переключению лазера в режим непрерывной генерации.

Увеличение V_{rev} более 6 V приводит к скачкообразному уменьшению длительности импульсов до значений порядка 35 ps (рис. 1, кривая 2), что соответствует трем обходам резонатора. Частота следования импульсов также уменьшается. Мощность в импульсе при $V_{rev} = 6.9$ V достигает 150 mW, что более чем в два раза больше, чем при том же токе накачки и обратном смещении 5.5 V. Одновременно с этим наблюдался коротковолновый сдвиг линии лазерной генерации.

В полупроводниковых лазерах на КЯ увеличение обратного смещения на секции поглотителя приводит к длинноволновому сдвигу линии лазерной генерации вследствие увеличения поглощения за счет эффекта Штарка [7]. В тоже время в исследуемых в настоящей работе лазерах с тремя КЯ резкое изменение картины ПМД лазера при одном и том же токе накачки сопровождается сдвигом длины волны генерации в коротковолновую область на 15 nm и уширением спектра, измеренного по уровню 0.1 излучения, $\Delta\lambda$ с 1.7 nm до 5.4 nm (рис. 2, линии 3 и 4).

Для объяснения этого эффекта было измерено поглощение для ТЕ поляризации методом интегрально-абсорбционной спектроскопии [7], длина каждой секции составляла 250 μm . Сопоставление спектров генерации (рис. 2, линии 3 и 4) со спектрами поглощения (рис. 2, линии 1 и 2), измеренными при близких значениях обратного смещения, показывает, что при V_{rev} менее 6 V линия генерации располагается на краю зоны поглощения. При этом в диапазоне обратных смещений от 0 до 6 V линия генерации сдвигается в длинноволновую область по мере увеличения обратного смещения. При превышении V_{rev} 6 V линия генерации скачком смещается в коротковолновую область и находится в спектральной области вблизи пика спектра поглощения, измеренного при том же обратном смещении. Сдвиг в коротковолновую область сопровождается увеличением поглощения на длине волны лазерной генерации с 35 до 190 cm^{-1} , что приводит к росту просветляемых потерь и увеличению мощности.

Дальнейшее уменьшение длительности импульса и увеличение его мощности было достигнуто с использованием схемы накачки с дополнительной модуляцией усиливающей секции электрическими импульсами

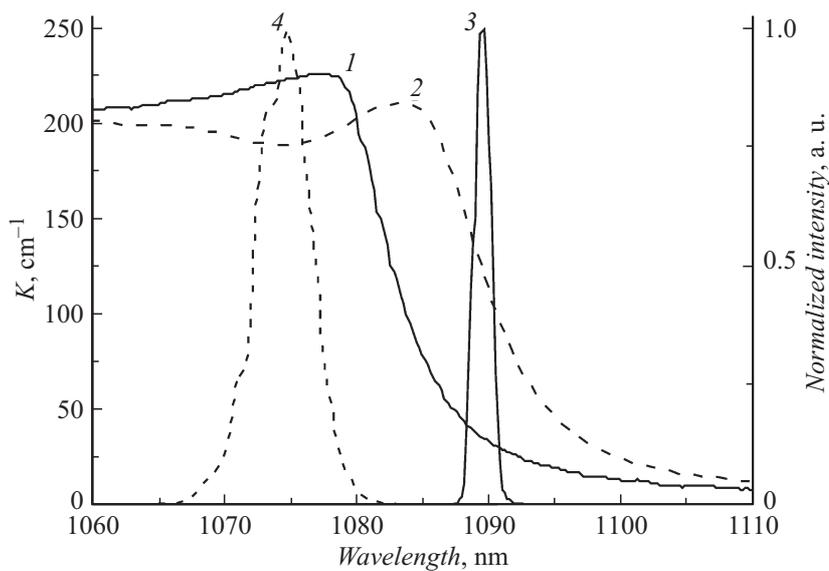


Рис. 2. Спектры поглощения и генерации лазера с тремя квантовыми ямами. Линии 1 и 2 — спектры поглощения при обратном смещении 5 и 7 В на секции поглотителя соответственно, линии 3 и 4 — спектры генерации при токе накачки $I_f = 47$ мА и обратных смещениях 5.5 и 6.9 В на поглощающей секции соответственно.

длительностью 1 ns и величиной 15 V в тракте с волновым сопротивлением 50Ω . Таким образом, лазер работал в гибридном режиме ПМД и модуляции усиления (МУ) в лазере с НП [9], при этом длительность импульсов света, измеренная с помощью фотоприемника и осциллографа, составляет 24 ps при $V_{rev} = 6.2$ V (рис. 3, a). Поскольку полоса фотоприемника ограничена 25 GHz, то длительность импульса лазера дополнительно была измерена с помощью автокорреляционной функции второго порядка (АКФ) (рис. 3, b). Ширина на полувисоте АКФ составляет 25 ps, что при гауссовой форме импульса дает значение длительности импульса 17 ps и соответственно при энергии импульса 22 pJ — мощность импульса в 1.3 W. Стоит отметить, что как, и в режиме ПМД, длительность импульсов резко уменьшается при

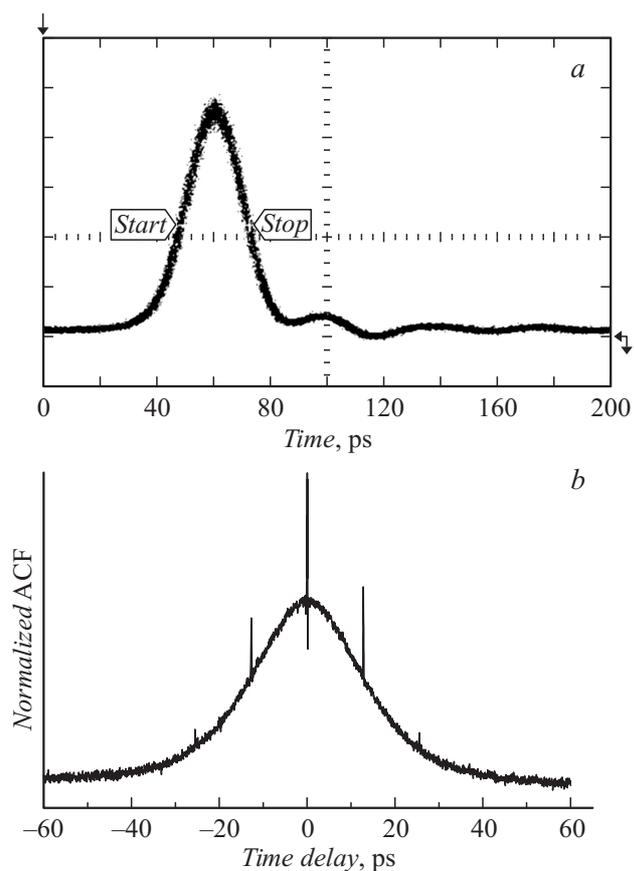


Рис. 3. Излучение лазера при импульсной накачке и обратном смещении 6.2 V. *a* — осциллограмма, *b* — АКФ.

$V_{rev} > 6$ V. Увеличение импульсной мощности может быть объяснено тем, что по сравнению с „чистым“ режимом ПМД в гибридном режиме ПМД и МУ происходит трехкратное увеличение ширины спектра $\Delta\lambda$.

Увеличение обратного смещения на секции поглотителя приводит к сдвигу в длинноволновую область спектра поглощения за счет квантоворазмерного эффекта Штарка. В силу того что эффект Штарка

квадратичен по приложенному полю, при малых обратных смещениях этот сдвиг незначителен, однако при обратных смещениях более 5 V скорость движения пика превышает 3 meV/V. При этом во всем приложенном диапазоне обратных смещений сохраняется резкий край поглощения, с крутизной роста поглощения 23.7 и 20.5 cm⁻¹/meV для обратных смещений 0 и 7 V соответственно. Таким образом, на длине волны генерации поглощение увеличивается с 35 до 190 cm⁻¹, что вместе с быстрым восстановлением НП приводит к увеличению мощности в импульсе и уменьшению Δt .

В заключение хотелось бы отметить, что было проведено исследование режима пассивной модуляции добротности в двухсекционных лазерах, содержащих в активной области три квантовые ямы. Показано, что за счет штарковского сдвига пика поглощение на длине волны лазерной генерации увеличивается более чем в пять раз, что приводит к двукратному увеличению мощности в импульсе режима ПМД при том же токе накачки. При гибридном режиме модуляции добротности и модуляции усиления мощность в импульсе увеличивается на порядок.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 14-29-08266 офи_м, Федеральной целевой программы „Исследования а разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы“, шифр 2015-14-579-0014; соглашение № 14.579.21.0096, уникальный идентификатор RFMEF 157915X0096, а также КНВШ СПб.

Список литературы

- [1] *Holton M.D.* et al. // *Opt. Express*. 2009. V. 17. P. 5205–5216.
- [2] *Maksimov E. G.* et al. // *Photosynth. Res.* 2015 (in print).
- [3] *Czerniuk T.* et al. // *Nature Communications*. 2014. 5: 4038.
- [4] *Avrutin E.A.* et al. // *IEE Proceedings-J. Optoelectronics*. 2000. V. 147. P. 251–278.
- [5] *Буяло М.С.* и др. // *Письма в ЖТФ*. 2013. Т. 39. В. 3. С. 41–48.
- [6] *Буяло М.С.* и др. // *Письма в ЖТФ*. 2012. Т. 38. В. 7. С. 31–39.
- [7] *Гаджиев И.М.* и др. // *Письма в ЖТФ*. 2010. Т. 36. В. 22. С. 29–36.
- [8] *Buyalo M.S.* et al. // *Electron. Lett.* 2012. V. 48. I. 14. P. 870–872.
- [9] *Lanz B.* et al. // *Opt. Express*. 2013. V. 21. I. 24. P. 29780–29791.