

06;07

Переключение генерации излучения двух квантовых состояний в полупроводниковых лазерах на квантовых ямах

© Г.С. Соколовский, Д.А. Винокуров, А.Г. Дерягин, В.В. Дюделев,
В.И. Кучинский, С.Н. Лосев, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин,
С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: gs@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 11 января 2008 г.

Проведены эксперименты по исследованию динамики спектров излучения полупроводниковых лазеров на квантовых ямах, генерирующих излучение двух квантовых состояний. При электрической накачке 100 ns импульсами через 10–50 ns после включения лазера наблюдалось выключение лазерной генерации излучения, соответствующего переходам с основного квантового состояния, и включение генерации излучения возбужденного состояния. Это переключение сопровождалось провалом в интенсивности лазерной генерации, длительность которого варьировалась в зависимости от амплитуды импульса накачки. В качестве объяснения наблюдаемых явлений предложено насыщение усиления и перераспределение концентрации носителей между квантовыми состояниями.

PACS: 73.21.La, 42.55.Px, 85.35.Be

Полупроводниковые лазеры на квантово-размерных гетероструктурах привлекают к себе пристальное внимание исследователей благодаря многим интересным свойствам, связанным с дискретным характером энергетических уровней. Так, в частности, сравнительно недавно была продемонстрирована возможность одновременной лазерной генерации с основного (GS, от „ground state“ — англ.) и возбужденного (ES, от „excited state“ — англ.) состояний квантовых ям (КЯ) [1], аналогично наблюдавшейся ранее двухполосной генерации лазеров на квантовых точках [2]. Эти эффекты являются наиболее важными для мощных лазеров, так как проявляются только при высоких уровнях накачки

и могут быть индикатором фундаментальных факторов, ограничивающих оптическую мощность полупроводниковых лазеров. В этой связи исследование динамики перераспределения носителей заряда между квантовыми состояниями позволит выявить механизм насыщения усиления и, таким образом, наметит пути борьбы с ограничением роста интенсивности излучения в полупроводниковых лазерах на квантово-размерных гетероструктурах.

В настоящей работе нами, с использованием ранее разработанной методики [3], проведены исследования динамики спектров излучения полупроводниковых лазеров на квантовых ямах (КЯ ППЛ), генерирующих излучение двух квантовых состояний. Полученные результаты демонстрируют сходное влияние насыщения усиления на динамику заполнения квантовых состояний в квантовых ямах и квантовых точках [3] и существенно отличаются от большинства данных, приводимых в мировой литературе в последние годы.

Лазерная структура, использованная в эксперименте, была выращена МОС-гидридной эпитаксией на подложке GaAs в системе твердых растворов InGaAs/GaAs/AlGaAs [4]. Эмиттеры изготавливались из твердого раствора $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$, волноводные слои из GaAs, а квантово-размерная активная область из твердого раствора $\text{In}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{As}$, используемого для создания лазеров на длину волны 1.04–1.08 μm . Конструктивные особенности полупроводниковых лазеров раздельного ограничения были выбраны согласно концепции мощных лазеров на основе асимметричных гетероструктур [5]. Ширина квантовой ямы в активной области составляла 100 Å и была выбрана таким образом, чтобы обеспечить наличие двух электронных энергетических уровней. При этом разрыв валентных зон $\text{In}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{As}$ и GaAs обеспечивал наличие пяти уровней тяжелых и одного энергетического уровня легких дырок. Согласно расчетам [6], полоса генерации, соответствующая рекомбинации с первого уровня размерного квантования для электронов, включает в себя разрешенные в квантовой яме излучательные переходы $1c \rightarrow 1h$, $1c \rightarrow 2h$ и $1c \rightarrow 3h$ (см. схематическое изображение уровней размерного квантования в квантовой яме активной области на рис. 1, *a*). Аналогично вторая полоса генерации, соответствующая рекомбинации со второго электронного уровня, включает в себя переходы $2c \rightarrow 2h$ и $2c \rightarrow 1h$. При этом первая полоса не перекрывается по частоте со второй полосой (см. спектр генерации на рис. 1, *b*). Поэтому с целью упрощения пояснений в данной работе первый и второй электронные

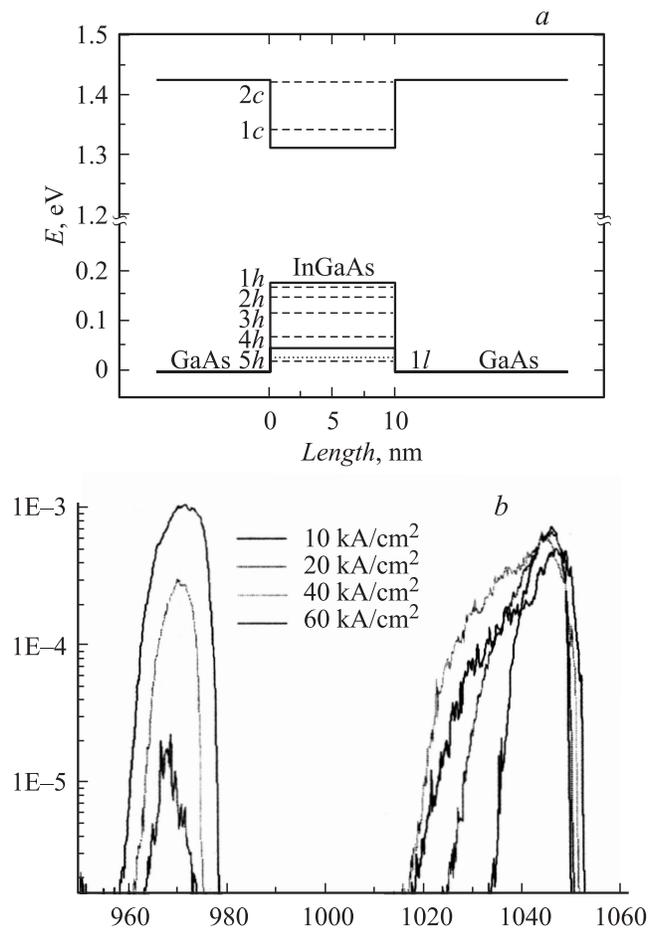


Рис. 1. *a* — схематическое изображение уровней размерного квантования в квантовой яме $\text{In}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{As}/\text{GaAs}$ толщиной 100 \AA (по данным [1]); *b* — спектры излучения КЯ ППЛ при накачке импульсами тока длительностью 100 ns , обеспечивающими различную плотность тока накачки.

уровни называются основным и возбужденным состояниями КЯ, а излучение, связанное с переходами электронов с этих уровней, называется соответственно излучением GS и ES.

Схема эксперимента была аналогична описанной в работе [3] и обеспечивала проведение спектральных и динамических измерений. Электрическая накачка полупроводникового лазера осуществлялась импульсами тока амплитудой от 0 до 100 А. Раздельная регистрация излучения с GS и ES осуществлялась путем включения в оптическую схему монохроматора, пропускавшего только коротковолновую или длинноволновую часть излучения.

Динамические характеристики КЯ ППЛ изучались нами при электрической накачке импульсами тока длительностью 100 ns с частотой повторения 10 Hz. Значения длительности импульсов накачки и частоты повторения были выбраны с целью предотвращения перегрева лазера. При не слишком высоких уровнях накачки лазером генерировалось излучение GS и не наблюдалось никаких особенностей в динамических характеристиках, за исключением отсутствия релаксационных колебаний при включении. При увеличении амплитуды импульсов накачки выше некоторого уровня, определяемого длиной ППЛ, через 10–50 ns после включения лазера нами наблюдалось прекращение лазерной генерации GS включение генерации ES (рис. 1). Это переключение сопровождалось коротким провалом в полной интенсивности лазерной генерации, длительность которого варьировалась в зависимости от амплитуды импульса накачки.

Мы считаем, что наблюдаемое переключение генерации GS–ES обусловлено насыщением усиления, которое, по нашему мнению, вызывается насыщением населенности основного (нижнего) электронного уровня квантовой ямы, что ведет к значительному росту населенности верхнего уровня, как можно видеть из соотношения спектральных и динамических характеристик при различных уровнях накачки. Как видно из рис. 2, выключение GS генерации КЯ лазера происходит при достижении определенного уровня выходной мощности. Это подтверждает наше предположение о том, что переключение генерации с GS на ES связано с насыщением усиления, причиной которого является ограниченная плотность состояний (точнее, ограниченное количество состояний) в квантовой яме в активной области, что делает невозможным поддержание высокого усиления GS при превышении определенной концентрации GS фотонов в резонаторе. При постоянной скорости инжекции носителей из эмиттеров в активную область насыщение населенности GS вызывает рост скорости заполнения ES (и рост концентрации носителей на возбужденном состоянии). Однако пока

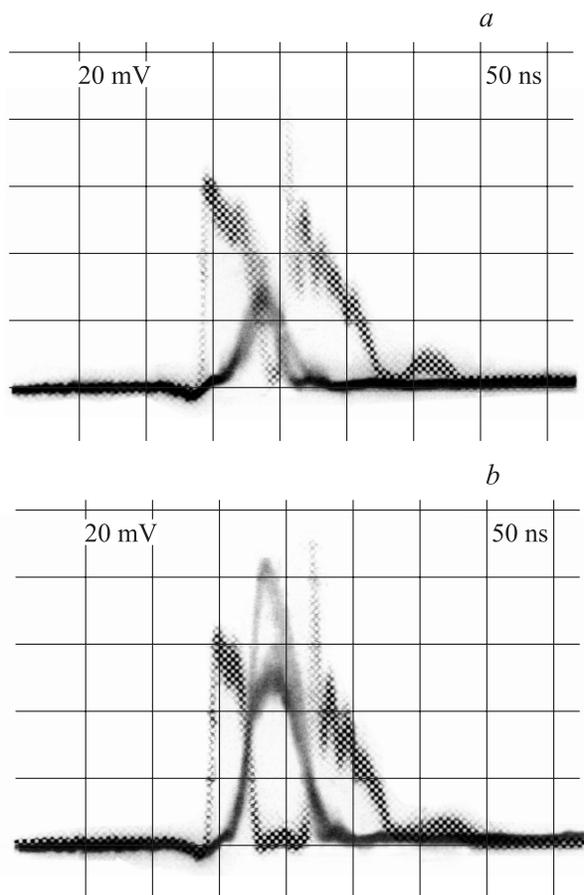


Рис. 2. Осциллограммы излучения основного и возбужденного состояний при накачке импульсами тока длительностью 100 ns, обеспечивающими плотность тока накачки: *a* — 50 kA/cm² и *b* — 60 kA/cm².

возросшая концентрация ES далека от концентрации прозрачности, ее рост вызывает лишь падение квантовой эффективности, а не лазерную генерацию, что объясняет провал в интегральной интенсивности лазерного излучения при переключении состояний. Следует подчеркнуть, что увеличение скорости заполнения ES ведет к соответствующему

уменьшению скорости заполнения GS и, как следствие, обеднению основного состояния и прекращению лазерной генерации. При этом возможна ситуация, когда из-за уменьшения скорости заполнения генерация на основном состоянии КЯ уже невозможна, а для генерации на возбужденном состоянии еще не накоплена необходимая концентрация носителей [3].

Еще одним фактором, позволяющим говорить о значительном сходстве обнаруженных аномальных динамических характеристик КЯ и КТ лазеров при высоких плотностях накачки, является отсутствие релаксационных колебаний при включении лазеров, исследованных в настоящей работе. Отсутствие релаксационных колебаний при включении КТ лазеров широко обсуждается в литературе (см., например, [7]), и в случае КЯ лазеров можно предположить сходные механизмы подавления релаксационных колебаний, например, многомодовую многочастотную генерацию, служащую взаимному „размыванию“ релаксационных колебаний излучения разных энергетических уровней/мод, или повышение декремента затухания релаксационных колебаний при высоких уровнях накачки [8]. Однако вероятной причиной отсутствия релаксационных колебаний лазеров КЯ могла стать и использованная в наших экспериментах форма импульса накачки с фронтом нарастания сигнала 10–30 ns в зависимости от амплитуды.

Таким образом, в настоящей работе сообщается о спектрально-разрешенных экспериментальных исследованиях аномальных динамических характеристик полупроводниковых лазеров на квантовых ямах, генерирующих излучение двух квантовых состояний. В качестве объяснения наблюдаемых явлений предложено насыщение усиления и перераспределение концентрации носителей между квантовыми состояниями.

Список литературы

- [1] *Винокуров Д.А., Зорина С.А., Капитонов В.А.* и др. // ФТП. 2007. Т. 41 (10). С. 1247.
- [2] *Maximov M.V., Asryan L.V., Shernyakov Yu.M.* et al. // IEEE J. Quant. El. 2001. V. 37. P. 676–683.
- [3] *Соколовский Г.С., Каталуна М.А., Дерягин А.Г.* и др. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33 (1). С. 9.

- [4] Винокуров Д.А., Капитонов В.А., Лютецкий А.В. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32 (16). С. 47.
- [5] Слитченко С.О., Винокуров Д.А., Пихтин Н.А. и др. // ФТП. 2004. Т. 38 (12). С. 1477.
- [6] Соколова З.Н., Халфин В.Б. // ФТП. 1989. Т. 23. С. 1806.
- [7] Grundmann M. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77 (10). P. 1428.
- [8] Дерягин А.Г., Кучинский В.И., Соколовский Г.С. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22 (5). С. 44.