

06

Влияние ширины барьера в структуре с двумя асимметричными связанными квантовыми ямами на область существования пассивной синхронизации мод

© М.С. Буяло, А.А. Горбачевич, А.Ю. Егоров,
И.М. Гаджиев, И.О. Бакшаев, Ю.М. Задиранов,
Н.Д. Ильинская, Е.Л. Портной

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
Санкт-Петербургский академический университет —
научно-образовательный центр нанотехнологий РАН
E-mail: mikhail.buyalo@gmail.com

Поступило в Редакцию 17 ноября 2011 г.

Исследованы двухсекционные полупроводниковые лазеры с активной областью, состоящей из двух квантовых ям InGaAs различной ширины, разделенных барьером GaAs. При толщине барьера 2 nm происходит туннельное связывание ям, что обуславливает наличие непрямого оптического перехода между ними. Соответствующий этому переходу пик в спектре поглощения лазерной структуры приводит к дополнительной области существования режима пассивной синхронизации мод при малых обратных смещениях на поглощающей секции.

В последнее время полупроводниковым лазерам с пассивной синхронизацией мод (ПСМ) посвящено значительно число работ [1] в связи с тем, что они могут быть использованы в технических приложениях, в частности для терагерцовых оптоэлектронных систем [2]. Однако для получения режима ПСМ в многосекционных лазерах требуется прикладывать значительное обратное смещение к секции поглотителя. В данной работе для уменьшения величины обратного смещения предлагается использовать асимметричную структуру с двумя связанными квантовыми ямами (КЯ).

Теоретическое рассмотрение структур со связанными КЯ (см. [3] и ссылки в ней) показывает возможность осциллирующего поведения электронов в системе двух связанных КЯ различной ширины во внешнем электрическом поле. Экспериментально было продемонстрировано, что расщепление электронного уровня в структурах с двумя связанными КЯ может быть использовано для непосредственной генерации терагерцового излучения [4]. Однако этот метод осуществим только при гелиевых температурах, когда расстояние между уровнями превышает ширину теплового размытия уровня kT . Другим методом генерации терагерцового излучения может быть оптоэлектронное преобразование излучения полупроводникового лазера с ПСМ [5]. Информационный сигнал в такой схеме может быть реализован за счет модуляции оптического сигнала. Для этого удобно использовать интегрированный с лазером модулятор на эффекте Штарка [6].

Ранее было показано, что туннельное связывание квантовых точек (КТ) приводит к появлению не прямых оптических переходов между соседними КТ [7]. Оптическая интенсивность непрямого перехода определяется вероятностью туннелирования носителей между соседними точками и увеличивается при сближении электронных уровней. В определенном диапазоне внешних полей носители становятся делокализованными, вероятность туннелирования при этом отлична от нуля и в спектре поглощения появляется соответствующий этому не прямому переходу пик. Также было показано, что в системе, состоящей из связанных КТ, основные уровни энергий не прямых переходов с основных уровней соседних точек сближаются во внешнем электрическом поле. При совпадении этих энергий переходов наблюдалось увеличение поглощения в соответствующей области спектра [7]. В приборах на основе КТ соответствующий резонансный пик в спектре поглощения сильно размыт вследствие дисперсии размеров КТ, которая происходит из-за недостаточного уровня развития современной технологии роста КТ [7,8]. Структуры на основе КЯ являются технологически более совершенными и обладают малой неоднородностью толщины эпитаксиальных слоев. Поэтому следует ожидать, что резонансный пик в спектре поглощения при совпадении уровней КЯ будет значительно уже, чем для структур с КТ. Действительно, характерная ширина экситонного пика поглощения при комнатной температуре для КЯ составляет порядка 5 nm (см., например, рис. 1 в работе [9]), в то

время как для КТ ширина пика основного состояния — более 15 nm (см. например, рис. 4, *b* в работе [7]).

Для существования режима ПСМ необходимо, чтобы выполнялось условие

$$\frac{dg}{dn} < \frac{d\alpha}{dn}, \quad (1)$$

где g и α — усиление и поглощение среды соответственно, а n — концентрация носителей в соответствующей области. Как было показано в работе [9], для компенсации сдвига длины волны генерации, происходящего вследствие эффекта сужения запрещенной зоны в усиливающей секции, необходимо сдвигать край поглощения в длинноволновую область. Требуемое положение края поглощения достигалось за счет эффекта Штарка, который реализовался подачей значительного обратного смещения на секцию поглотителя. Уменьшить величину обратного смещения можно используя конструкцию активной области, состоящей из двух связанных КЯ различной ширины, подобранных таким образом, чтобы непрямой, быстро двигающийся от электрического поля оптический переход вносил вклад в поглощение на краю запрещенной зоны уже при малых обратных смещениях.

В данной работе было проведено исследование режима пассивной синхронизации мод в лазерах с активной областью, состоящей из двух КЯ одинакового состава и различной ширины. Для сравнения были изготовлены два типа лазерных структур, отличавшихся толщиной барьера между КЯ и соответственно величиной туннельной связи между ямами.

Лазерные структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках n^+ -GaAs ориентацией (001). Активная область состояла из двух квантовых ям $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ толщиной 6 и 9 nm, разделенных барьером GaAs; более широкая яма располагалась ближе к области гетероструктуры, легированной примесью p -типа. Для связанных ям ширина барьера $w = 2$ nm, для не связанных $w = 4$ nm. Квантовые ямы были заключены в симметричный волноводный слой GaAs шириной $0.4 \mu\text{m}$, ограниченный снизу слоем $_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}:\text{Si}$ с проводимостью n -типа, толщиной $1.2 \mu\text{m}$ и сверху слоем $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}:\text{Be}$ с проводимостью p -типа, $1.0 \mu\text{m}$. Гетероструктуры выращивались на промышленной установке Ribet 49. Толщина и элементный состав слоев гетероструктур контролировались с высокой точностью [10] и диагно-

стировались методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновской дифракции.

Из лазерных структур методами стандартной фотолитографии были изготовлены двухсекционные лазеры с мезой $5\ \mu\text{m}$, что обеспечивает одномодовую генерацию. Длина лазера составляла $2\ \text{mm}$, длина секции поглотителя лазера — 10% длины резонатора лазера, секции были изолированы электрическим разрывом в контакте. Лазеры монтировались на медный теплоотвод.

Измерения проводились при комнатной температуре, при постоянном токе накачки и обратном смещении V_{rev} до $4\ \text{V}$. На рис. 1 приведены автокорреляционные функции и спектры излучения лазера с узким барьерным слоем в режиме ПСМ. С увеличением обратного смещения уменьшается длительность импульсов и величина произведения длительности импульсов на ширину спектра (ТВР), спектр излучения при этом сдвигается в длинноволновую область. Однако в данном типе лазеров синхронизация мод не происходит при $-1.1 < V_{rev} < -3.0\ \text{V}$, лазер излучает в непрерывном режиме (рис. 2, *a*). В аналогичных по конструкции лазерах с широким барьерным слоем режим ПСМ наблюдается при обратном смещении более $3.3\ \text{V}$ (рис. 2, *b*).

Такое поведение лазеров может быть объяснено характером зависимости поглощения в секции насыщающегося поглотителя от приложенного обратного смещения для структур со связанными КЯ (кривая 1, рис. 2, *c*). При $V_{rev} < 0.7\ \text{V}$ поглощение мало и условие (1) не выполняется, лазер излучает в непрерывном режиме. Поглощение на длине волны лазерной генерации увеличивается на $20\ \text{cm}^{-1}$ при $V_{rev} \approx 1\ \text{V}$ из-за наличия непрямого перехода в туннельно-связанных ямах и становится достаточным для процесса синхронизации мод. При дальнейшем увеличении напряжения до $3\ \text{V}$ поглощение уменьшается и лазер переходит в непрерывный режим излучения. При $V_{rev} > 3\ \text{V}$ поглощение растёт вследствие штарковского сдвига края поглощения, условие (1) удовлетворяется и лазер излучает в режиме ПСМ.

В лазерах с широким барьерным слоем, напротив, связывание ям не происходит, и наблюдается штарковский сдвиг края поглощения, характерный для одиночных квантовых ям (кривая 2, рис. 2, *c*) [9]. Поэтому в этом типе лазеров синхронизация мод происходит только при напряжениях более $3.3\ \text{V}$.

В структурах с узким барьерным слоем между квантовыми ямами происходит туннельное связывание уровней ям, что обуславливает воз-

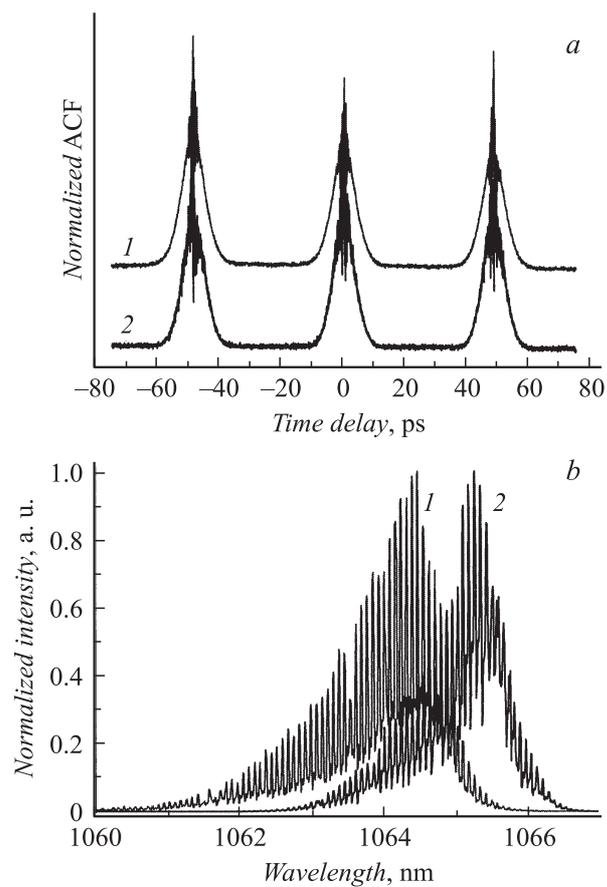


Рис. 1. Автокорреляционные функции (a) и спектры (b) лазера с узким барьером между ямами при токе накачки 250 мА: 1 — $V_{rev} = -1.0$ В, длительность импульса — 5.2 ps, ТВР = 1.2 ; 2 — $V_{rev} = -3.4$ В, длительность импульса — 4.7 ps, ТВР = 1.1.

никновение непрямого перехода между квантовыми ямами. Движение этого перехода в длинноволновую область спектра от приложенного поля приводит к увеличению поглощения при малых обратных смеще-

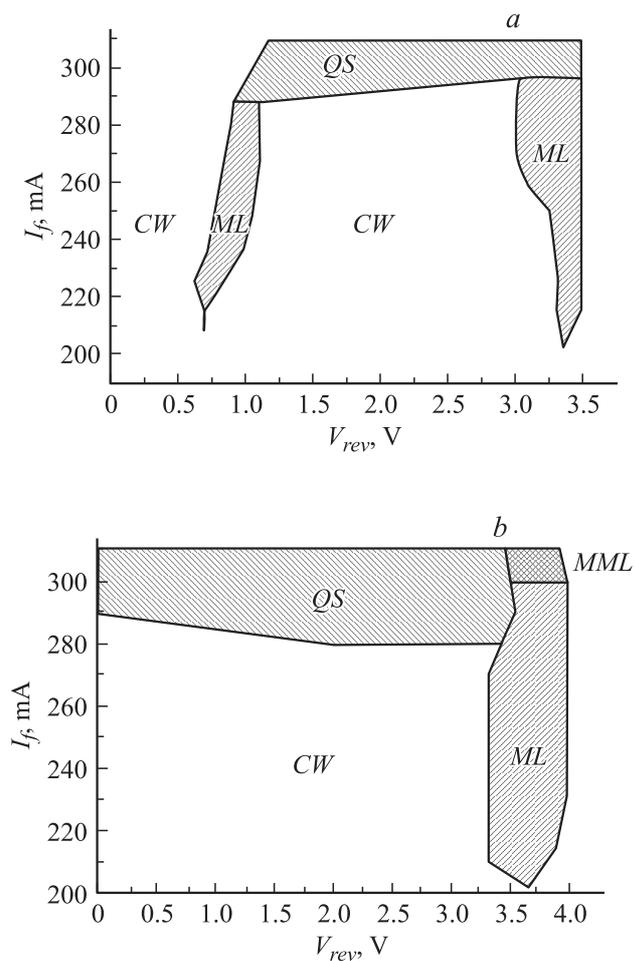


Рис. 2. Карты режимов для лазеров с узким (*a*) и широким (*b*) барьером и соответствующие им зависимости поглощения структур на длине волны генерации от приложенного смещения (*c*). *CW* — непрерывный режим, *ML* — пассивная синхронизация мод, *QS* — режим модуляции добротности, *MML* — режим модулированной синхронизации мод. *c*: 1 — структура с узким барьером, 2 — структура с широким барьером.

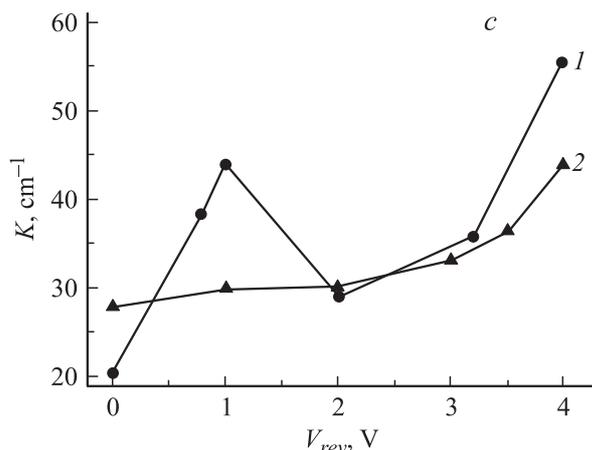


Рис. 2 (продолжение).

ниях на длине волны генерации (кривая 1, рис. 2, c) и существованию режима ПСМ.

При высоких уровнях инжекции режим работы лазеров меняется. При токах накачки более 280 мА режим ПСМ разрушается и лазер излучает импульсы в режиме пассивной модуляции добротности (кривая 1, рис. 3), что соответствует области QS рис. 2.

В структурах с широким барьерным слоем с увеличением обратного смещения и при больших токах накачки величина поглощения становится достаточной для частичной синхронизации мод лазера и вид автокорреляционной функции меняется — увеличивается глубина контраста (кривая 2, рис. 3); с дальнейшим увеличением обратного смещения увеличивается степень синхронизации мод (кривая 3). На рис. 3, кривая 4, видно, что излучение лазера представляет собой режим ПСМ, модулированный на частоте 1.2 GHz. Авторы полагают, что эта модуляция обусловлена медленным временем выноса носителей из волноводного слоя при большой оптической мощности.

Таким образом, малая ширина барьерного слоя в лазерных структурах с двумя квантовыми ямами приводит к появлению дополнительного пика в спектре поглощения. При малых обратных смещениях от 0.7 до 1.1 В положение этого пика совпадает с линией лазерной генерации.

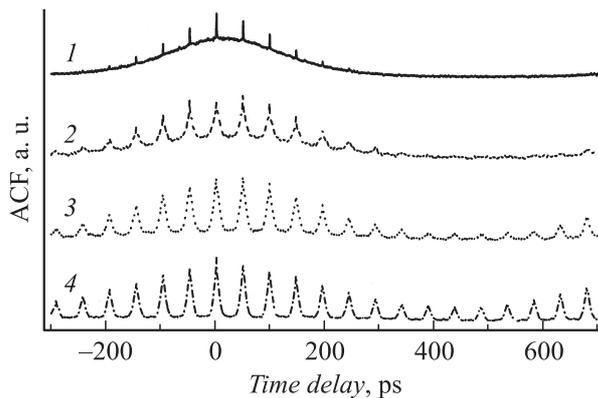


Рис. 3. Переход между режимами генерации лазера при постоянном токе накачки с увеличением обратного смещения: 1 — $V_{rev} = -3.36$ V, 2 — $V_{rev} = -3.5$ V, 3 — $V_{rev} = -3.61$ V, 4 — $V_{rev} = -3.74$ V.

При этом дифференциальные потери становятся достаточно большими для того, чтобы лазер излучал в режиме пассивной синхронизации мод. Такая структура с двумя связанными ямами перспективна для создания модуляторов с сильной зависимостью поглощения от приложенного смещения, а также для создания двухсекционных лазеров с синхронизацией мод с малым напряжением на секции поглотителя.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, программ фундаментальных исследований РАН, гранта правительства СПб для молодых ученых.

Список литературы

- [1] Буяло М.С., Соболев М.М., Гаджиев И.М., Бакиев И.М., Бакиев И.О., Задиранов Ю.М., Ильинская Н.Д., Портной Е.Л. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 18. С. 31–36.
- [2] Fice M.J., Rouvalis E., Ponnampalam L., Renaud C.C., Seeds A.J. // *El. Lett.* 2010. V. 46. Is. 26. P. S28–S31.
- [3] Горбачевич А.А., Канаев В.В., Конаев Ю.В. // *ЖЭТФ.* 1995. Т. 107. В. 4. С. 1320–1349.

- [4] *Roskos H.G., Nuss M.C., Shah J., Leo K., Miller D.A.B., Fox A.M., Schmitt-Rink S., Köhler K.* // *Phys. Rev. Lett.* 1992. V. 68. P. 2216–2219.
- [5] *Portnoi E.L., Chelnokov A.V.* // *IEEE Semiconductor Laser Conference.* 1990. P. 140–141.
- [6] *Портной Е.Л., Гаджиев И.М., Губенко А.Е., Соболев М.М., Ковш А.Р., Бакшаев И.О.* // *Письма в ЖТФ.* 2007. Т. 33. В. 16. С. 28.
- [7] *Nikolaev V.V., Averkiev N.S., Sobolev M.M., Gadzhiev I.M., Bakshaev I.O., Buyalo M.S., Portnoi E.L.* // *Phys. Rev. B.* 2009. V. 80. P. 205304.
- [8] *Nikolaev V.V., Averkiev N.S.* // *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 95. P. 263107.
- [9] *Гаджиев И.М., Буяло М.С., Бакшаев И.О., Григорьев Р.И., Слипченко С.О., Пихтин Н.А., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Винокуров Д.А., Тарасов И.С., Портной Е.Л.* // *Письма в ЖТФ.* 2010. Т. 36. В. 22. С. 29–36.
- [10] *Егоров А.Ю., Гладышев А.Г., Никитина Е.В., Денисов Д.В., Поляков Н.К., Пирогов Е.В., Горбачевич А.А.* // *ФТП.* 2010. Т. 44. В. 7. С. 950–954.