

06;07

## Пассивная синхронизация мод в лазерах на сверхрешетке из квантовых точек

© М.С. Буюло, М.М. Соболев, 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  
E-mail: mikhail.buyalo@gmail.com

Поступило в Редакцию 2 мая 2011 г.

В двухсекционных лазерах с активной областью из сверхрешетки на 10 слоях квантовых точек реализован режим пассивной синхронизации мод. Туннельное связывание 10 слоев квантовых точек изменяет поляризационные свойства структуры и приводит к тому, что отношение между коэффициентами поглощения для ТЕ- и ТМ-поляризации не превышает 1.8 раза во всем спектре электролюминесценции для сверхрешетки.

Структуры с квантовыми точками (КТ) перспективны для создания устройств оптоэлектроники, в частности для лазеров [1], оптических модуляторов [2] и усилителей [3]. Для оптических усилителей и модуляторов желательно иметь независимые от поляризации характеристики, поэтому зависимости усиления и поглощения были исследованы как в структурах с квантовыми ямами [4], так и с квантовыми точками [5]. Однако в стандартных структурах с несвязанными КТ коэффициент поглощения на длине волны лазерной генерации для ТЕ-поляризованного света отличается на порядок [2]. Известно, что в структурах со связанными КТ [2,5,6] интенсивность ТМ-поляризации увеличивается с количеством слоев КТ.

Прямая токовая модуляция инжекционных лазеров не удовлетворяет потребностям современных высокоскоростных линий связей, поэтому в них используются системы, состоящие из лазера и модулятора. Физические процессы, а именно выброс носителей из КТ и вынос носителей из области  $p-n$ -перехода принципиально ограничивают быстродействие полупроводниковых модуляторов. Поскольку эти же процессы являются одними из обуславливающих частоту пассивной синхронизации мод (ПСМ), то предельную частоту модуляции можно определить по максимальной частоте ПСМ в лазере, изготовленном из

такой же структуры. Отметим, что реализация двухсекционного лазера с ПСМ является более простой технической задачей, чем изготовление высокочастотного модулятора, поскольку нет необходимости устранять паразитные емкости и индуктивности.

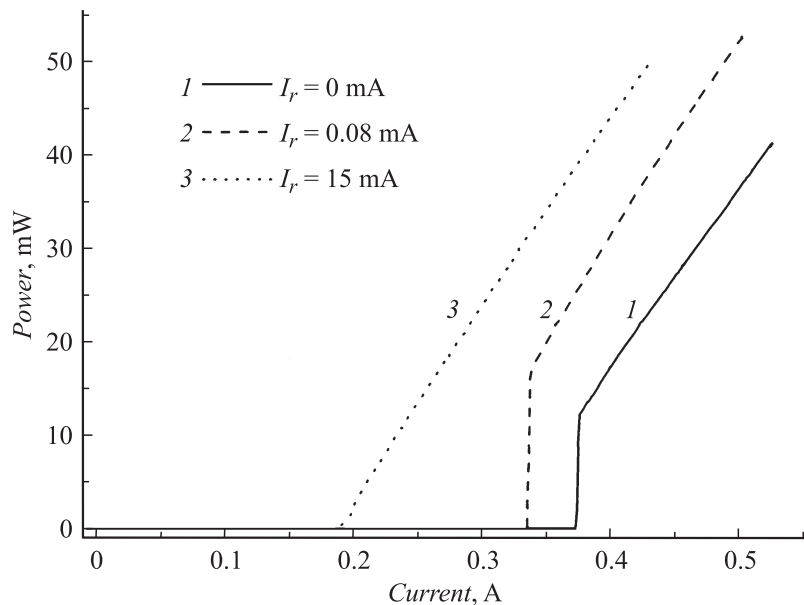
В данной работе исследуется система из 10 слоев близкорасположенных КТ, которые формируют сверхрешетку [7]. В отличие от структуры с несвязанными КТ, где отношение коэффициентов поглощения света ТЕ- и ТМ-поляризаций порядка 10, в исследуемой системе отношение коэффициентов близко к единице. Это делает такую структуру перспективной для создания оптических поляризационно-независимых модуляторов, востребованных в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС). На основе данной структуры были сделаны двухсекционные лазеры с ПСМ, в которых секция насыщающегося поглотителя играет роль модулятора излучения. Это показывает принципиальную возможность изготовления лазера и модулятора в рамках монолитной интегральной конструкции.

Лазерные структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках  $n^+$ -GaAs с ориентацией (001) и аналогичны структуре, описанной в [6]. Структура состояла из  $n$ -легированного нижнего слоя  $Al_{0.35}Ga_{0.75}As$  толщиной  $1.5 \mu m$ , волноводного нелегированного слоя GaAs толщиной  $480 nm$ , содержащего 10 слоев  $In(Ga)As$  КТ,  $p$ -легированного верхнего слоя  $Al_{0.35}Ga_{0.75}As$  толщиной  $1.5 \mu m$  и  $p^+$ -легированного контактного слоя GaAs. Массивы КТ были выращены посредством 10-кратного осаждения 2.3 монослоев InAs с барьерными слоями GaAs толщиной  $6 nm$  между слоями КТ.

Из полученных структур со связанными КТ были изготовлены двухсекционные лазеры. Методами стандартной фотолитографии была создана меза шириной  $5 \mu m$ , формировавшая одномодовый волновод. Длина резонатора лазера составила  $3.5 nm$ , длина секции поглотителя — 10% длины резонатора; секции были электрически изолированы друг от друга зазором в контакте. Конструкция лазера является фактически стандартной и описана во многих работах [2,8,9], но отличается от них тем, что активный слой состоит сверхрешетки КТ, сформированной десятью слоями КТ и тонкими барьерными слоями между ними.

Образцы припаивались к медному теплоотводу, измерения проводились при комнатной температуре.

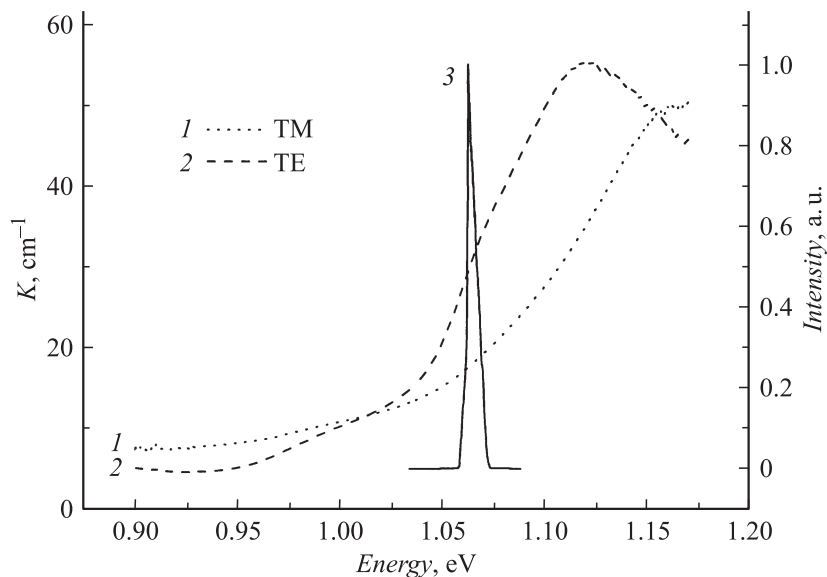
Полупроводниковые лазеры накачивались постоянным током; при этом наблюдается четкий эффект жесткого включения, который пропадает лишь при значительном прямом токе  $I_r$  на поглощающей секции



**Рис. 1.** Ватт-амперные характеристики лазера при различном токе на секции поглотителя, оптическая мощность с одного зеркала: 1 —  $I_r = 0$  мА,  $I_{th} = 313$  мА, 2 —  $I_r = 0.08$  мА,  $I_{th} = 262$  мА, 3 —  $I_r = 15$  мА,  $I_{th} = 186$  мА.

(рис. 1). Пороговый ток  $I_{th}$  уменьшается с увеличением прямого смещения, приложенного к секции поглотителя, при этом дифференциальная эффективность меняется незначительно. Жесткое включение лазера связано с эффектом оптической бистабильности, вызванной просветлением поглотителя из-за недостаточно высокой скорости выноса носителей. Эффект жесткого включения лазера является характерным явлением для двухсекционных лазеров на КТ с ПСМ.

Измерения поглощения проводились методом, описанном в [8]. Коэффициент поглощения для ТМ-поляризованного света всего в 1.6 раза меньше, чем для ТЕ на длине волны, соответствующей длине волны генерации лазера в режиме ПСМ (рис. 2). Максимальное отношение коэффициентов поглощения составляет 1.8 и при энергиях менее 1.012 и более 1.156 eV поглощение больше для ТМ-поляризации (рис. 2, кривые 1 и 2). Ширина спектра электролюминесценции в лазерной

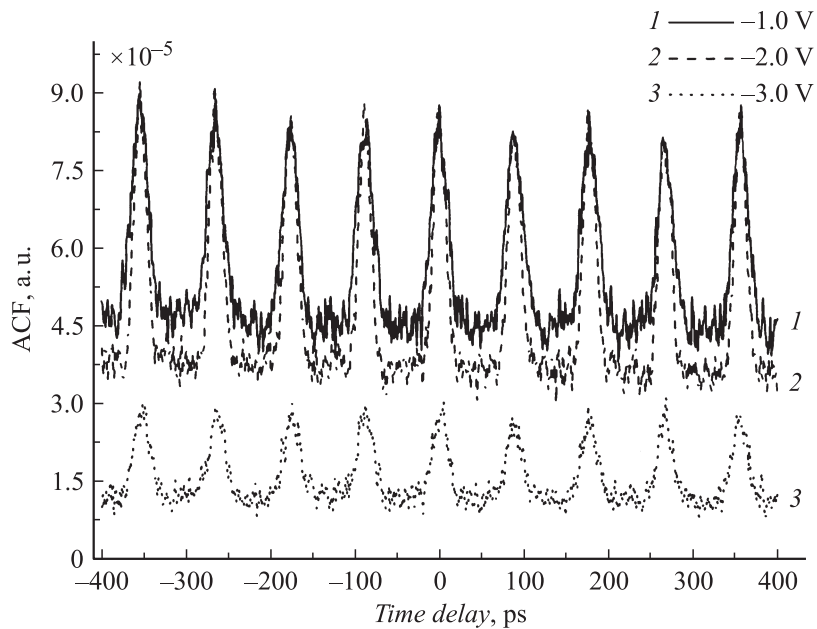


**Рис. 2.** Спектры поглощения для ТМ- и ТЕ-моды (линии 1 и 2) и линия генерации лазера в режиме ПСМ (линия 3).

структуре при плотности тока  $J = 0.3 \cdot J_{th}$  составляет около 130 nm, где  $J_{th}$  — плотность порогового тока. Это обусловлено двумя факторами — дисперсией размеров КТ и расщеплением уровней при связывании КТ. Фронт нарастания коэффициента поглощения составляет около 90 nm, что сопоставимо с шириной спектра электролюминесценции.

Исследования режима ПСМ проводилось при импульсном токе накачки (длительность импульсов  $1 \mu s$ ) и постоянном обратном смещении. Для измерений длительности импульсов использовался автокоррелятор на основе интерферометра Майкельсона, контроль осуществлялся осциллографом с полосой 50 GHz, спектроанализатором с полосой 22 и 20-GHz фотоприемником.

Линия генерации лазеров лежала в пределах 1160–1170 nm (рис. 2, линия 3), ширина линии на полувысоте для  $V_r = -2 V$  составляет 5.2 nm.



**Рис. 3.** Автокорреляционные функции лазера при различном обратном смещении: 1 —  $V_r = -1$  V, 2 —  $V_r = -2$  V, 3 —  $V_r = -3$  V.

Режим ПСМ наблюдался в широком диапазоне токов накачки при обратных смещениях от  $-1$  до  $-3$  V (рис. 3) с частотой следования импульсов  $12.5$  GHz. При обратных смещениях менее  $1$  V скорость выноса носителей недостаточна для удовлетворения необходимого требования  $\tau_{abs} < \tau_R$  для существования синхронизации мод, где  $\tau_{abs}$  — время жизни носителей в секции поглотителя, а  $\tau_R$  — время полного обхода резонатора. Наименьшая длительность импульса достигалась при токах накачки, близких к пороговому, и обратном смещении  $-2$  V. Длительность импульса на полувисоте была вычислена по измеренной автокорреляционной функции (рис. 3) и в предположении гауссовой формы импульса составила  $10$  ps. Увеличение обратного смещения приводит к разрушению режима пассивной синхронизации мод, лазер излучает в непрерывном режиме. Это связано со сдвигом линии генерации в длинноволновую область спектра, где модуляция погло-

шения непросветленного и просветленного состояний насыщающегося поглотителя недостаточна для синхронизации мод.

Таким образом, на основе структуры, содержащей 10 слоев связанных квантовых точек, были созданы двухсекционные лазеры, в которых для реализации ПСМ достаточно подавать малое обратное смещение на секцию поглотителя. Величина поглощения как для ТЕ-, так и для ТМ-моды превышает  $50 \text{ cm}^{-1}$ , что достаточно для модуляторов, используемых в линиях ВОЛС. В отличие от структуры с несвязанными слоями квантовых точек, где ТМ-поляризацией можно пренебречь, интенсивности люминесценции и коэффициенты поглощения ТЕ- и ТМ-поляризации в сверхрешетке квантовых точек сопоставимы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 08-02-01317-а).

## Список литературы

- [1] *Kovsh A.R., Ledentsov N.N., Mikhlin S.S., Zhukov A.E., Lishits D.A., Maleev N.A., Maximov M.V., Ustinov V.M., Gubenko A.E., Gadjiyev I.M., Portnoi E.L., Wang J.S., Chi J., Ouyang D., Bimberg D., Lott J.A.* // Proc. of SPIE. 2004. V. 5349. P. 31–45.
- [2] *Соболев М.М., Портной Е.Л., Гаджиев И.М., Бакшаев И.О., Михлин В.С., Неведомский В.Н., Буяло М.С., Задиранов Ю.М.* // ФТП. 2009. Т. 26. В. 4. С. 512.
- [3] *Erneux T., Viktorov E.A., Mandel P., Piwonski T., Huyet G., Houlihan J.* // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 94. P. 113 501.
- [4] *Avrutin E.A., Chebunina I.E., Eliachevitch I.A., Gurevich S.A., Portnoi M.E., Stengel G.E.* // Semicond. Sci. Technol. 1993. V. 8. P. 80–87.
- [5] *Toshio Saito, Hiroji Ebe, Yasuhiko Arakawa, Takaaki Kakitsuka, Mitsuru Sugawara* // Phys. Rev. B. 2008. V. 77. P. 195 318.
- [6] *Соболев М.М., Гаджиев И.М., Бакшаев И.О., Неведомский В.Н., Буяло М.С., Задиранов Ю.М., Портной Е.Л.* // ФТП. 2011. Т. 44. С. 1095.
- [7] *Соболев М.М., Васильев А.П., Неведомский В.Н.* // ФТП. 2010. Т. 44. В. 6. С. 790.
- [8] *Nikolaev V.V., Averkiev N.S., Sobolev M.M., Gadzhiyev I.M., Bakshaev I.O., Buyalo M.S., Portnoi E.L.* // Phys. Rev. B. 2009. V. 80. P. 205 304.
- [9] *Gubenko A., Livshits D., Krestnikov I., Mikhlin S., Kozhukhov A., Kovsh A., Ledentsov N., Zhukov A., Portnoi E.* // Electron. Lett. 2005. V. 41. P. 1124.