

07:09

## **Ширина линии радиочастотного спектра в лазерах на квантовой яме с пассивной синхронизацией мод**

© М.С. Буяло, И.М. Гаджиев, И.О. Бакшаев, Е.Л. Портной

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: mikhail.buyalo@gmail.com

Поступило в Редакцию 13 сентября 2012 г.

Проведено исследование стабильности частоты следования импульсов, излучаемых полупроводниковыми лазерами в режиме пассивной синхронизации мод. Экспериментально показано, что уменьшение интеграла перекрытия квантово-размерного активного слоя с волноводной модой и увеличение времени захвата носителей на излучающий уровень приводит к сужению ширины линии радиочастотного спектра.

Источники высокочастотного стабильного оптического излучения востребованы в таких приложениях, как преобразование частот [1], генерирование импульсов синхронизации [2], оптическая мультиплексная передача данных [3].

Одним из основных методов получения микроволнового оптического сигнала является смешение излучения от двух одночастотных лазеров на нелинейном элементе [4]. К недостаткам этого метода следует отнести то, что линия оптического спектра сильно зависит от температуры и сложно достичь фазовой синхронизации двух лазеров, необходимой для получения узкой линии сигнала разностной частоты. Для преодоления последней проблемы используются методы частотной синхронизации, фазовой синхронизации с обратной связью, которые, хотя и сужают линию с 1–50 МГц до единиц Нз, значительно усложняют конструкцию приборов.

Другим методом является генерация пикосекундных импульсов полупроводниковыми лазерами в режиме пассивной синхронизации мод (ПСМ). Простейшим способом реализации ПСМ является монолитно-интегрированная двухсекционная конструкция лазера. В ней усиливающая и поглощающая части волновода разделены электрически,

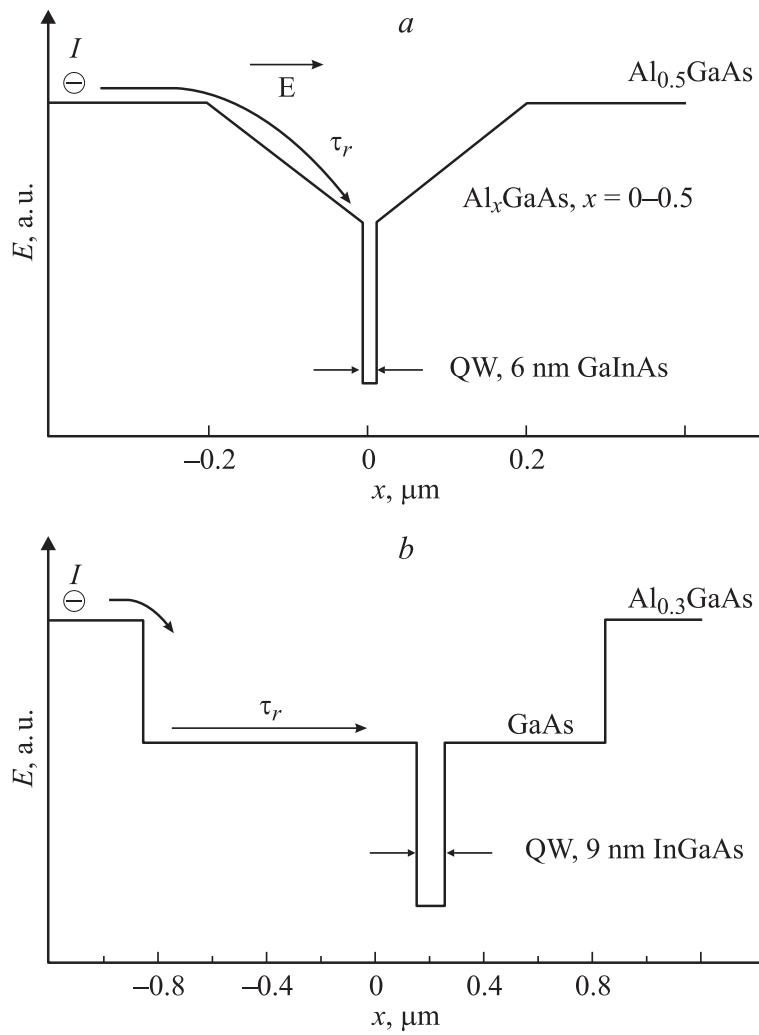
при этом секция поглотителя управляется приложением внешнего смещения. Отличительной особенностью режима ПСМ является то, что частота следования импульсов не зависит от тока накачки и определяется конструкцией резонатора лазера. Дополнительным преимуществом двухсекционной конструкции является возможность использования монолитно-интегрированной секции поглотителя лазера с ПСМ в качестве оптоэлектронного преобразователя оптического излучения лазера в микроволновое излучение [5].

Для многих технических приложений, в том числе для преобразования частот и формирования несущей частоты, необходима высокая стабильность частоты следования импульсов. Стабильность следования световых импульсов лазера с ПСМ можно оценить по ширине линии первой гармоники радиочастотного спектра  $\Delta F_{FWHM}$  в режиме свободной генерации или отношению  $\Delta F_{FWHM}$  к частоте синхронизации мод  $F_{ML}$ . Величина интеграла перекрытия активной области с волноводной модой определяет долю спонтанных фотонов в излучении лазера, а также быстрое насыщение усиления и соответственно малое дифференциальное усиление [6]. Эти факторы определяют величину шумов в резонаторе лазера и соответственно стабильность режима ПСМ.

В данной работе проводится экспериментальное исследование влияния фактора оптического ограничения  $\Gamma$  на стабильность режима ПСМ. В качестве материала для лазеров были выбраны структуры на основе одной квантовой ямы (КЯ), поскольку, подбирая толщины волновода и ямы, можно с высокой точностью определить фактор оптического ограничения.

Были исследованы два типа лазерных структур, отличающихся дизайном волновода. Структура с узким волноводным слоем была сформирована из одиночной КЯ  $\text{In}_{0.2}\text{GaAs}$  шириной 6 nm, заключенной в волновод переменного состава  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , где  $x$  меняется от 0 на границе с КЯ до 0.5, ширина волновода составляла  $0.4 \mu\text{m}$  (рис. 1, *a*). Длина волны излучения лазеров была вблизи  $0.98 \mu\text{m}$ . Для исследований были выбраны лазеры двухсекционной конструкции с длиной резонатора 0.8 и 2 mm, длина секции поглотителя составляла 10–15% длины лазера.

Лазеры на основе КЯ в широком волноводе были изготовлены из гетероструктуры  $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}/\text{InGaAs}$  с одной напряженной КЯ  $\text{In}_{0.26}\text{GaAs}$  толщиной 9 nm, расположенной асимметрично относительно центра волновода, что обеспечивало генерацию только фундаментальной моды [7] при ширине волновода  $1.7 \mu\text{m}$  (рис. 1, *b*). Максимум длины



**Рис. 1.** Схематическое изображение зонных структур для лазеров с узким (a) и широким волноводом (b).

волны излучения лежал в диапазоне 1062–1067 nm. Двухсекционные лазеры с длиной резонатора 3 mm и секцией поглотителя 0.3 mm были изготовлены стандартными литографическими методами, с шириной полоска 5  $\mu\text{m}$  и глубиной мезы, при которой исключалась генерация мод высшего порядка. В лазерах на основе структуры с широким волноводом на зеркало со стороны усиливающей секции наносилось антиотражающее покрытие, зеркало со стороны поглотителя было получено методом скола. Лазеры были napаяны на медный теплоотвод.

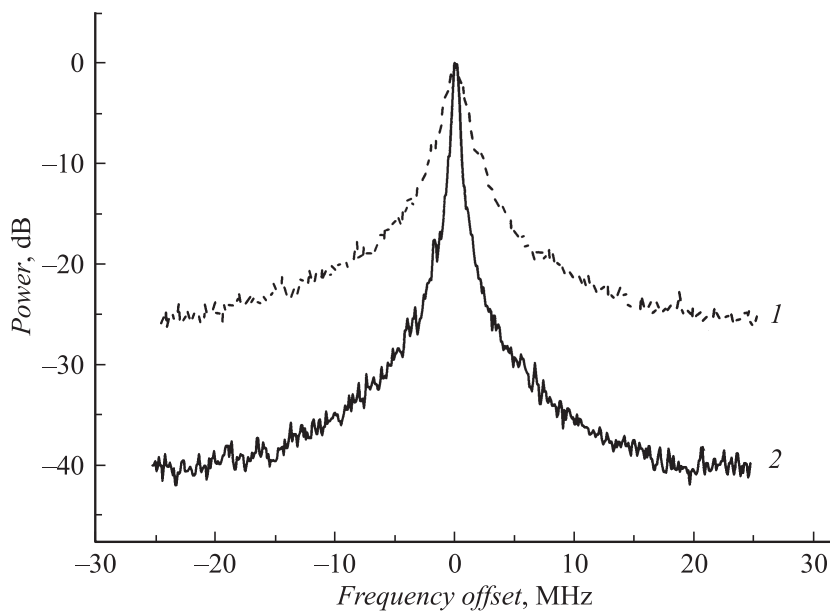
Излучение с лазерного диода вводилось в оптическое одномодовое волокно с торцом APC-типа, затем поступало на фотоприемник (частотный диапазон 25 GHz), с которого электрический сигнал обрабатывался спектроанализатором с диапазоном 24 GHz. Контроль измерений осуществлялся с помощью 50 GHz двухканального осциллографа и автокоррелятора на основе интерферометра Майкельсона. Измерения проводились при комнатной температуре.

Режим ПСМ во всех типах лазеров наблюдался при постоянном токе накачки и различных обратных смещениях. В лазерах с узким волноводом он наблюдался при токах, незначительно превышающих пороговый ток  $I_{th}$  и при малом обратном смещении  $V_{rev}$  на секции поглотителя  $-1 - -2.5$  V. При уменьшении  $V_{rev}$  доля несинхронизованных мод в излучении лазера увеличивалась, что приводило к излучению импульсов в режиме пассивной модуляции добротности (ПМД) при нулевых и положительных смещениях поглотителя. Длительность импульсов  $\Delta t$  в режиме ПСМ составляла 3.9 ps, ширина оптического спектра 0.9 nm, что дает произведение длительности импульсов на частотную ширину спектра  $\Delta t \Delta f$  около 0.75 при теоретическом минимуме 0.44.

На рис. 2, линия 1, представлен типичный радиочастотный спектр излучения лазера. Наилучшая ширина линии, достигнутая в лазерах с узким волноводным слоем, составляла 1 MHz, что означает стабильность следования импульсов на уровне  $5 \cdot 10^{-5}$ .

Таким образом, лазеры с большим коэффициентом оптического ограничения могут излучать в режимах как ПМД, так и ПСМ; при этом ширина радиочастотного спектра остается не ниже 1 MHz во всей области существования полной синхронизации мод.

Лазеры с широким волноводным слоем излучали в режиме ПСМ при обратных смещениях более 9 V, соответствующих напряженности поля  $5 \cdot 10^4$  V/cm, при котором скорость выноса носителей уже насы-



**Рис. 2.** Радиочастотные спектры лазеров с ПСМ: 1 — лазер с узким волноводом, частота следования импульсов  $F_{ML} = 21.3$  GHz, ширина радиочастотной линии  $\Delta F = 1$  MHz; 2 — лазер с широким волноводом,  $F_{ML} = 12.3$  GHz,  $\Delta F = 20$  kHz.

щена. Исследование спектра поглощения в этих лазерах, проведенное в работе [8], показало, что необходимость прикладывать большие обратные смещения для достижения ПСМ вызвана сильным эффектом сужения зоны и экситонным характером поглощения, сохраняющимся при высоких электрических полях.

Режим ПМД, характерный для лазеров с узким волноводом, в лазерах с широким волноводом отсутствовал во всем диапазоне токов накачки и обратных смещений. Узкий оптический спектр (0.6 nm) обуславливает теоретически минимальную длительность импульсов  $\Delta\tau = 2.8$  ps в режиме ПСМ в предположении гауссовой формы импульсов. Измеренная длительность импульсов минимальна на пороге генерации режима ПСМ и составляет 5.2 ps. Исходя из этого, произведение

Характеристики лазеров с широким и узким волноводным слоем

| Тип структуры               | $\Gamma_{str}$ , % | $\tau_r$ , ps |
|-----------------------------|--------------------|---------------|
| С узким волноводным слоем   | 2                  | 10            |
| С широким волноводным слоем | 0.7                | 200           |

$\Delta t \Delta f$  на пороге генерации в режиме ПСМ равно 0.88, что достаточно близко к минимально возможному значению.

Ширина радиочастотной линии в лазерах с широким волноводным слоем в противоположность длительности импульсов уменьшается с ростом тока накачки до 20 kHz (рис. 2, линия 2), таким образом, отношение  $\Delta F_{FWHM}/F_{ML} \approx 1.7 \cdot 10^{-6}$ . Этот результат превосходит рекордное значение ширины радиочастотной линии в 30 kHz, полученной для лазера InGaAsP/InP на одной КЯ [9].

На основании данных о лазерных структурах был проведен расчет  $\Gamma$  для структур с КЯ (см. таблицу,  $\Gamma_{str}$ ). Было измерено поглощение лазерных структур в волноводе методом абсорбционной спектроскопии [10,11] первого оптического перехода, составившее 88 и  $230 \text{ cm}^{-1}$  для широкого и узкого волноводного слоя соответственно. Отсюда значение поглощения для материала составляет порядка  $1.1 - 1.3 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$ , что хорошо согласуется с литературными данными [12].

Широкий волновод обуславливает меньший коэффициент оптического ограничения по сравнению с узким волноводом. Это приводит к уменьшению доли спонтанных шумов в оптической моде. Соответственно уменьшаются шумы, сбивающие процесс синхронизации мод, что приводит к узкой линии радиочастотного спектра.

Еще одним следствием широкого волноводного слоя является длительное время транспорта инжектированных носителей  $\tau_r$  в КЯ. В случае лазеров с широким волноводом  $\tau_r$  является временем диффузии дырок в КЯ, которое оценивается в 200 ps (см. таблицу,  $\tau_r$ ). В лазерах с узким волноводом  $\tau_r$  определяется дрейфом дырок во встроенном электрическом поле волновода и составляет порядка 10 ps (см. таблицу). Длительное время транспорта носителей приводит к сильному коэффициенту подавления усиления. Соответственно уменьшаются шумы, связанные с автопульсациями [13].

Следует отметить, что в лазерах с активной областью, состоящей из квантовых точек, интеграл перекрытия активной области с волноводным слоем составляет десятые доли процента, а процесс релаксации носителей на основной уровень затруднен в силу пространственного ограничения носителей по всем трем направлениям и конечного количества квантовых точек. Это приводит к еще большему усилению эффектов, рассмотренных выше, и соответственно к ширинам линии вплоть до субкилогерцовых значений [14].

Таким образом, уменьшение коэффициента оптического перекрытия и времени доставки инжектированных носителей на основной уровень за счет увеличения ширины волновода в лазерах на квантовых ямах приводит к значительному улучшению стабильности частоты следования импульсов. Лазеры с пассивной синхронизацией мод, реализуемой за счет монолитно-интегрированных секций усилителя и насыщающегося поглотителя, могут быть использованы как генераторы импульсного оптического излучения микроволнового диапазона частот для решения практических задач микроволновой фотоники.

## Список литературы

- [1] Portnoi E.L., Gorfinkel V.B., Avrutin E.A. et al. // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics. 1995. V. 1. P. 451–460.
- [2] Delfyett P.J., Hartman D.H., Ahmad S.Z. // J. Lightwave Technology. 1991. V. 9. P. 1646–1649.
- [3] Jiang L.A., Ippen E.P., Yokoyama H. // J. Optical and Fiber Communications Research. V. 2. P. 1–31.
- [4] Seeds A.J., Williams K.J. // J. Lightwave Technology. 2006. V. 24. P. 4628–4641.
- [5] Lin C.-Y., Xin Y.-C., Kim J. et al. // IEEE Photonics J. 2009. V. 1 P. 236–244.
- [6] Capua A., Rozenfeld L., Mikhelashvili V. et al. // Opt. Expr. 2007. V. 15. P. 5388–5393.
- [7] Vinokurov D.A., Zorina S.A., Kapitonov V.A. et al. // Semiconductors. 2005. V. 39. P. 370–373.
- [8] Гаджиев И.М., Буяло М.С., Башаев И.О. и др. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 22. С. 29–36.
- [9] Merghem K., Akrouf A., Martinez A. et al. // Optics express. 2008. V. 16. P. 10675–10683.
- [10] Соболев М.М., Гаджиев И.М., Бакиаев И.О. и др. // ФТП. 2009. Т. 43. В. 4. С. 512–516.

- [11] *Бакшаев И.О.* Автореф. канд. дис. ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2011.
- [12] *Hirayama Y., Choi W.-Y., Peng L.H., Fonstad C.G.* // *APL*. 1993. V. 74. P. 570–578.
- [13] *Avrutin E.A., Portnoi E.L.* // *Optical and Quantum Electronics*. 2008. V. 40. P. 655–664.
- [14] *Kefelian F., O'Donoghue S., Todaro M.T.* et al. // 2007. *ECLEO and IQEC*. 2007. V. 31. P. 1–1.