

УДК 536.5:621.373.8

АВТОМОДУЛЯЦИЯ В ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРАХ С НАСЫЩАЮЩИМСЯ ПОГЛОТИТЕЛЕМ С РАБОЧЕЙ ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 786 нм

А. А. Анашков, Г. В. Белокопытов, А. С. Ларькин

(кафедра колебаний)

E-mail: gvb@phys.msu.ru

Методом электронно-оптической хронографии изучен режим автомодуляции в инжекционных лазерах с насыщающимся поглотителем, излучающих свет с длиной волны 786 нм. В исследованных образцах возбуждение импульсов излучения происходило на одной моде, а структура ближнего поля не претерпевала изменений за время генерации импульса. При увеличении тока накачки в пределах от 20 до 32 мА частота повторения световых импульсов зависела от тока накачки приблизительно по логарифмическому закону и варьировалась в пределах 1–2.6 ГГц.

Введение

Полупроводниковые инжекционные лазеры (ИЛ) с насыщающимся поглотителем (НП) могут работать в режиме автомодуляции, генерируя свет в виде периодической последовательности коротких импульсов. Их применение перспективно в оптических системах передачи и хранения информации, в частности в устройствах считывания DVD, где они обеспечивают большее отношение сигнал/шум, чем ИЛ, работающие в режиме непрерывной генерации [1, 2].

Настоящая работа посвящена исследованию динамики пространственной структуры и спектра излучения ИЛ с НП, работающих на длине световой волны 786 нм.

Образцы

Лазеры с НП, способные генерировать импульсы с длительностью в сотни и десятки пикосекунд в широком интервале рабочих токов и температур, получают путем имплантации тяжелых ионов высоких энергий (10^6 – 10^7 эВ) в область, непосредственно прилегающую к активной области ИЛ [3].

Исследованные образцы имели пороговый ток 20 ± 0.4 мА, крутизна их ватт-амперной характеристики составляла около 0.8 мВт/мА. Генерация света в режиме автомодуляции имела место в интервале токов от порогового значения до величины, которая у одной партии образцов составляла 23 мА, а у второй превышала 40–45 мА.

ИЛ заключались в стандартный цилиндрический корпус 5.6 мм, где наряду с лазерным диодом располагался также фотодиод, позволявший осуществлять контроль уровня оптической мощности.

Методика эксперимента

Наблюдение динамики излучающей области и текущих спектров излучения ИЛ с НП проводилось с помощью метода электронно-оптической хронографии [4]. Суть метода состоит в том, что изображение исследуемого объекта проецируется на фотока-

меру времяанализирующего электронно-оптического преобразователя (ЭОП) типа УМИ-93. Далее оно воспроизводится на экране ЭОП и разворачивается во времени при подаче импульсных напряжений на его управляющие электроды.

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В установке был использован ряд узлов и технических решений, разработанных в [5]. Ход лучей, изображенный на рисунке, соответствует эксперименту по регистрации динамики спектра. При этом излучение ИЛ фокусировалось на микрометрической щели и далее подвергалось анализу с помощью спектрографа. Регистрация спектров производилась во втором порядке дифракционной решетки при развертке хронографа с длительностью 22 нс. Величина разрешающей способности и обратной линейной дисперсии составляли $9 \cdot 10^{-3}$ нм и 1 нм/мм соответственно.

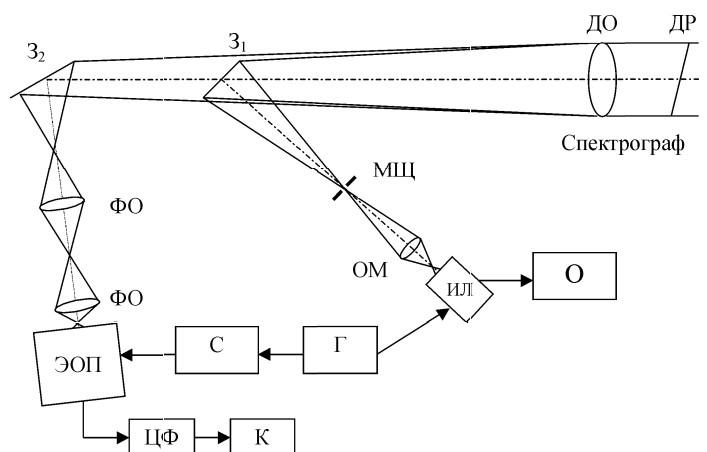


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки при регистрации динамики спектра ИЛ с НП. Обозначения: ИЛ — инжекционный лазер; ОМ — объектив микроскопа (10 × 0.3); МЩ — микрометрическая щель, расположенная во входной фокальной плоскости спектрографа; З₁ и З₂ — плоские зеркала, ФО — фотообъектив, ЭОП — времяанализирующий электронно-оптический преобразователь УМИ-93, ЦФ — цифровая фотокамера, К — персональный компьютер, Г — генератор импульсов накачки, С — блок синхронизации генератора и ЭОП, О — осциллограф для контроля тока накачки

При регистрации динамики ближнего поля излучения спектрограф исключался из оптической схемы. Изображение излучающей области проектировалось на вход ЭОП с помощью объектива микроскопа и трех плоских зеркал, предназначенных для увеличения длины оптического пути. Полное увеличение линейных размеров в системе составляло около 10^4 раз. Паспортное значение предельного временного разрешения фотоэлектронного преобразователя УМИ-93 составляло 10^{-11} с. Однако при проектировании излучающей области на вход ЭОП с большим увеличением фактически достижимое временное разрешение существенно ухудшалось из-за конечных размеров светового пятна.

Для регистрации хронограмм использовалась цифровая фотокамера Canon S50, что давало возможность проводить цифровую обработку полученных изображений. На лазер подавались импульсы накачки длительностью 200 нс, амплитуду которых можно было изменять от 10 до 100 мА. Частота повторения импульсов накачки могла варьироваться в пределах 0.4–50 Гц. Для наблюдения хронограмм обычно выбиралась частота повторения 0.4 Гц. Их регистрация производилась обычно через 100 нс после начала импульса накачки. Это позволяло считать завершенными все нестационарные переходные процессы, связанные с включением накачки, кроме процессов тепловой релаксации.

Для исследования влияния температуры на автомодуляцию в экспериментальной установке использовалась система стабилизации температуры ИЛ [6]. Конструкция блока теплоотвода была модифицирована для работы с имевшимися образцами. Корпус ИЛ крепился в медном теплоотводящем элементе, рядом с которым располагался датчик температуры. Теплоотводящий элемент был припаян на поверхности термоэлектрического микрохолодильника. Другая поверхность микрохолодильника была припаяна к медному радиатору. Уход рабочей температуры лазера при включенной системе терморегулирования составлял не более 5 мК.

Экспериментальные результаты. В проведенных экспериментах изучались временные развертки картины ближнего поля и текущего спектра. Фотографии полученных картин для одного из лазеров представлены на рис. 2 и 3. Развертка по горизонтальной оси приблизительно пропорциональна времени. Отрезок, характеризующий временной масштаб развертки, указан лишь в качестве ориентира. Искривление траектории и нелинейность развертки обусловлена особенностями схемной реализации блока управления электронно-оптического преобразователя. Для учета влияния нелинейности развертки на точность измерения временных интервалов применялась процедура калибровки. Она состояла в фиксации хронограмм ближнего поля серийного ИЛ с длиной волны 646 нм, ток накачки которого модулировался по гармоническому закону с известной частотой, по

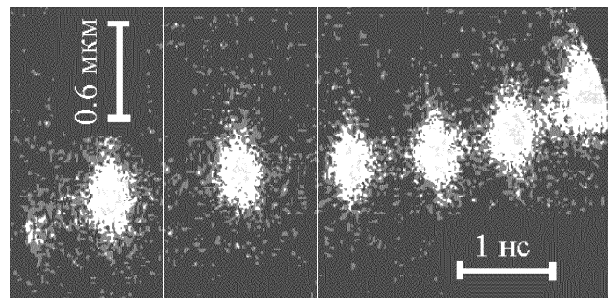


Рис. 2. Динамика излучающей области инжекционного лазера с насыщающимся поглотителем ($I = 22$ мА)

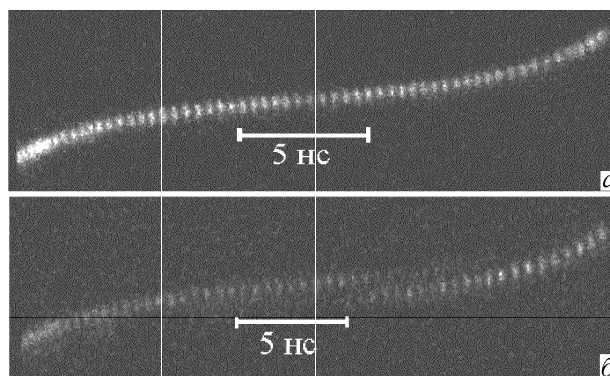


Рис. 3. Динамика спектра ИЛ с насыщающимся поглотителем: а — одномодовая генерация, б — переключение на соседнюю продольную моду

которым строилась калибровочная кривая развертки хронографа. По вертикальной оси отклонение пропорционально координате вдоль излучающего перехода соответствующей точки выходного зеркала (рис. 2) и длине волны (рис. 3). Интенсивность света на хронограммах первого типа пропорциональна яркости ближнего поля, а на хронограммах второго типа — спектральной плотности излучения.

Длительность импульсов была оценена сверху при наблюдении динамики ближнего поля на самой быстрой развертке хронографа (2.5 нс). Она составляла не более 150–200 пс. При значениях тока накачки, близких к верхней границе автомодуляции, засветка между максимумами интенсивности излучения увеличивалась, что свидетельствует о переходе от генерации хорошо разрешимых импульсов к непрерывным пульсациям.

Наблюдения картины ближнего поля показали, что за время импульса излучения пространственная структура светового поля на выходной грани ИЛ не претерпевала видимых изменений. Изучение динамических спектров позволило установить, что в подавляющем большинстве случаев излучение ИЛ, работавшего в режиме автомодуляции, было одномодовым. В некоторых случаях, при уровне накачки вблизи порога возбуждения, генерация в режиме автомодуляции происходила на двух соседних продольных модах и сопровождалась нестационарным изменением интенсивности спектральных линий (рис. 3, б). Судя по всему, рис. 3, б отражает

процесс переключения генерации, вызванный нестационарным нагревом активного элемента.

Одномодовый характер излучения в режиме автомодуляции и отсутствие перераспределения интенсивности свечения в ближнем поле дают основания считать, что механизм автомодуляции и динамику генерации исследованных лазеров адекватно представляет модель, описывающая связанные процессы релаксации трех величин: концентрации носителей в активной области и в области насыщающегося поглотителя и числа фотонов в резонаторе. Такая модель, основанная на скоростных уравнениях, была обоснована применительно к ИЛ с НП в работе [7], удобный обзор ее современной формулировки дан в работе [8].

На частоту автомодуляции ИЛ с НП оказывают существенное влияние два фактора: ток накачки и рабочая температура. У исследованных образцов с увеличением тока накачки в пределах от 20 до 32 мА частота автомодуляции возрастала от 1 до 2.6 ГГц.

Зависимости частоты автомодуляции от тока накачки, полученные при различных температурах, представлены на рис. 4. Приблизительно линейная зависимость между частотой автомодуляции f и током накачки I_p находится в согласии с элементарным анализом [7]. Можно упрощенно полагать, что плотность носителей в активной области во время промежутка между импульсами изменяется от значения, достигаемого при стационарном токе накачки ($I_0 - \Delta I$) до значения, соответствующего стационарной накачке I_0 , где I_0 — пороговый ток лазера с насыщающимся поглотителем, а $(I_0 - \Delta I)$ — пороговый ток такого же лазера, но с «выключенным» поглотителем. Тогда справедлива формула

$$f = \frac{\tau_a^{-1}}{\ln \left[1 + \frac{\Delta I}{I_0} \frac{I_0}{I_p - I_0} \right]} \approx \frac{I_p - I_0}{\tau_a \Delta I}, \quad (1)$$

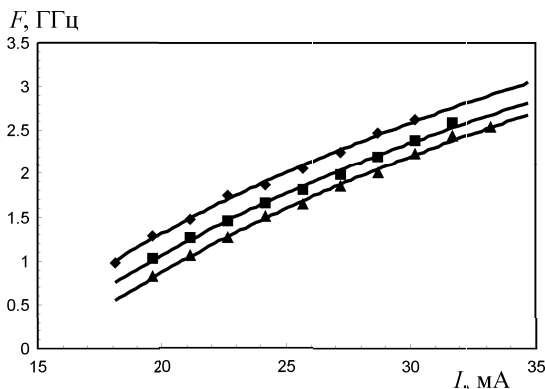


Рис. 4. Зависимость частоты автомодуляции инжекционного лазера с насыщающимся поглотителем от тока накачки при различных рабочих температурах. Треугольники — 24.5°C, квадраты — 16.5°C, ромбы — 8.5°C (логарифмическая аппроксимация)

где τ_a — время жизни электронов в активной области. Однако в действительности динамика релаксации заряда в ИЛ с НП оказывается более сложной [8], и применение формулы (1) к результатам эксперимента дает лишь грубые оценки параметров τ_a и ΔI : $\tau_a \sim 10^{-9}$ с, $\Delta I/I_0 < 0.5$.

Зависимость частоты автомодуляции от температуры наблюдалась ранее в работах [1, 2]. Наблюдения производились при постоянном среднем уровне световой мощности [1] или при фиксированном отношении тока накачки к пороговому значению [2] и носили в основном качественный характер. При повышении температуры от комнатной до 60–80°C был отмечен рост частоты автомодуляции. При понижении температуры от комнатной до –70°C частота автомодуляции изменялась слабо [2], причем температурный коэффициент частоты повторения был положительным $(df/dT)_{I/I_0} > 0$. В ИЛ, изученных в настоящей работе, в отличие от [2], понижение рабочей температуры от 24.5 до 8.5°C приводило к заметному увеличению частоты автомодуляции — на 0.4 ГГц, что соответствует $df/dT \approx -25$ МГц/К. Даже если учесть уменьшение порогового тока с понижением температуры, в нашем эксперименте величина $(df/dT)_{I/I_0}$ оказалась отрицательной, что было следствием различия в составе НП.

Заключение

Одномодовый характер излучения в режиме автомодуляции и отсутствие перераспределения интенсивности свечения в ближнем поле дают основания считать, что механизм автомодуляции и динамику генерации адекватно описывает модель [7, 8], основанная на скоростных уравнениях.

На частоту автомодуляции ИЛ с НП оказывают существенное влияние два фактора: ток накачки и рабочая температура. Было показано, что с увеличением тока накачки в пределах от 20 до 32 мА частота автомодуляции возрастала от 1 до 2.6 ГГц. При понижении рабочей температуры лазера на 16°C частота автомодуляции, измеренная при неизменной величине тока накачки, увеличивалась на 0.4 ГГц.

Авторы выражают благодарность Г.Т. Паку за предоставленные образцы инжекционных лазеров, Б.Ю. Терлецкому за помощь в эксперименте и А.С. Логгинову и И.И. Виноградову за полезные обсуждения.

Литература

1. Kidoguchi I., Adachi H., Kamiyama S. et al. // IEEE J. of Quant. Electr. 1997. **33**, N 5. P. 831.
2. Summers H.D., Molloy S.H., Smowton P.M. et al. // IEEE J. of Selected Topics in Quant. Electr. 1999. **5**, N 3. P. 745.
3. Венус Г.Б., Гаджиев И.М., Губенко А.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. **25**, № 13. С. 4.

4. Бутслов М.М., Степанов Б.М., Фанченко С.Д. Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. М., 1978.
5. Виноградов И.И. Динамика излучения многоэлементных инжекционных лазеров. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1991.
6. Ларькин А.С., Белокопытов Г.В., Терлецкий Б.Ю. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2003. № 6. С. 46.
7. Dixon R. W., Joice W.B. // IEEE J. of Quant. Electr. 1979. **15**, N 6. P. 470.
8. Carr T.W., Erneux T. // IEEE J. of Quant. Electr. 2001. **37**, N 9. P. 1171.

Поступила в редакцию
11.03.05