

Исследование ширины спектра межмодовых биений и оптического спектра мод при их активной синхронизации в трехзеркальном полупроводниковом лазере

В.Ф.Захарьяш, А.В.Каширский, В.М.Клементьев, С.А.Кузнецов, В.С.Пивцов

Экспериментально исследованы различные режимы генерации полупроводникового лазера при активной синхронизации мод. Найдены два типа режимов, при которых достигается минимальная ширина спектра межмодовых биений (~ 3.5 кГц). Исследованы ширины оптического спектра мод в зависимости от режимов их синхронизации и коэффициентов обратной связи. Получена максимальная ширина спектра ~ 3.7 ТГц.

Ключевые слова: активная синхронизация мод, полупроводниковый лазер, обратная связь, СВЧ накачка.

1. Введение

В последнее время появились новые возможности для создания систем синтеза частот от радио до оптического диапазона. Для этой цели широко применяются фемтосекундные лазеры с синхронизацией мод, генерирующие широкий спектр частот [1–3]. Межмодовая частота лежит в микроволновой области спектра, а разность частот произвольных мод может достигать сотен терагерц [3]. При стабилизации межмодовой и оптической частот лазера создается возможность абсолютных измерений частот в различных диапазонах с высокой степенью точности. С точки зрения синтеза частот представляют также интерес полупроводниковые лазеры, имеющие сравнительно широкую линию усиления, возможность работы в режиме синхронизации мод и соответственно возможность получения сверхкоротких импульсов [4–13]. Особый интерес вызывает применение полупроводниковых лазеров для синтеза частот в радио и дальнем ИК диапазонах, когда необходимы один или два лазера.

Однако применение полупроводниковых лазеров для указанных целей требует дальнейших исследований, в особенности это относится к полупроводниковым лазерам, работающим в режиме активной синхронизации мод. В этом случае необходимо исследовать возможность получения высокостабильных сверхкоротких импульсов и режимов работы, при которых достигаются оптимальные условия для генерации набора эквидистантных частот.

В настоящей статье представлены результаты дальнейших исследований работы полупроводникового лазера, описанного в [5].

2. Методика эксперимента и результаты исследований

Методика экспериментов основана на исследовании поведения спектра межмодовых биений в зависимости от

следующих факторов: отстройки частоты СВЧ генератора накачки от межмодовой частоты, параметра накачки $r = (I - I_{th})/I_{th}$ (где I – ток накачки, I_{th} – пороговый ток лазера) и коэффициента связи в трёхзеркальном резонаторе. Кроме того, в экспериментах по исследованию спектра межмодовых биений использовалась частота СВЧ генератора, примерно равная удвоенной межмодовой частоте внешнего резонатора. Поскольку в данном случае имеет место амплитудная модуляция выходного излучения лазера, то при регистрации сигнала приёмником кроме компонент межмодовых биений можно наблюдать сигнал генератора СВЧ накачки. Выбор такой частоты СВЧ накачки позволил избежать перекрытия частоты межмодовых биений (нечётные гармоники) с частотой СВЧ генератора и наблюдать новые режимы синхронизации.

На рис.1 представлена блок-схема экспериментальной установки для исследования режимов работы полупроводникового лазера при активной синхронизации мод. Установка состоит из полупроводникового лазера 1 (коэффициент отражения выходной грани лазера $\sim 3\% - 5\%$) с коллимирующим объективом 2 и внешним зеркалом 3, высокостабильного источника тока 4 (относительная стабильность 10^{-4}), блока термостабилизации 5 (точность 10^{-2}°C), СВЧ генератора накачки 6, СВЧ усилителя

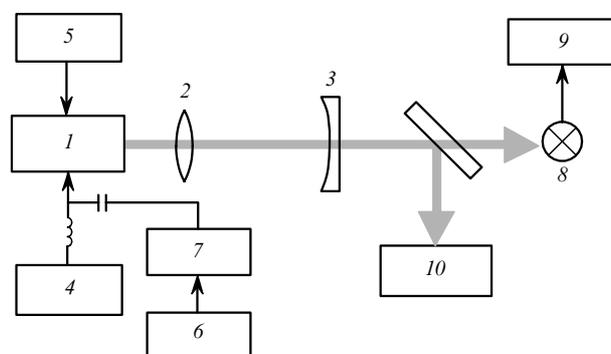


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – полупроводниковый лазер; 2 – коллимирующий объектив; 3 – внешнее зеркало; 4 – источник питания постоянного тока; 5 – блок термостабилизации; 6 – СВЧ генератор; 7 – СВЧ усилитель; 8 – быстроедействующий фотодиод; 9 – анализатор спектра; 10 – анализатор оптического спектра.

В.Ф.Захарьяш, А.В.Каширский, В.М.Клементьев, С.А.Кузнецов, В.С.Пивцов. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: kav@laser.nsc.ru, web-site: http://www.laser.nsc.ru

Поступила в редакцию 24 января 2005 г., после доработки – 7 июля 2005 г.

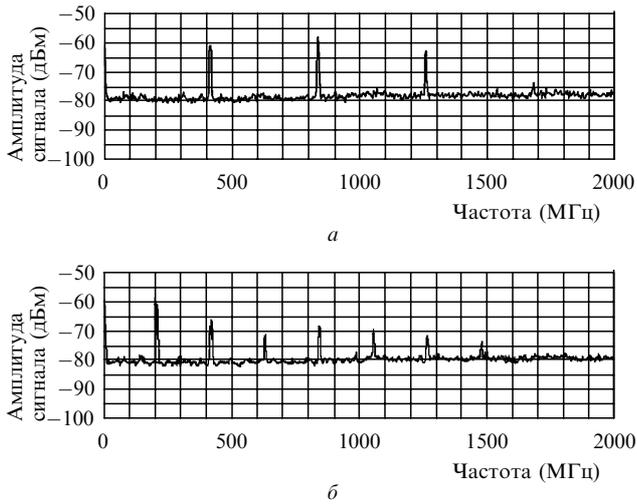


Рис.2. Спектры межмодовых биений при отстройках $\Delta f < 10$ МГц (а) и $\Delta f > 10$ МГц (б).

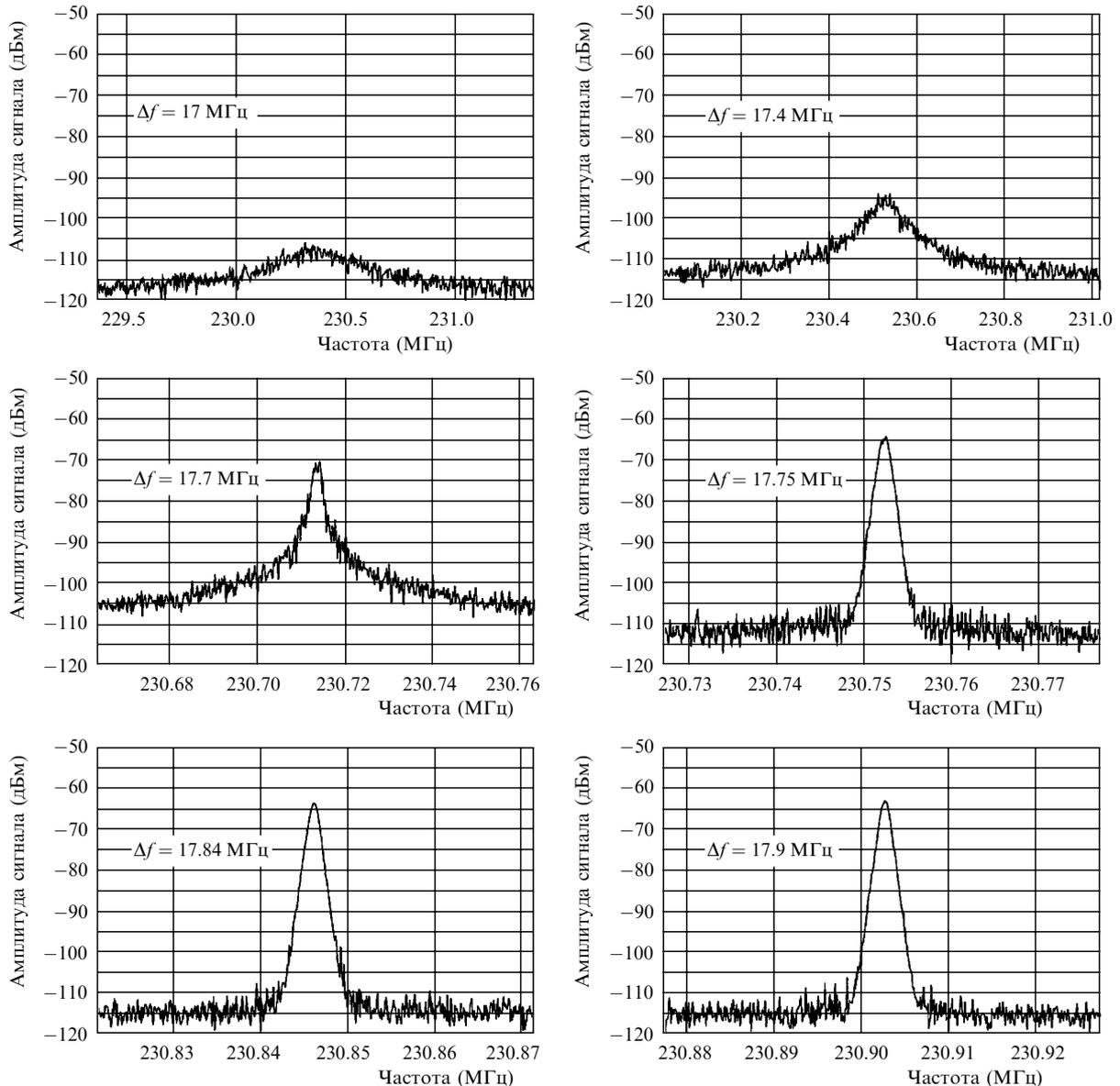


Рис.3. Динамика возбуждения подпороговой моды на частотах kf_{im} при различных отстройках Δf частоты СВЧ генератора f_{mw} от межмодовой частоты f_{im} внешнего резонатора.

теля 7, необходимого для развязки генератора и полупроводникового лазера, быстродействующего фотодиода 8 (рабочая полоса ~ 1.5 ГГц), анализатора спектра 9, а также анализатора оптического спектра 10. Отметим, что в отличие от [6], где используется дифракционная решётка, и от [7], где во внешний резонатор лазера вводятся селективные элементы, в нашем случае применяется неселективная обратная связь, т.е. в полосе усиления полупроводниковой среды коэффициент отражения внешнего зеркала остается практически неизменным. В настоящей работе использовались лазеры ИЛПН-820-100 с пороговым током ~ 58 мА.

Эксперименты проводились при различных параметрах работы полупроводникового лазера и внешнего резонатора, а также при различных мощностях и частотах СВЧ накачки. Предварительные эксперименты показали [5], что интерес представляет область, где параметр накачки r меняется от -0.2 до 0.2 . Для исследования влияния коэффициента связи на ширину спектра межмодовых биений использовались зеркала внешнего резонато-

ра с коэффициентами отражения 0.1, 0.5 и 0.9. Это означает, что параметр связи $T = \tau^2 \rho_m / \rho$ (где τ, ρ – коэффициенты пропускания и отражения выходной грани полупроводникового лазера, ρ_m – коэффициент отражения внешнего зеркала) [7] менялся в широких пределах. В экспериментах межмодовая частота $f_{im} \approx 212.5$ МГц, а частота накачки f_{mw} изменялась в диапазоне 400 – 470 МГц. Были проведены исследования спектров межмодовых биений от отстройки Δf частоты СВЧ генератора относительно межмодовой частоты внешнего резонатора полупроводникового лазера, описываемой выражением

$$\Delta f = \left| \frac{f_{mw}}{n} - f_{im} \right|, \quad (1)$$

где n – целое число.

При различных отстройках Δf частоты f_{mw} от частоты f_{im} возникают разные спектры межмодовых биений. При сравнительно небольших отстройках ($\Delta f = \pm(0 - 10)$ МГц) осуществляется режим первого типа и спектр биений состоит из эквидистантных частот, расположенных на расстоянии f_{mw} (рис.2,а), т.е. частота СВЧ поля определяет частоту генерации. При дальнейшем увеличении отстройки ($\Delta f > 10$ МГц) возникает режим второго типа и в спектре межмодовых биений появляются дополнительные компоненты (рис.2,б), обусловленные наличием подпороговой моды [11]. Спектр биений представляет собой набор эквидистантных частот, интервал между которыми определяется частотой f_{mw} :

$$\frac{f_{mw}}{n} = f'_{im} = \pm(212 - 230) \text{ МГц}, \quad (2)$$

где f'_{im} – новая межмодовая частота с учётом затягивания частоты.

На рис.3 представлена динамика возникновения новых биений при отстройке $\Delta f > 10$ МГц на частотах $\sim kf_{im}$ (где k – нечётное число). Они появляются сначала в виде широкополосного ($\Delta f_{sig} \sim 2 - 0.5$ МГц) зашумленного сигнала, затем по мере увеличения отстройки происходит быстрое сужение спектральной ширины сигнала и рост его амплитуды. Эксперименты показали, что имеются оптимальные значения Δf , образующие некоторый интервал (рис.4), при которых достигается минимальная ширина спектра сигнала $\Delta f_{sig} \sim 3.5$ кГц. С момента возникновения этих биений до достижения минимальной ширины отстройка Δf изменяется в интервале 0.9 МГц. При дальнейшем увеличении отстройки амплитуда сигнала на частотах kf_{im} падает, ширина сигнала растёт и при $\Delta f > 20$ МГц сигнал биений вновь исчезает (на рис.3 это не показано).

На рис.4 приведены зависимости амплитуды и ширины спектра межмодовых биений при различных коэффициентах отражения внешнего зеркала R (различных параметрах связи T). Видно, что при $R = 50\%$ и 90% амплитудные распределения и области с минимальной шириной спектра биений практически совпадают, а при $R = 10\%$ они заметно сдвинуты. Следует, однако, отметить, что в целом положение кривых на рис.4 слабо зависит от параметра связи T .

Замечено, что второй тип спектра межмодовых биений возникает в некотором интервале токов, начиная с I_{min} , при различных коэффициентах отражения внешнего зеркала: при $R = 10\%$ биения появляются при токе $I_{min} = 48$ мА, при $R = 50\%$ – при $I_{min} \sim 57$ мА и при $R = 90\%$ – при $I_{min} \sim 63$ мА.

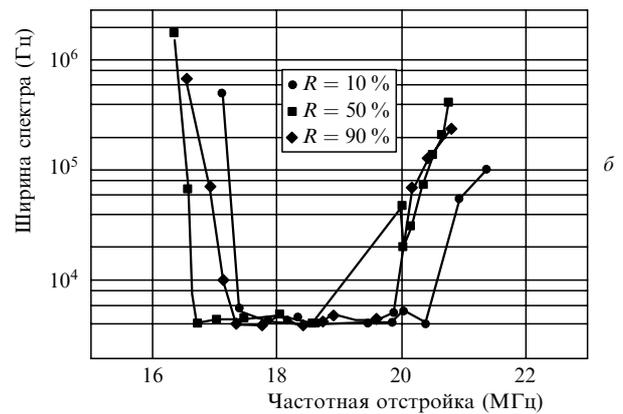
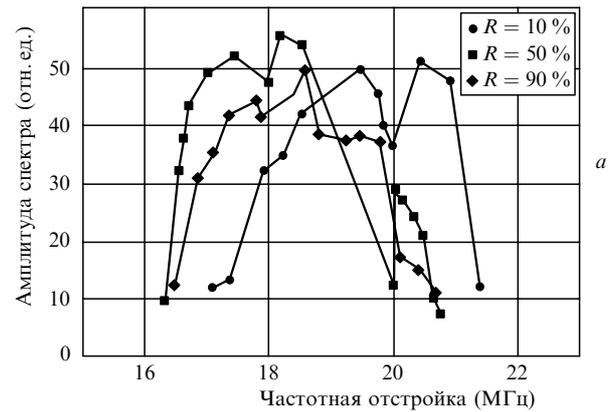


Рис.4. Зависимости амплитуды и ширины спектра межмодовых биений от отстройки Δf частоты СВЧ генератора f_{mw} от межмодовой частоты внешнего резонатора f_{im} .

В ходе экспериментов были исследованы оптические спектры выходного излучения полупроводникового лазера, работающего в режиме синхронизации мод, при различных коэффициентах отражения внешнего зеркала. На рис.5 представлены нормированные спектры выходного излучения полупроводникового лазера, работающего в режиме свободной генерации, а также в режиме активной синхронизации мод, при различных коэффициентах отражения внешнего зеркала. Получено, что в режиме активной синхронизации мод их оптический спектр уширяется в ~ 12 раз – от 0.5 до 6 нм. При этом (рис.5)

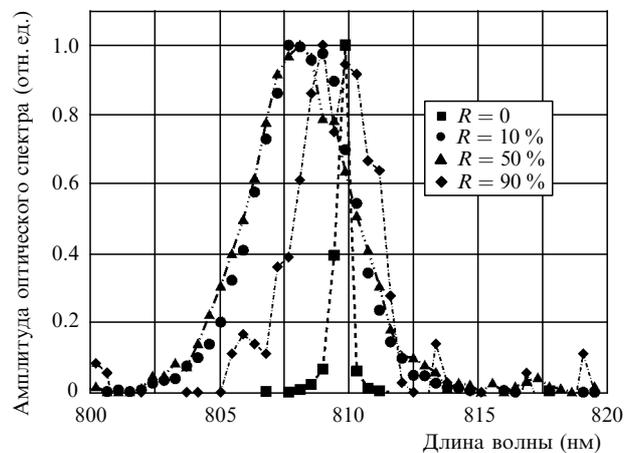


Рис.5. Нормированные оптические спектры выходного излучения полупроводникового лазера в режимах свободной генерации (■) и активной синхронизации мод (●, ▲, ◆) при различных коэффициентах отражения внешнего зеркала.

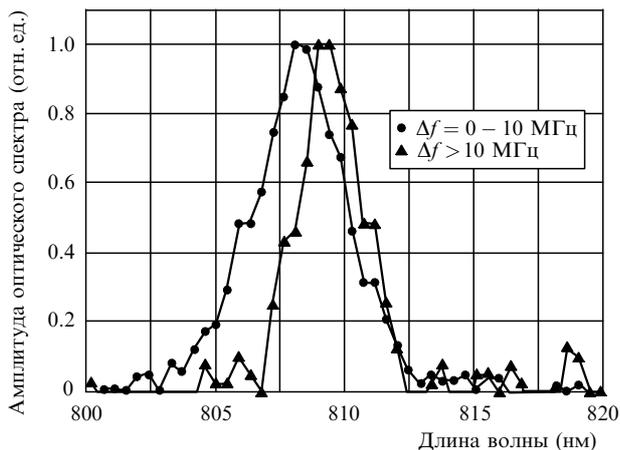


Рис.6. Нормированные оптические спектры выходного излучения полупроводникового лазера в режиме активной синхронизации мод при различных отстройках Δf частоты СВЧ генератора накачки f_{mw} от межмодовой частоты внешнего резонатора f_{im} .

максимальная ширина спектра достигается при использовании внешних зеркал с коэффициентами отражения 50 % и 10 %.

Кроме того, были изучены оптические спектры выходного излучения при различных отстройках частоты СВЧ генератора накачки от межмодовой частоты внешнего резонатора (рис.6). Ширина оптического спектра мод полупроводникового лазера при отстройках $\Delta f = \pm(0 - 10)$ МГц составляет ~ 6 нм, а при $\Delta f > 10$ МГц – примерно 4 нм.

3. Обсуждение результатов

Предложенная методика эксперимента, в отличие от [11], позволила обнаружить два типа спектров межмодовых биений полупроводникового лазера при СВЧ накачке с частотой f_{mw} , почти кратной межмодовой частоте f_{im} внешнего резонатора. При отстройках $\Delta f = \pm(0 - 10)$ МГц наблюдаются компоненты межмодовых биений, частоты которых определяются частотой f_{mw} и примерно равны $2nf_{mw}$ (где n – целое число). При $\Delta f > 10$ МГц спектр состоит из компонент межмодовых биений, следующих с интервалом $f'_{im} \approx kf_{im}$ (где k – целое число).

При этом наблюдается затягивание частоты мод, которое состоит в том, что межмодовые биения следуют с интервалом, не равным в точности межмодовой частоте внешнего резонатора, а определяемым величиной f_{mw} для первого типа спектра либо соотношением (2) для второго типа спектра. Динамика возбуждения и сужения спектра подпороговой моды, напоминает полученную в [11].

Детально развитие процесса возбуждения моды показано на рис.3. Видно, что сужение спектра биений и увеличение его амплитуды происходят при незначительном изменении частоты СВЧ модуляции. Возможно, это связано с повышением тока накачки при отстройке $\Delta f > 10$ МГц и со взаимной фазовой модуляцией. Особенностью этого процесса является отсутствие порога возбуждения. Достигнута минимальная ширина спектра отдельной компоненты межмодовых биений (~ 3.5 нм) в диапазоне рабочих токов лазера $I = (0.8 - 1.2)I_{th}$ (параметр накачки $r = -0.2 - 0.2$). При тех же условиях работы полупроводникового лазера достигается максимальная ширина оптического спектра мод, составившая ~ 6 нм (центральная длина волны ~ 810 нм) при $\Delta f = \pm(0 - 10)$ МГц; при $\Delta f > 10$ МГц она уменьшается до 4.3 нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 04-02-17167).

- Hall J.L., Ye J. *Opt. Photon. News*, **12** (2), 44 (2001).
- Bagaev S.N., Chepurov S.V., Klementyev V.M., Kuznetsov S.A., Pivtsov V.S., Zacharyash V.F. *Appl. Phys. B*, **70**, 375 (2000).
- Желтиков А.М. *УФН*, **170**, 1203 (2000).
- Васильев П.П., Голдобин И.С. *Квантовая электроника*, **15** (12), 2421 (1988).
- Багаев С.Н., Клементьев В.М., Каширский А.В., Кузнецов С.А., Пивцов В.С., Захарьяш В.Ф. *Квантовая электроника*, **34** (7), 623 (2004).
- Багаев С.Н., Волков В.Г., Ивашко Д.Ю., Матюгин Ю.А., Фатеев Н.В. *Квантовая электроника*, **26** (2), 102 (1999).
- Van der Ziel J.P. *J. Appl. Phys.*, **52** (7), 4435 (1981).
- Miller A., Sibbett W. *J. Modern Opt.*, **35** (12), 1871 (1988).
- Bowers J.E., Morton P.A., Mar A., Corzine S.W. *IEEE J. Quantum Electron.*, **25** (6), 1426 (1989).
- Burns D., Finch A., Sleat W., Sibbett W. *IEEE J. Quantum Electron.*, **26** (11), 1860 (1990).
- Богатов А.П., Елисеев П.Г., Охотников О.Г. и др. *Труды ФИАН*, **141**, 74 (1983).
- Фофанов Я.А., Соколов И.В. *Оптика и спектроскопия*, **91** (4), 550 (2001).
- Трифонов А.С. *Оптика и спектроскопия*, **86** (1), 126 (1999).