

УДК 621.373.826.038.825.4

ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ МОД В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ЛАЗЕРЕ

В. Ф. Захарьяш, А. В. Каширский, В. М. Клементьев

*Институт лазерной физики СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13/3
E-mail: valera@laser.nsc.ru*

Представлены результаты экспериментальных исследований режима активной синхронизации мод в полупроводниковом лазере с внешним резонатором. Исследованы два варианта получения режимов активной синхронизации мод: путём модуляции от внешнего генератора с частотой, близкой к межмодовой частоте внешнего резонатора лазера, и путём модуляции тока лазера на частоте межмодовых биений внешнего резонатора лазера через цепь обратной связи с усилением. В первом случае экспериментально достигнута стабильность межмодовых биений 10^{-14} , а во втором — показано, что при модуляции тока полупроводникового лазера усиленным сигналом межмодовых биений, полученным с выхода фотодетектора, достигается устойчивый режим синхронизации мод также при перестройке их частоты, т. е. режим синхронизации с перестройкой межмодовой частоты при перестройке оптического резонатора. Исследованы процессы, сопровождающие синхронизацию мод, в частности эффект затягивания и устойчивости режима синхронизации мод и возможности получения высокостабильных межмодовых биений за счёт подавления амплитудной составляющей шума в модулирующем сигнале. Делается попытка феноменологического рассмотрения процесса затягивания и фазового удержания межмодовой частоты.

Ключевые слова: активная синхронизация мод, полупроводниковый лазер, внешний резонатор.

Введение. По мере развития технологий применение полупроводниковых лазеров постоянно расширяется вплоть до использования их в лазерной спектроскопии сверхвысокого разрешения [1]. В ряде работ исследовались процессы в многомодовых полупроводниковых лазерах, в частности в лазерах с внешним резонатором (трёхзеркальных лазерах), представляющих научный и практический интерес. Применение внешнего резонатора позволяет изучать физические процессы в диодном лазере [2–9]. При определённых условиях во внешнем резонаторе возбуждается многомодовый режим на собственных частотах с межмодовой частотой порядка $c/2L_{\text{ext}}$ (L_{ext} — длина внешнего резонатора), которая лежит в радиодиапазоне (в отличие от межмодовой частоты диодного лазера, равной десяткам гигагерц). Динамические процессы, происходящие в полупроводниковом лазере, отражаются на межмодовых биениях, спектральные характеристики которых легко поддаются экспериментальному изучению. Особый интерес представляет процесс взаимодействия многомодового режима во внешнем резонаторе с внутренними процессами в диоде. Известно, что шумы полупроводниковых лазеров в значительной мере определяются скачками мод [3]. Однако уровень шума может быть заметно снижен благодаря высокочастотной модуляции тока диода [5]. Дальнейшие исследования в этом направлении показали [9], что при модуляции тока диода на частоте, близкой к межмодовой, кроме снижения уровня шумов наблюдается и ряд других эффектов, составивших предмет экспериментальных исследований предлагаемой работы. При сближении межмодовой частоты с частотой модулирующего сигнала происходит синхронизация мод. При этом отмечается фазовый захват и затягивание межмодовой частоты в некотором интервале (в полосе удержания фазового захвата) к частоте внешнего сигнала, если его амплитуда модуляции превосходит амплитуду межмодовых колебаний [9, 10]. Если стабильность частоты внешнего сигнала модуляции высока

(например, водородного стандарта), то благодаря затягиванию получают устойчивые высокостабильные межмодовые колебания в режиме активной синхронизации мод. Наряду с затягиванием наблюдается также эффект уширения оптического спектра мод приблизительно до 7 нм, обусловленный их вынужденной синхронизацией в силу межмодовой фазовой модуляции. В итоге достигается оптический спектр мод шириной до нескольких терагерц, и благодаря этому и применению соответствующего нелинейного элемента возможен синтез частот радиотерагерцового диапазона для решения спектроскопических задач [6].

Однако при использовании водородного внешнего генератора частотные характеристики удаётся передать на межмодовую частоту, которая при этом не перестраивается. В дальнейших экспериментах была применена другая методика, позволяющая осуществлять перестройку межмодовой частоты, сохраняя режим синхронизации мод. Эффект достигается, если вместо сигнала от внешнего генератора использовать в качестве модулирующего сигнала собственные межмодовые биения, полученные с выхода фотодетектора, усиленные и передаваемые через линию обратной связи для модуляции тока диода [8].

Применяя в кольце обратной связи усилитель-ограничитель, удаётся осуществить подавление амплитудных шумов в модулирующем сигнале [11]. В этом случае без труда достигается режим активной синхронизации мод и главное — такой режим сохраняется при перестройке частоты внешнего резонатора. Существенное отличие описанной методики состоит, однако, в том, что стабильность частоты межмодовых биений определяется характеристиками внешнего резонатора. Здесь следует отметить, что в настоящее время уже созданы высокостабильные полупроводниковые лазеры [1, 7] на основе высокодобротных резонаторов.

В процессах фазового захвата, затягивания и удержания прослеживается аналогия с классической системой фазовой автоподстройки, которую можно представить в виде шестиполюсника [12, 13], где роль входных двухполюсников играют сигнал модуляции и внутренняя связь внешнего резонатора с диодом, а роль фазового детектора выполняет нелинейность лазерного диода.

В данной работе исследуются варианты получения активной синхронизации мод в полупроводниковом лазере с внешним резонатором при использовании внешней модуляции тока частотой от водородного стандарта и с применением обратной связи на основе собственной межмодовой частоты внешнего резонатора в целях упрощения получения оптического комба.

Обсуждается процесс фазового захвата и удержания на основе представлений, принятых в радиотехнике. Рассмотрены вопросы практического применения полупроводниковых лазеров с внешним резонатором при активной синхронизации мод.

Экспериментальные исследования. Были проведены экспериментальные исследования режимов активной синхронизации мод полупроводникового лазера с внешним резонатором (трёхзеркальной системы) для двух случаев: во-первых, для модуляции тока лазера с применением высокостабильного по частоте внешнего генератора (водородный мазер), во-вторых, для модуляции тока диода, осуществлённой на собственной межмодовой частоте внешнего резонатора. Далее следует описание этих экспериментов и их анализ.

Эксперименты с внешним генератором. Блок-схема экспериментальной установки, отражающая её работу и съём данных, приведена на рис. 1. Устройство предназначено не только для изучения процесса активной синхронизации мод, но и для исследования возможности получения высокостабильных биений на межмодовой частоте (f_{im}). Поэтому оно включает в качестве задающего генератора водородный мазер 1. Межмодовая частота внешнего резонатора лазера 9 равна ~ 150 МГц (длина резонатора L примерно 1 м). В то же время частота водородного стандарта увеличивается до 300 МГц посредством

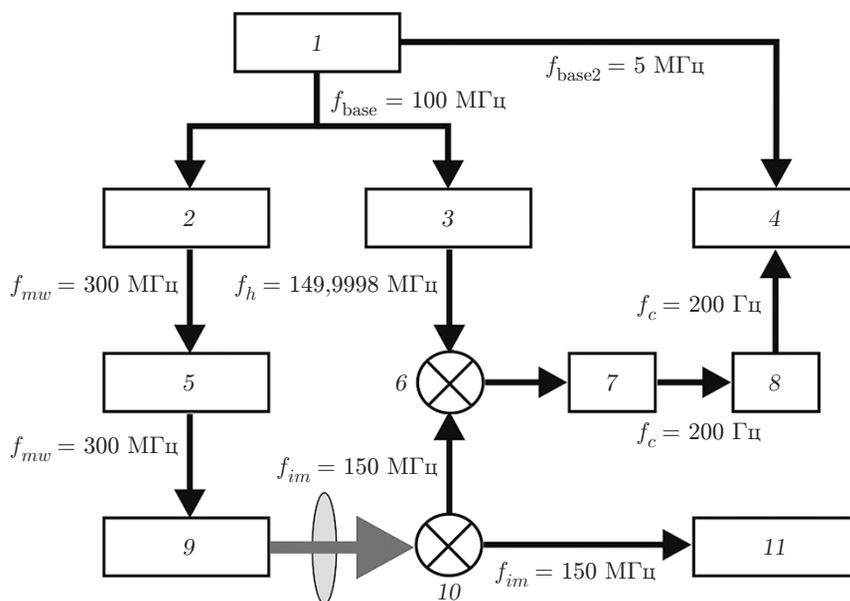


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для модуляции частоты лазера высокостабильным СВЧ-сигналом

умножителя частоты 2, после чего сигнал усиливается (блок 5) до амплитуды, необходимой для модуляции тока диода, т. е. частота модуляции (f_{mw}) отличается от межмодовой примерно в 2 раза, чтобы они не перекрывались [9]. Для исследования стабильности межмодовой частоты устройство включает синхронизованный по водородному стандарту 1 синтезатор частоты (f_h) 3. Сигналы от фотоприёмника 10 и синтезатора 3 смешиваются на смесителе 6, от которого низкочастотный сигнал f_c (~ 200 Гц) через ФНЧ 7 и усилитель-ограничитель 8 передаётся на частотомер 4 и далее в компьютер для обработки результатов измерений. Кроме того, в систему входит анализатор оптического спектра 11 для измерения уширения спектра мод.

Таким образом, экспериментальное устройство позволяет наблюдать установление многомодового режима, процесс установления вынужденной синхронизации мод и связанные с ним эффекты, осуществлять частотные измерения и уширение оптического спектра. Особенность устройства состоит в том, что оно настраивается на межмодовую частоту, на которую при определённых условиях возможен перенос частотных характеристик водородного стандарта и соответственно высокой стабильности.

Приведём основные результаты экспериментальных исследований. Этапы получения режима активной синхронизации мод описаны в работе [9]. На начальном этапе получается многомодовый режим, наблюдаемый в виде высокой шумовой подложки, на фоне которой видны компоненты межмодовых биений шириной около 50 МГц.

При некотором уровне внешнего модулирующего сигнала отмечаются синхронизация мод, фазовый захват и затягивание мод внешнего резонатора. Процесс сопровождается двумя особенностями: синхронизация возникает вблизи порогового тока I_{th} в некоторой области токов модуляции $\pm I_m$ и сопровождается резким понижением уровня шумов, ранее наблюдавшимся в [10]. Результаты измерений приведены в таблице. Характерно, что с увеличением амплитуды модулирующего тока происходит уширение области синхронизации и снижение уровня шумов. Кроме того, при увеличении тока модуляции нарушается симметрия области синхронизации в сторону больших токов при неизменности уровня шумов. Ясно, что при наличии затягивания малые изменения длины внешнего резонатора, например под действием внешних возмущений, не приводят к изменению частоты межмодовых биений. Это означает, что в области синхронизации существует полоса захвата

Среднее значение частоты, Гц	Среднеквадратичное отклонение от среднего значения, Гц (сигнал 200 Гц)	Время усреднения, с	Количество измерений	Стабильность
$1,5 \cdot 10^8$	$8,889 \cdot 10^{-6}$	10	100	$5,928 \cdot 10^{-14}$
$1,5 \cdot 10^8$	$8,602 \cdot 10^{-5}$	100	40	$6,807 \cdot 10^{-13}$
$1,5 \cdot 10^8$	$8,025 \cdot 10^{-6}$	10	7	$5,35 \cdot 10^{-14}$ *

*Стабильность межмодовых биений на интервале семи измерений.

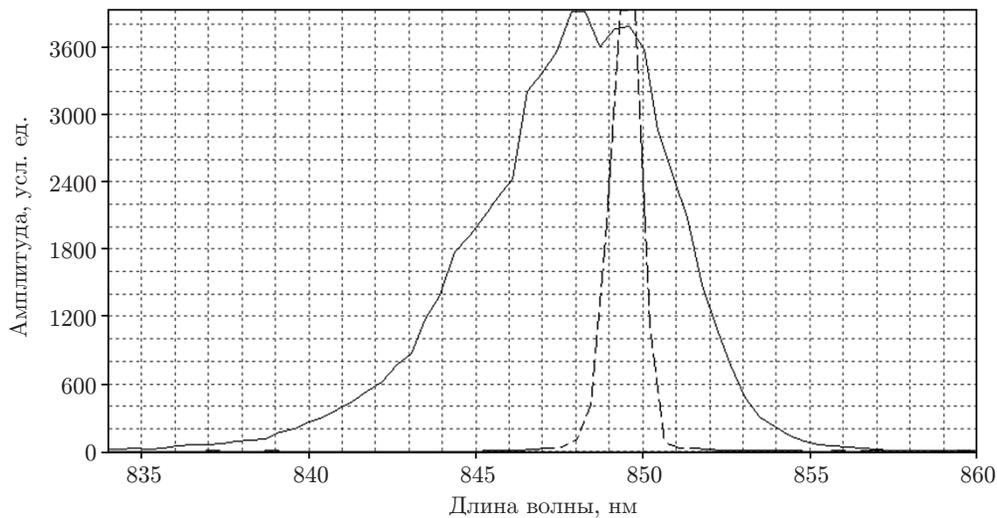


Рис. 2. Оптический спектр полупроводникового лазера в условиях свободной генерации (пунктирная кривая) и при активной синхронизации мод (сплошная кривая)

и регулирования, подобно системе фазовой автоподстройки. Следует особо подчеркнуть, что затягивание происходит в сторону более сильных колебаний, т. е. в исследуемом случае — в сторону внешнего сигнала. Отметим важное обстоятельство: в отличие от режима свободной генерации при активной синхронизации мод межмодовые шумы подавляются и спектр межмодовых биений резко сужается. Шумовая подкладка, возникающая при свободной генерации за счёт подпороговых мод и других факторов [4], практически исчезает благодаря синхронизованности мод.

Были проведены исследования оптических спектров. На рис. 2 показаны оптические спектры при свободной генерации и при синхронизации мод. Происходит заметное уширение спектра мод приблизительно до 7 нм, и оптический спектр достигает 2–2,5 ТГц.

Эксперименты с обратной связью. Перейдём к результатам экспериментов, основанных на существенно другом методе получения синхронизации мод. Эта методика применена, например, в [8, 10]. Она состоит в том, что накачка полупроводникового лазера производится на частоте межмодовых биений, полученных с фотоприёмника, регистрирующего выходное оптическое излучение лазера. Как и в экспериментах с накачкой полупроводникового лазера внешним СВЧ-генератором [4], в новой серии экспериментов наблюдались характерные при синхронизации эффекты (уширение оптического спектра, захват, затягивание частоты и др.). Однако новый способ модуляции позволяет получать устойчивый режим синхронизации мод при перестройке частоты внешнего резонатора (в определённых пределах) (рис. 3), т. е. перестройку межмодовой частоты при синхронизованных модах.

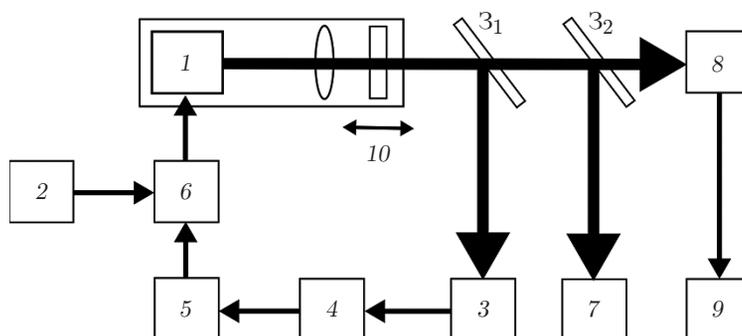


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки с обратной связью

Излучение полупроводникового лазера 1 делится разделительным зеркалом 3_1 на два луча, которые подаются на фотоприёмники 3 и 8. Сигнал с фотоприёмника 3 передаётся на СВЧ-усилитель-ограничитель 4 через регулируемый усилитель со стабилизацией уровня мощности 5 и поступает в цепь питания полупроводникового лазера 6 (совместно с постоянным током от источника 2). Для регистрации параметров излучения в установке используются анализатор оптического спектра 7 и анализатор спектра межмодовой частоты 9. С помощью первого анализатора в эксперименте наблюдался процесс уширения оптического спектра, а с помощью второго изучалась ширина спектра биений мод оптического излучения. В блок-схеме стрелками обозначено, что зеркало внешнего резонатора можно механически перестраивать. Пределы перестройки ± 25 мм (межмодовая частота f_{im} , $\Delta L/L = \pm 15$ МГц). Лазер располагался на амортизированной плите 10. В ходе экспериментов производился контроль мощности (в блок-схеме измеритель мощности не показан).

Коэффициент усиления усилителя-ограничителя равнялся 75 дБ на частоте ~ 300 МГц с полосой ~ 60 МГц. Выходная мощность усилителя-ограничителя составляла 5 мВт. Регулируемый усилитель мощности (0,1–200 мВт) включал в себя направленный ответвитель с детектором и последующим операционным усилителем для стабилизации мощности.

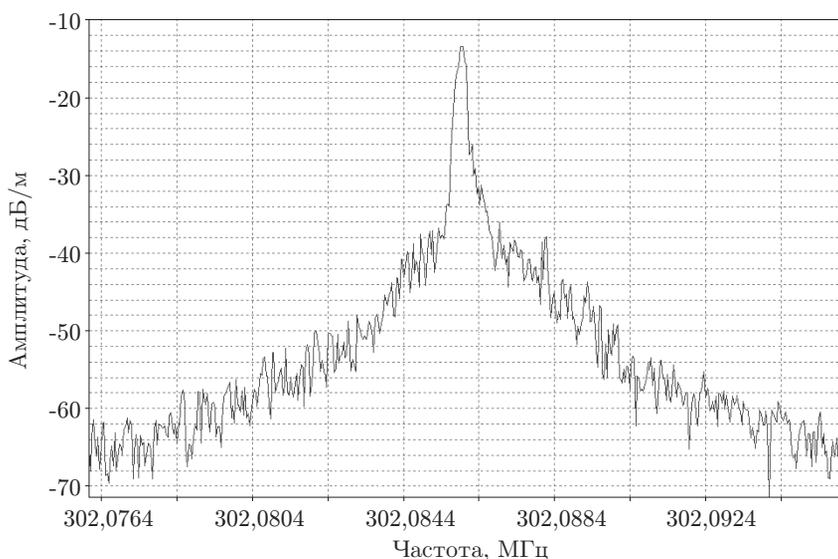


Рис. 4. Спектр отдельной компоненты межмодовых биений в условиях обратной связи по частоте

Осуществлялась температурная стабилизация режима усилителя независимой системой, выполненной на элементе Пельтье.

При включении обратной связи, как и в эксперименте с внешним генератором, возникает многомодовый режим и происходит качественное изменение спектра биений, что демонстрируется на рис. 4. Путём усиления сигнала биений на частоте ~ 300 МГц, подбора мощности СВЧ-усилителя 5 (см. рис. 1), постоянной составляющей тока лазера и длины внешнего резонатора получается устойчивый режим синхронизации мод на частоте накачки ~ 300 МГц. Использование усилителя-ограничителя позволило подавить амплитудные шумы в модулирующем сигнале и получить минимальную ширину спектра межмодовых биений. На рис. 4 приведён результат, который демонстрирует возможность метода: получение ширины спектра биения 200–300 Гц по уровню 3 дБ без специальных мер по защите внешнего резонатора от внешних шумов.

Оптический спектр полупроводникового лазера при включении обратной связи в данном случае практически совпадает со спектром, приведённым на рис. 2 (сплошная кривая).

Обсуждение экспериментальных исследований. При обсуждении следует исходить из того, что в процессе экспериментов наблюдаются два важных момента: эффекты затягивания межмодовой частоты и уширения оптического спектра, которые показывают эффективное взаимодействие внешнего резонатора с диодом, т. е. двух связанных резонаторов. Обычно вольт-амперная характеристика диода содержит квадратичную зависимость ($I \sim U^2$). В результате в токе диода появляются постоянная ΔI и переменная $I_{\sim} = \eta U_0 U_1 \cos(\varphi_0 - \varphi_1)$ составляющие, возникновение которых есть результат биений между внешним (опорным) сигналом и межмодовыми биениями внешнего резонатора, образующиеся в диоде (U_0 и φ_0 — амплитуда и фаза опорного внешнего сигнала, U_1 и φ_1 — амплитуда и фаза межмодовых биений, η — коэффициент пропорциональности). Здесь можно сопоставить сходства упомянутых выше процессов и процессов в системах с фазовой автоподстройкой [11–13]. Рассмотрим, например, случай с внешним генератором, подающим сигнал с опорной фазой φ_0 , по отношению к которой наблюдаются эффект фазового захвата и полоса удержания на межмодовой частоте внешнего резонатора. Наша система, так же как система с фазовой автоподстройкой, реагирует на малую частотную расстройку $\Delta\omega$ межмодовой частоты. При малых ошибках слежения по аналогии с системой фазовой автоподстройки согласно [9] имеем

$$\varphi_0 \approx -\Delta\omega / K_1 K_2 H(0) \leq \pm 1, \quad (1)$$

следовательно, полоса удержания

$$\Delta\omega = K_1 K_2 H(0), \quad (2)$$

где $H(0)$ — коэффициент передачи, или коэффициент связи; K_1 — крутизна перестройки; K_2 — коэффициент усиления в петле. Эти коэффициенты требуется приспособить к нашему случаю.

Коэффициент передачи (или связи) $H(0)$ согласно [4] представим в виде

$$H(0) < (1 \pm T)\rho, \quad (3)$$

где T — коэффициент связи резонаторов, ρ — коэффициент отражения переднего скола.

Теперь перейдём к определению параметров K_1 и K_2 для данного случая. Учтём, что в нашей системе осуществляется синхронизация мод. Суммарное поле, возбуждаемое во внешнем резонаторе, можно записать в виде

$$E_{qc}(t) = \sum E_0 \exp\{i[(\omega_0 + m\Delta\omega_q)t + m\Delta\varphi_q]\}, \quad (4)$$

где суммирование по m меняется от $-n$ до $+n$; $\Delta\omega_q$ — межмодовая частота; $\Delta\varphi_q$ — постоянная межмодовая разность фаз. Полагаем, что в пределах полосы удержания E_0 не изменяется. Суммирование приводит к известному результату, например [12]:

$$E_{qc}(t) = \{E_0[\sin N(\Delta\omega_q t + \Delta\varphi_q)/2]/\sin(\Delta\omega_q + \Delta\varphi_q)/2\} \exp i\omega t, \quad (5)$$

Воспользуемся результатами работы [4], в которой вводится комплексный коэффициент отражения от переднего скола, определяющий связь резонаторов:

$$\rho_{\text{ext}} = \rho(1 + T \exp(2ik_q L_{\text{ext}})), \quad q = 1, 2, 3, \dots, \quad (6)$$

причём

$$T = \tau^2 \rho_g / \rho. \quad (7)$$

Здесь τ — амплитудный коэффициент пропускания переднего скола, ρ_g — коэффициент отражения от внешнего зеркала, k_q — волновое число.

Можно полагать, что при синхронизации для всех мод выполняется фазовое соотношение

$$2kL_{\text{int}} + \arg(1 + T \exp(2jk_q L_{\text{ext}})) = 2n\pi, \quad (8)$$

где L_{int} — длина диода.

Исходя из (6), (8), согласно [4] можно определить различные варианты реализации T : $T < T_{\text{min}}$, $T_{\text{min}} \leq T \ll 1$, $T_{\text{min}} \ll T < 1$ и $T > 1$ ($T_{\text{min}} = L_{\text{int}}/L_{\text{ext}}$), из которых был применён случай $T = 0,4$ ($T < 1$).

При выполнении условия синхронизации мод необходимо принять во внимание, что при этом процессе возникает фазовый сдвиг, обусловленный полевым эффектом в коэффициенте преломления ($n = n_0 + In_2$) [7], где I — интенсивность поля, n_2 — наведённый показатель преломления, тогда фазовый сдвиг

$$\Phi(t) = I\omega_0 n_2 L / c = I\omega_0 L_{\text{in}} / c. \quad (9)$$

Это приводит к частотному сдвигу

$$\Delta\nu = \Phi(t) = I\omega_0(L_{\text{in}}), \quad (10)$$

где L_{in} — оптическая длина диода. Далее крутизну перестройки внешнего резонатора запишем в виде

$$K_1 = \delta(\Delta\nu)/\delta L_{\text{in}}. \quad (11)$$

Параметр K_1 в описываемых экспериментах можно заменить константой. В итоге получаем полосу удержания

$$\Delta\omega \approx \chi \{ \delta(\Delta\nu)/\delta L_{\text{out}} \} |1 \pm T| \rho, \quad (12)$$

где $\chi = K_2$ — коэффициент усиления в петле.

Сделаем численную оценку. Если крутизна перестройки равна $\sim 2,8$ МГц/см, $T \leq 0,4$, $\rho \sim 0,7$, $\chi \sim 1$ см $^{-1}$, то полоса удержания $\Delta\omega \sim 0,8$ МГц. Этот результат согласуется с экспериментом.

Заключение. Эксперименты, проведенные в данной работе, показали, что благодаря эффекту затягивания удаётся передать частотные характеристики внешнего модулирующего генератора — водородного стандарта — на частоту межмодовых колебаний. Процесс фазового захвата, наличие удержания (регулирования), обусловленные взаимодействием внешнего резонатора с лазерным диодом, подобны фазовому авторегулированию, применяемому в радиодиапазоне. Связь резонаторов приводит также к уширению оптического спектра генерации диода.

Устойчивая синхронизация мод достигается и при использовании обратной связи на межмодовой частоте при перестройке частоты внешнего резонатора, т. е. перестройке межмодовой частоты с сохранением синхронизации мод, а подавление амплитудной составляющей в модулирующем сигнале позволяет получить минимальную ширину спектра межмодовых биений.

Следует особо отметить, что режим синхронизации мод обычно наблюдается вблизи порога генерации и сопровождается существенным понижением уровня шумов, резким сужением спектра межмодовых биений и уширением оптического спектра лазерного излучения. Благодаря этому частотный интервал между крайними модами достигает терагерцового диапазона.

Эксперименты показали, что если внешние возмущения остаются в пределах полосы регулирования, то система будет постоянно находиться в захваченном состоянии, т. е. работать в режиме радиооптической фазовой автоподстройки. В дальнейшем такие устройства могут составить основу для создания спектрометров и синтезаторов терагерцового диапазона высокого разрешения [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеев А. Н., Колачевский Н. Н., Алнис Я., Хэнш Т. В. Спектральные характеристики лазеров с электронной стабилизацией по опорному резонатору // Квантовая электроника. 2008. **38**, № 4. С. 391–400.
2. Елисеев П. Г. Спектральные возмущения в полупроводниковом лазере. II. Нелинейное взаимодействие мод // Квантовая электроника. 2005. **35**, № 9. С. 791–794.
3. Бахерт Х.-Ю., Богатов А. П., Гуров Ю. В. и др. Радиочастотные спектры биений мод и пульсаций интенсивности инжекционного лазера с внешним дисперсионным резонатором // Квантовая электроника. 1981. **8**, № 9. С. 1957–1961.
4. Фофанов Я. А., Соколов И. В. Одномодовое амплитудное сжатие в полупроводниковом лазере на 780 нм // Оптика и спектроскопия. 2001. **91**, № 4. С. 550–555.
5. Доев В. Ч., Коледов В. В., Куклин А. Ю. Снижение шума скачков мод инжекционного полупроводникового лазера с внешним резонатором путем высокочастотной модуляции тока питания // Квантовая электроника. 1994. **21**, № 7. С. 660–664.
6. Вакс В. Л., Набиев Ш. Ш., Собакинская Е. А., Суханова М. А. Терагерцовая спектроскопия как метод обнаружения и идентификации взрывчатых веществ: подходы, возможности, перспективы. М.: Российский научный центр «Курчатовский институт», 2009. 50 с.
7. Колачевский Н. Н. Прецизионная лазерная спектроскопия холодных атомов и поиск дрейфа постоянной тонкой структуры // УФН. 2008. **178**, № 11. С. 1225–1235.
8. Petermann K. Laser Diode Modulation and Noise. Tokyo, Japan: Kluwer Academic Publishers, 1988. 315 p.
9. Захарьяш В. Ф., Каширский А. В., Клементьев В. М. и др. Исследование ширины спектра межмодовых биений и оптического спектра мод при их активной синхронизации в трехзеркальном полупроводниковом лазере // Квантовая электроника. 2008. **35**, № 9. С. 821–824.

10. Дедушенко К. Б., Егорова С. А. Генерация ультракоротких световых импульсов в полупроводниковом лазере с двойной обратной связью // Квантовая электроника. 1989. **16**, № 6. С. 1116–1121.
11. Григорьянц В. В., Жаботинский М. Е., Золин В. Ф. Квантовые стандарты частоты. М.: Наука, 1968. 288 с.
12. Клэппер Д. Ж., Фрэнкл Д. Ж. Системы фазовой и частотной автоподстройки частоты. М.: Энергия, 1977. 440 с.
13. Захарьяш В. Ф. Влияние резонансного усилителя-ограничителя и системы фазовой привязки частот на измерения частоты // Автометрия. 1985. № 2. С. 108–112.
14. Багаев С. Н., Захарьяш В. Ф., Клементьев В. М., Лосев П. А. Субмиллиметровый спектрометр высокого разрешения с частотной шкалой на основе НСООН-лазера // Журнал прикладной спектроскопии. 1991. **55**, № 2. С. 330–333.

Поступила в редакцию 12 декабря 2014 г.
