V. 87, N 3

 ${\rm MAY}-{\rm JUNE}\ 2020$ 

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ЛАЗЕР С АКТИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД ПРИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА МЕЖМОДОВОЙ ЧАСТОТЕ

В. Ф. Захарьяш\*, В. М. Клементьев, Е. А. Титов

УДК 621.373.8

Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской АН, 630090, Новосибирск, Россия; e-mail: valera@laser.nsc.ru

(Поступила 11 октября 2019)

Исследован режим активной синхронизации мод в трехзеркальном полупроводниковом лазере, получаемый путем модуляции тока лазера на частоте межмодовых биений внешнего резонатора лазера через цепь обратной связи. При определенных условиях наблюдается устойчивый режим активной синхронизации мод, и при изменении длины внешнего резонатора происходит соответствующая перестройка частоты межмодовых биений. Определены основные условия, при которых достигается данный режим. Экспериментально получена ширина спектра межмодовых биений ~300 Гц при межмодовой частоте 300 МГц, Уширение оптического спектра на полувысоте ~4 нм.

*Ключевые слова:* полупроводниковый лазер, активная синхронизация мод, межмодовые биения, *СВЧ* модуляция.

We investigate the regime of active mode synchronization in a three-mirror diode laser obtained by current modulation at the intermode beat frequency of the external laser resonator. The current modulation is achieved using electrical feedback. It is shown that under certain conditions, a stable mode-locking regime is observed, and when the length of the external resonator changes, the corresponding intermode beat frequency tuning occurs. The main conditions, for which this regime is achieved, are established. The ~300 Hz width of the intermode beats spectrum at a 300 MHz intermode frequency is obtained experimentally. The broadening of the optical spectrum at the 0.5 level is ~4 nm.

Keywords: diode laser, mode-locking, intermode beats, microwave modulation.

**Введение.** В исследованиях полупроводниковых (п/п) лазеров, проводимых в 80—90-х гг., большое внимание уделялось проблеме получения максимально коротких импульсов в режиме синхронизации мод, в том числе в п/п-лазерах [1, 2]. В то же время были предложены и исследованы лазеры с внешним резонатором [1—6], благодаря которому можно изучать частотные характеристики п/п лазера и получать как одночастотный [1—5], так и многомодовый режим генерации [6, 7]. В последнее время интерес к п/п лазерам не ослабевает в связи с улучшением характеристик диодных лазеров и резонаторных устройств [7—13]. П/п лазеры с внешним резонатором представляют интерес с точки зрения практических применений, например, как основа для создания синтезаторов и спектрометров терагерцового (ТГц) диапазона [14], когда в лазере реализуется синхронизация мод внешнего резонатора с возможностью перестройки межмодовой частоты.

В настоящей работе получен режим активной синхронизации мод посредством модуляции тока п/п-лазера на частоте межмодовых биений с фотоприемника, регистрирующего выходное оптическое излучение лазера. Как и в экспериментах с модуляцией тока п/п лазера внешним СВЧ генератором [8], в новой серии экспериментов наблюдались характерные при синхронизации эффекты (уширение оптического спектра, захват и затягивание частоты и др.). При этом описываемый способ модуляции позволяет получать устойчивый режим синхронизации мод при перестройке длины внешнего резонатора, т. е. перестройку межмодовой частоты при активной синхронизации мод.

## ACTIVELY MODE-LOCKED SEMICONDUCTOR LASER WITH FEEDBACK AT INTERMODE FREQUENCY

V. F. Zakharyash<sup>\*</sup>, V. M. Klementyev, E. A. Titov (Institute of Laser Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russia; e-mail: valera@laser.nsc.ru)

Экспериментальная установка. На рис. 1 показана блок-схема экспериментальной установки. Излучение п/п лазера *1* делится разделительным зеркалом M<sub>1</sub> на два луча, которые подаются на фотоприемники *3* и *8*. Сигнал с фотоприемника *3* подается на CBЧ усилитель-ограничитель *4*, который обеспечивает стабилизацию мощности на входе регулируемого усилителя мощности *5* и поступает в цепь питания п/п лазера *6*. Постоянный ток подается через дроссель для отделения от CBЧ, а CBЧ подается через разделительный конденсатор. Для обрезания отрицательной полуволны CBЧ цепь питания шунтируется диодом Шоттки (дроссель, емкость и диод Шоттки не показаны). Для регистрации параметров излучения использованы анализатор оптического спектра *7* и анализатор спектра, с помощью анализатора *7* изучается процесс уширения оптического спектра, с помощью анализатора можно механически перемещать в пределах перестройки  $\pm 25 \text{ мм} (\Delta f_m = f_m \Delta L/L = \pm 15 \text{ M} \Gamma \mu)$  при межмодовой частоте ~300 МГц.



Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: *1* — полупроводниковый лазер; *2* — источник постоянного тока; *3* — фотоприемник; *4* — СВЧ усилитель-ограничитель; *5* — регулируемый усилитель мощности; *6* — цепь питания полупроводникового лазера; *7* — спектрометр; *8* — фотоприемник; *9* — радиочастотный анализатор спектра/анализатор оптического спектра; *10* — амортизированная плита; M<sub>1</sub> и M<sub>2</sub> — разделительные зеркала

Коэффициент усиления усилителя-ограничителя 75 дБ на частоте ~300 МГц с полосой ~60 МГц. Выходная мощность усилителя-ограничителя 5мВт. Регулируемый усилитель мощности (0.5—2000 мВт) включает в себя направленный ответвитель с детектором и последующим операционным усилителем для стабилизации мощности. Осуществляется температурная стабилизация режима усилителя независимой системой, выполненной на элементе Пельтье. Лазер расположен на амортизированной плите.

Результаты и их обсуждение. На первом этапе исследованы характеристики одномодового лазера ИЛПН-820-100 при модуляции лазера ВЧ излучением мощностью <2 Вт при постоянном токе, близком к пороговому. На рис. 2 приведен импульс при синхронизации мод на межмодовой частоте 400 МГц в оптическом излучении с фотодетектора. Когда мощность модулирующего сигнала превышает определенный предел (~150 мВт), интегральная мощность синхронизованных мод увеличивается в первом приближении пропорционально мощности модулирующего сигнала. В нашем случае достигается мощность синхронизованных мод ~60 мВт при модулирующей мощности ~2 Вт. Длительность импульса определяется углом отсечки модулирующего синусоидального сигнала. Импульс может быть разложен в спектр:

$$A(t) = a_0 + a_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + a_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + a_n \sin(N\omega t + \varphi_n) + \dots,$$
(1)

где  $\omega$  — частота модуляции;  $\varphi_n$  — фаза моды. Частоты (1) являются следствием модуляции тока лазера. Оценка ширины спектра импульса из длительности оптического импульса ( $\Delta \omega = 1/t_{имп}$ ) дает ширину ~2 ГГц. При этом в оптическом спектре (рис. 3) имеет место уширение до 4—5 нм, которое связано с нелинейными процессами в п/п лазере и охватывает диапазон межмодовых частот вплоть до ТГц области. Это уширение указывает на наличие так называемого "чирпа" частот [15].



Рис. 2. Импульсы межмодовых сигналов с фотодетектора



Рис. 3. Оптический спектр в условиях свободной генерации (1) и в режиме активной синхронизации мод (2)

На втором этапе исследован режим модуляции тока лазера при использовании обратной связи через усиление в радиотехническом канале на частоте ~300 МГц. При свободной генерации в режиме, близком к пороговому (в отсутствие модуляции тока лазера), на анализаторе спектра 9 на частотах, равных межмодовой частоте (определяемой параметрами внешнего резонатора, ~300 МГц (с/2L)) или кратных ей, на фоне шумовой подложки наблюдаются небольшие сигналы межмодовых биений амплитудой несколько децибел и шириной ~50 МГц (рис. 4, а). При включении обратной связи происходит качественное изменение спектра биений (рис. 4, б). Усилением сигнала биений на частоте 300 МГц, подбором мощности СВЧ усилителя 5, постоянной составляющей тока лазера (посредством источника тока 2) и длины внешнего резонатора достигается автоматически устойчивый режим синхронизации частот с межмодовой частотой ~300 МГц. Получена ширина спектра биений ~300 Гц (рис. 5) без специальных усилий, кроме указанных выше, по защите внешнего резонатора от внешних шумов при перестройке межмодовой частоты внешнего резонатора в диапазоне  $\Delta f_{im} = \pm 15 \text{ M}\Gamma\mu$ . Это означает, что устойчивый режим вынужденной синхронизации реализуется, если внешние возмущения резонатора не превышают область захвата и регулирования. Кроме того, значительно уменьшается шум и возникает уширение оптического спектра, благодаря чему разность между крайними частотами в гребне (рис. 3) межмодовых частот достигает ТГц значений. Этот режим наблюдается для лазера типа ИЛПН-820-100 при условиях: пороговый ток диода 50 мА, выходная мощность усилителя 5 регулируется в интервале 0.1-2 Вт. Эксперименты осуществлялись при коэффициенте связи резонаторов T < 0.5, коэффициенте отражения от переднего скола диода  $R_{\rm a} \sim 3$  %, коэффициенте отражения от внешнего зеркала ~0.7. Процесс устойчивой синхронизации мод наблюдается, как правило, в области порогового тока диода в случае, когда мощность модулирующего сигнала превышает определенный предел (~150 мВт).



Рис. 4. Спектр шумов в отсутствие обратной связи (*a*) и спектр синхронизованных мод при наличии обратной связи (*б*)



Рис. 5. Спектр отдельной компоненты межмодовых биений при наличии обратной связи

На рис. 3 показаны оптические спектры п/п лазера в отсутствие обратной связи и при ее включении. Как видно, при включении обратной связи лазер переходит в режим синхронизации мод и происходит уширение оптического спектра выходного излучения п/п лазера.

Модуляция тока п/п диода с частотой, близкой или кратной межмодовой, приводит к поляризуемости диода, т. е. к амплитудной и частотной модуляции [11]. Отмечено [11], что при модуляции тока п/п лазера в режиме синхронизации основную роль играет нелинейность диода. Показатель преломления представлен в виде [15]:

$$n(I) = n(0) + n_2 I,$$
 (2)

где  $n_2$  — коэффициент нелинейности; I — интенсивность оптического поля. В [10] отмечена неселективность процессов, описываемых (2). При этом в среде возникает динамическая решетка носителей на частоте межмодовых биений  $\Omega_m$ :

$$\Delta n(r,I) = GI' \exp[i(\Omega_{\rm m}t - \Delta kr)], \qquad (3)$$

где G — коэффициент пропорциональности, описывающий свойства среды; I' — интенсивность межмодовых биений;  $\Omega_m = 2\pi f_m$ . При подаче на нелинейный элемент (диод) модулирующего по току сигнала на частоте  $f_m$  взаимодействие волновых процессов в резонаторах приводит к активной синхронизации мод. Процесс синхронизации сопровождается уширением оптического спектра (до 4 нм) и существенным сужением спектра межмодовых биений. При некоторой разности  $\Omega_m \pm \Omega'_m$  из-за расстройки внешнего резонатора в некоторой полосе частот (полосе фазового захвата) имеет место эффект затягивания мод внешнего резонатора к частоте СВЧ накачки  $f_m$ . Он настолько существенен, что при относительно небольшом ослаблении внешних возмущений (применении амортизации) удается получить устойчивую синхронизацию мод. Эффективная синхронизация мод обычно происходит вблизи порогового тока. С повышением тока диода полоса фазового захвата сужается при неизменной мощности модуляции [4]. Процесс фазового захвата и затягивания частоты, описанный в [7] и настоящей работе с учетом [8, 9], можно охарактеризовать как аналог фазового детектора кив преставлении шестиполюсника [16, 17], в котором роль входных двухполюсников играют сигнал модуляции и внутренняя связь внешнего резонатора с диодом, а роль фазового детектора выполняет нелинейность диода. Полоса удержания в этом случае может быть представлена в виде [4]:

$$\Delta \omega \approx \gamma \frac{d\emptyset}{dt} (1 \pm T) \rho, \tag{4}$$

где  $\gamma$  — коэффициент усиления в петле; T — коэффициент связи резонаторов;  $\emptyset = \delta(\Delta v)/\delta L_{ext}$  — крутизна перестройки;  $\rho$  — коэффициент отражения переднего скола. При выполнении условия синхронизации мод возникает фазовый сдвиг, обусловленный эффектом (2). Это приводит к частотному сдвигу

$$d\Phi/dt = n_2 I \Omega_{\rm m} (dL/cdt) = n_2 I \Omega_{\rm m} (v_3/c).$$
<sup>(5)</sup>

Частотный сдвиг можно интерпретировать как крутизну перестройки, обусловленной отношением *v*<sub>3</sub>/*c*, где *v*<sub>3</sub> — скорость перемещения внешнего зеркала.

Оценим полосу удержания  $\Delta \omega$  на основе параметров устройства: крутизны перестройки ~2.8 МГц/см,  $T \sim 0.4$ ,  $\rho = 0.7$ ,  $\chi \sim 1 \text{ см}^{-1}$ . При указанных параметрах  $\Delta \omega \sim 0.8$  МГц, имеет место устойчивая синхронизация (внешние возмущения резонатора  $\leq 1$  мм). Полученные результаты представляют собой основу для создания малогабаритных синтезаторов и спектрометров радио-ТГц диапазона с высоким разрешением ( $10^{-11}$ — $10^{-12}$ ).

Заключение. Получена устойчивая синхронизация мод на межмодовой частоте с обратной связью при простой перестройке частоты внешнего резонатора, т. е. перестраиваемая межмодовая частота при синхронизации мод. Устройства могут служить основой для создания синтезаторов частоты терагерцового диапазона с перестраиваемой частотой, а также спектрометров той же области спектра. Наблюдаются эффекты, которые имеют место и при использовании внешнего генератора [9]: фазовый захват, сужение ширины спектра биений, уширение оптического спектра и др. Существенная разница состоит в том, что в первом случае стабильность межмодовых биений определяется характеристиками внешнего генератора (водородного мазера), во втором случае — внешнего резонатора. Поэтому важная задача — создание высокодобротного, защищенного от помех резонатора. Режим синхронизации наблюдается, как и в [9], вблизи порога генерации и сопровождается резким сужением ширины спектра межмодовых биений. Вследствие увеличения модулирующей мощности оптический спектр лазерного излучения уширяется, интервал между крайними модами достигает терагерцового диапазона. В процессе синхронизации мод большое значение имеет нелинейность лазерного диода, которая выполняет роль фазового детектора. Существует противоречие между полосой синхронизации 0.8 МГц и перестройкой ±15 МГц. Однако полоса синхронизации следует за перестраиваемой частотой, которая определяется механическим перемещением третьего зеркала.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ (№ АААА-А17-117030310290-5).

[1] А. П. Богатов, Ю. В. Гуров, П. Г. Елисеев, О. Г. Охотников, Г. Т. Пак, А. И. Петров, К. А. Хайретдинов. Квант. электрон., 6, № 6 (1979) 1264—1270 [А. Р. Bogatov, Yu. V. Gurov, Р. G. Eliseev, O. G. Ohotnikov, G. T. Pak, А. I. Petrov, К. А. Khairetdinov. Sov. J. Quantum Electron., 9, N 6 (1979) 743—747]

[2] С. Ю. Бахерт, А. П. Богатов, Ю. В. Гуров, П. Г. Елисеев, О. Г. Охотников, Г. Т. Пак, М. П. Рахвальский, К. А. Хайретдинов. Квант. электрон., 8, № 9 (1981) 1957

- [3] А. П. Богатов, П. Г. Елисеев, О. Г. Охотников, М. П. Рахвальский, К. А. Хайретдинов. Квант. электрон., 10, № 9 (1983) 1851
- [4] В. Ф. Захарьяш, А. В. Каширский, В. М. Клементьев. Автометрия, 51, № 6 (2015) 23—31

[5] А. П. Богатов, П. П. Васильев, В. Н. Морозов, А. Б. Сергеев. Квант. электрон., Письма в редакцию, **10**, № 10 (1983) 1957

[6] А. П. Богатов, П. Г. Елисеев, О. Г. Охотников, Г. Т. Пак, С. А. Пашко, М. П. Рахвальский, К. А. Хайретдинов. Тр. ФИАН, 141 (1983) 62-88

[7] K. Peterman. Laser Diode Modulation and Noises, Ed. T. Orjshi, Kluwer Academic Publishers (1988)

[8] W. F. Sharfin, J. Schlafer, E. S. Koteles. IEEE J. Quantum Electron., 30, N 8 (1994) 1709–1712; doi: 10.1109/3.301633

[9] С. Н. Багаев, В. М. Клементьев, А. В. Каширский, С. А. Кузнецов, В. С. Пивцов, В. Ф. Захарьяш. Квант. электрон., 35, № 9 (2005) 821—823

[10] Я. А. Фофанов, И. В. Соколов. Опт. и спектр., 91, № 4 (2001) 550

[11] П. Г. Елисеев. Квант. электрон., **39**, № 9 (2005) 971

[12] В. М. Клементьев, И. И. Корель, А. А. Курбатов, Е. А. Титов. Опт. и спектр., 116, № 2 (2014) 316—322

[13] Б. Н. Нюшков, А. В. Иваненко, С. М. Кобцев, И. С. Пивцов, С. А. Фарносов, П. В. Покасов, И. И. Корель. Квант. электрон., 47, № 12 (2017) 1094—1098

[14] R. A. Lewis. J. Phys. D: Appl. Phys., 47 (2014) 1-11; doi: 10.1088/0022-3727/47/37/374001

[15] Фемтосекундная оптика, под ред. Д. А. Яшунина, Ю. А. Малькова, С. Б. Бодрова, уч.-метод. пособие, Нижний Новгород, Нижнегородский госуниверситет (2014)

[16] Д. Ж. Клэппер, Д. Ж. Фрэнкл. Системы фазовой и частотной автоподстройки частоты, Москва, Энергия (1977)

[17] В. В. Григорянц, М. Е. Жаботинский, В. Ф. Золин. Квантовые стандарты частоты, Москва, Наука (1968)