

07

Синхронизация импульсов излучения инжекционного лазера с насыщающимся поглотителем

© А.С. Ларькин, Г.В. Белокопытов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

E-mail: larand@rambler.ru

Поступило в Редакцию 6 июня 2005 г.

Осуществлена синхронизация импульсов излучения инжекционного лазера с насыщающимся поглотителем гармоническим током СВЧ (0.8–2.6 GHz) мощностью менее 1 mW. Синхронизация сопровождалась резким снижением нестабильности периода повторения световых импульсов. Изучена зависимость полосы синхронизации от тока накачки, амплитуды синхронизирующего сигнала и температуры.

Синхронизация импульсного излучения инжекционных лазеров колебаниями СВЧ впервые наблюдалась почти сорок лет назад [1,2]. Однако первоначальные эксперименты проводились с лазерными диодами, имевшими несовершенную структуру, так что для наблюдения эффекта требовались большие токи накачки и значительные мощности СВЧ-колебаний. При этом генерация световых импульсов происходила в многомодовом режиме, в условиях совместного действия нескольких механизмов колебательной неустойчивости, и сопровождалась модуляцией ширины излучающей области. Все это затрудняло проведение и интерпретацию экспериментов, тем более что фиксация самого факта синхронизации базировалась на наблюдении хронограмм, что было весьма трудоемким и не обеспечивало высокой точности [3].

В последние годы для генерации периодических последовательностей импульсов субнаносекундной длительности стали широко использоваться инжекционные лазеры с насыщающимся поглотителем [4–6]. Их особенностью является наличие области нелинейного поглощения света, которая формируется в слое полупроводника, параллельном активной области, путем бомбардировки тяжелыми ионами металлов с энергией 10^6 – 10^7 eV. Как вариант, возможно создание области насыща-

ющегося поглотителя путем легирования поверхностного слоя у зеркал инжекционного лазера.

В данной работе осуществлена синхронизация импульсного излучения, генерируемого инжекционным лазером с насыщающимся поглотителем, током гармонических колебаний СВЧ. Эксперименты проводились с партией образцов, имевших рабочую длину волны 786 nm. При комнатной температуре они имели пороговый ток $I_{th} = 20 \pm 0.4$ mA и крутизну ватт-амперной характеристики около 0.8 mW/mA. Автомодаляционный режим излучения в лазерах имел место, когда ток накачки лежал в пределах от I_{th} до $I_1 \approx 35$ –40 mA. При токе накачки вблизи I_{th} лазеры генерировали периодические последовательности световых импульсов длительностью менее 200 ps. Частота повторения импульсов f_{sp} увеличивалась с ростом тока накачки и варьировалась в интервале 0.8–2.6 GHz (рис. 1). Вблизи границы непрерывной генерации I_1 све-

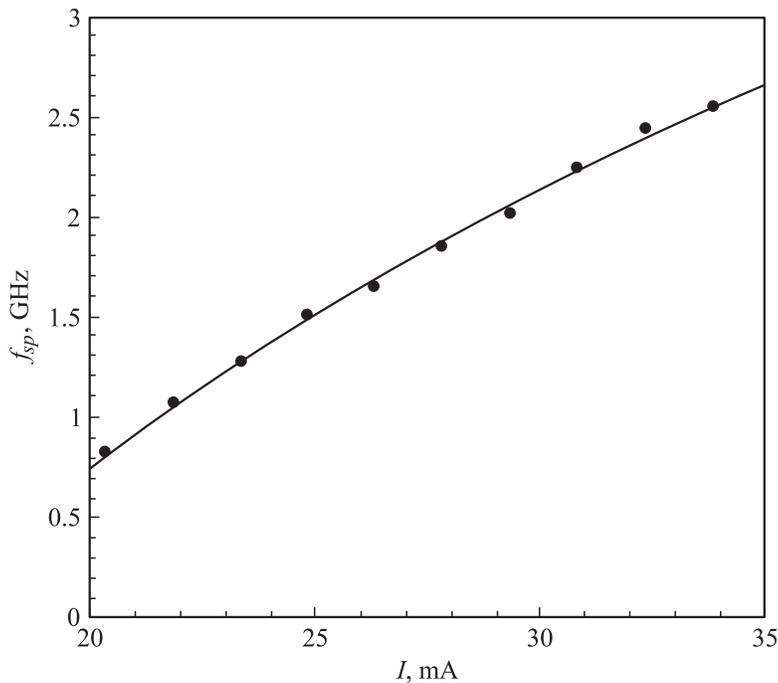


Рис. 1. Зависимость частоты автомодуляции от тока накачки лазера.

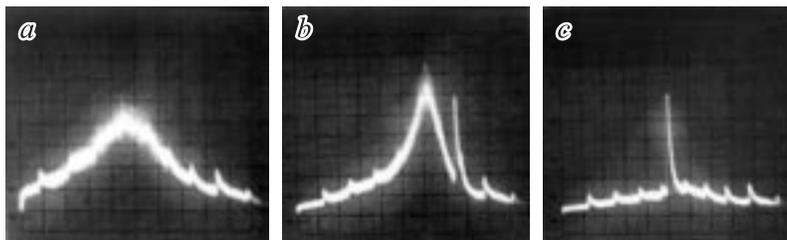


Рис. 2. Спектрограммы огибающих оптических импульсов: *a* — свободная автомодуляция, $f_{sp} = 785$ MHz, $I = 20.5$ mA; *b* — асинхронный режим, $f_{sp} = 1120$ MHz, $I = 23$ mA, $f_s = 1095$ MHz и $I_s = 2.5$ mA; *c* — синхронный режим при синхронизации оптических импульсов в режиме автомодуляции $f_{sp} = f_s = 1120$ MHz, $I = 23$ mA и $I_s = 2.5$ mA. $T = 17.5^\circ\text{C}$. Зубцы на спектрограммах — метки 10 MHz.

товое излучение не успевало затухать за время между импульсами, и его огибающая принимала вид амплитудно-модулированных пульсаций, глубина которых уменьшалась по мере приближения к I_1 . При токе накачки I_1 лазер переходил в режим непрерывной генерации.

Особенностью инжекционных лазеров данного типа являлось то, что они генерировали одномодовое световое излучение во всем интервале токов, использовавшихся в эксперименте. При этом какие-либо заметные вариации в пространственной структуре ближнего поля светового излучения за время импульса отсутствовали.

В работе был применен спектральный метод регистрации синхронизации. При этом импульсы оптического излучения лазера детектировались лавинным фотодиодом ЛФД-2, сигнал с которого подавался на анализатор спектра СВЧ С4-27. Наблюдавшаяся спектральная линия первой гармоники огибающей оптических импульсов имела максимум на частоте автомодуляции. При уровне накачки, немного превышавшем I_{th} , эта спектральная линия была значительно уширена, что свидетельствовало о высоком уровне флуктуаций временного интервала между импульсами (рис. 2, *a*). С ростом тока накачки наблюдалось сужение линии (ср. рис. 2, *a* и левый пик на рис. 2, *b*).

При наблюдении синхронизации на лазерный диод наряду с постоянным током накачки подавался гармонический сигнал с генератора СВЧ. В зависимости от частоты сигнала f_s использовался один из генераторов: Г4-129, Г4-78 или Г4-79. Воздействие гармонического тока

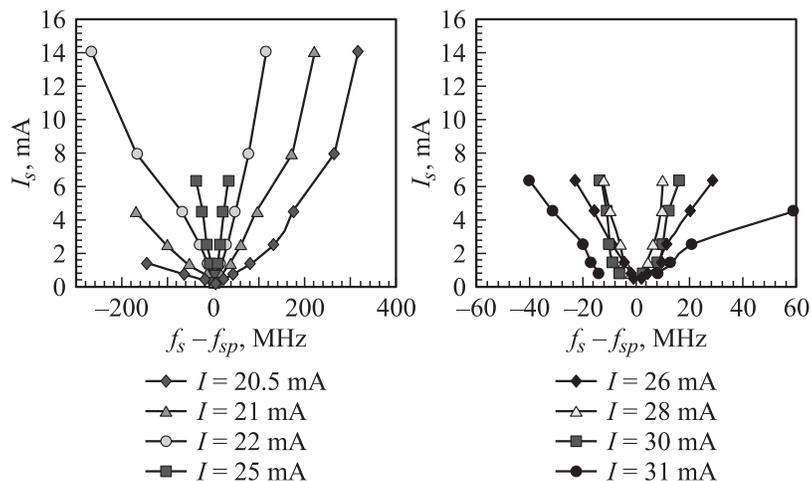


Рис. 3. Области синхронизации импульсов излучения лазера с насыщающимся поглотителем в режиме автомодуляции в зависимости от амплитуды синхронизирующего сигнала: слева — вблизи порога генерации; справа — вблизи границы области непрерывной генерации.

приводило к модуляции времени начала импульса генерации лазера, что вызывало появление линии с частотой f_s в спектре огибающей световых импульсов. Если f_s существенно отличалась от частоты автомодуляции, то спектральные линии с частотами f_{sp} и f_s фиксировались на экране анализатора спектра отдельно (рис. 2, *b*). При перестройке f_s в сторону приближения к частоте автомодуляции наблюдался встречный сдвиг спектральной линии автомодуляции (f_{sp}). В зависимости от тока накачки и амплитуды синхронизирующих колебаний этот сдвиг составлял от нескольких единиц до нескольких десятков мегагерц.

При дальнейшем сближении линий f_{sp} и f_s происходило их „слияние“, которое сопровождалось резким сужением результирующей спектральной линии (рис. 2, *c*). Этот момент фиксировался как граница области синхронизации. При дальнейшей перестройке частоты f_s происходил срыв синхронизации, и обе спектральные линии f_{sp} и f_s вновь наблюдались отдельно.

Типичный вид областей синхронизации в зависимости от амплитуды тока СВЧ (I_s) представлен на графиках рис. 3. При возрастании тока

накачки I от порогового значения I_{th} , зоны синхронизации становились вначале более узкими (рис. 3, слева), а затем, когда ток накачки приближался к I_1 , вновь происходило расширение зон (рис. 3, справа).

Немонотонная зависимость ширины зон от тока накачки указывает на то, что механизмы синхронизации импульсов лазерного излучения различны вблизи порога генерации вблизи границы автомодуляционной неустойчивости. Качественные соображения в пользу этого можно высказать, опираясь на модель инжекционного лазера с насыщающимся поглотителем, основанную на скоростных уравнениях [7]. Согласно ей, вблизи порога генерации добавление гармонического сигнала к току накачки позволяет в широких пределах изменять время достижения пороговой концентрации носителей в активной области и тем самым управлять временем повторения световых импульсов. Такой механизм подобен традиционному сценарию синхронизации генератора пилообразных колебаний [8]. Иная ситуация имеет место вблизи границы перехода в режим непрерывной генерации. При токе накачки, превышающем I_1 , воздействие СВЧ-колебаний проявляется не как синхронизация, а как принудительная модуляция с частотой f_s . При меньшем токе ($I < I_1$) колебания СВЧ на частоте f_s также ведут к принудительной модуляции интенсивности света и, кроме того, подавляют автомодуляцию на частоте f_{sp} вследствие асинхронного гашения [8].

Синхронизация импульсов излучения инжекционного лазера наблюдалась в интервале температур от 8.5 до 45°C. С ростом рабочей температуры частота автомодуляции при фиксированном токе накачки понижалась на 25 МГц/К. Одновременно наблюдалось сужение ширины области синхронизации при постоянной амплитуде СВЧ-колебаний. Так, при величине тока модуляции $I_s = 4.5$ мА и частоте автомодуляции $f_{sp} = 1.0$ GHz ширина области синхронизации составляла 250 МГц при 8.5°C и уменьшалась до 70 МГц при 45°C.

Синхронизация импульсов излучения инжекционного лазера имела место также и при СВЧ-воздействии на второй гармонике (при условии $f_s \approx 2f_{sp}$). Область синхронизации была при этом гораздо уже и варьировалась в зависимости от условий от 16 до 30 МГц (при $I_s = 2-6$ мА).

Эффект синхронизации импульсов излучения осуществлен в данной работе при мощности синхронизирующего сигнала $10^{-5}-10^{-3}$ W, что на 3-5 порядков меньше, чем в ранних экспериментах [3]. Благодаря этому открывается реальная возможность применения синхронизации

для целого ряда практических приложений. Прежде всего синхронизация СВЧ-колебаниями позволяет повысить стабильность частоты повторения лазерных импульсов. При этом эффект синхронизации позволяет ослабить влияние не только уходов рабочей температуры и тока накачки, но и флуктуаций коэффициента усиления в активной области. Далее, перестраивая частоту СВЧ-сигнала, можно управлять периодом повторения световых импульсов в широком диапазоне (до 40% и более, см. рис. 3, слева). Используя один генератор СВЧ в качестве задающего, можно осуществить синхронную генерацию световых импульсов несколькими лазерами, причем, используя элементы задержки, легко добиться желаемого временного сдвига между импульсами от разных лазеров.

Авторы глубоко благодарны А.С. Логгину и Б.Ю. Терлецкому за полезные обсуждения и Г.Т. Паку за предоставленные образцы инжекционных лазеров с насыщающимся поглотителем.

Список литературы

- [1] *Магальяс В.Н., Плешков А.А., Ривлин Л.А.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1967. Т. 6. № 3. С. 550–552.
- [2] *Захаров Ю.П., Компанец И.Н., Никитин В.В.* и др. // ЖЭТФ. 1967. Т. 53. № 11. С. 1553–1555.
- [3] *Сенаторов К.Я., Логгинов А.С., Иванов Л.П.* и др. // Квантовая электроника. 1974. № 1. С. 160–162.
- [4] *Kidoguchi I., Adachi H., Kamiyama S.* et al. // IEEE J. of Quant. Electr. 1997. V. 33. N 5. P. 831–837.
- [5] *Summers H.D., Molloy S.H., Snowton P.M.* et al. // IEEE J. of Selected Topics in Quant. Electr. 1999. V. 5. N 3. P. 745–749.
- [6] *Венус Г.Б., Гаджиев И.М., Губенко А.М.* и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 13. С. 4–9.
- [7] *Carr T.W., Erneux T.* // IEEE J. of Quant. Electr. 2001. V. 37. N 9. P. 1171–1177.
- [8] *Основы теории колебаний* / Под ред. В.В. Мигулина. М.: Наука, 1988. С. 214–223.