

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНЖЕКЦИИ БИГАРМОНИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РЕЖИМ ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ МОД ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА

Р.М. Архипов^{1,2}, М. Раджюнас¹, А.Г. Владимиров^{1,2,3}

¹*Weierstrass Institute for Applied Analysis and Stochastics, Leibniz Institute in Forschungsvverbund Berlin e.V, Berlin, Germany*

²*Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет*

³*Centre for Advanced Photonics and Process Analysis, Cork Institute of Technology, Cork, Ireland*

arkhipov@wias-berlin.de

Полупроводниковые лазеры с пассивной синхронизацией мод (ПСМ) используют для получения коротких импульсов пикосекундной длительности с высокой частотой повторения (десятки и сотни гигагерц) [1-3]. Особенность режима ПСМ состоит в том, что, вследствие действия факторов технического характера, частота следования импульсов не остается постоянной, т.е. имеет место эффект временного джиттера. Во многих телекоммуникационных и иных системах, где могут быть использованы такие лазерные источники, требуется строгая стабилизация частоты повторения световых импульсов ПСМ. Для этого используют задающий радиочастотный генератор, с частотой которого синхронизируется частота следования импульсов ПСМ (подробнее о принципах стабилизации частоты генерации лазеров см. обзор [4]). При этом используется режим так называемой гибридной синхронизации мод [5-7], когда стабилизированное высокочастотное напряжение от радиочастотного генератора прикладывается к секции поглотителя в лазере (Рис. 1а). Недавние эксперименты продемонстрировали, что альтернативным гибридной синхронизации мод методом подавления временного джиттера может служить инжекция двухчастотного когерентного излучения в резонатор лазера, работающего в режиме ПСМ [8-9] (рис. 1б).

В работах [8, 9] проводилось экспериментальное исследование зависимости ширины области синхронизации от мощности инжектируемого двухмодового лазерного излучения. Было обнаружено линейное увеличение ширины области синхронизации с ростом мощности внешнего сигнала, а также рост этой области с уменьшением величины постоянного напряжения, прикладываемого к секции поглотителя.

Данная работа посвящена численному моделированию динамики полупроводникового лазера с пассивной синхронизацией мод при инжекции в его резонатор двухчастотного когерентного излучения. Исследуется зависимость ширины области синхронизации от амплитуды инжектируемого внешнего сигнала и расстроек между инжектируемыми частотами и частотами мод лазера. Расчеты проводятся на основе лазерных уравнений с вре-

менным запаздыванием [10]. Такая модель лазера с пассивной синхронизацией мод применялась нами ранее в работе [7] для исследования режимов лазера с гибридной синхронизацией мод. Полученные с ее помощью результаты достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными.

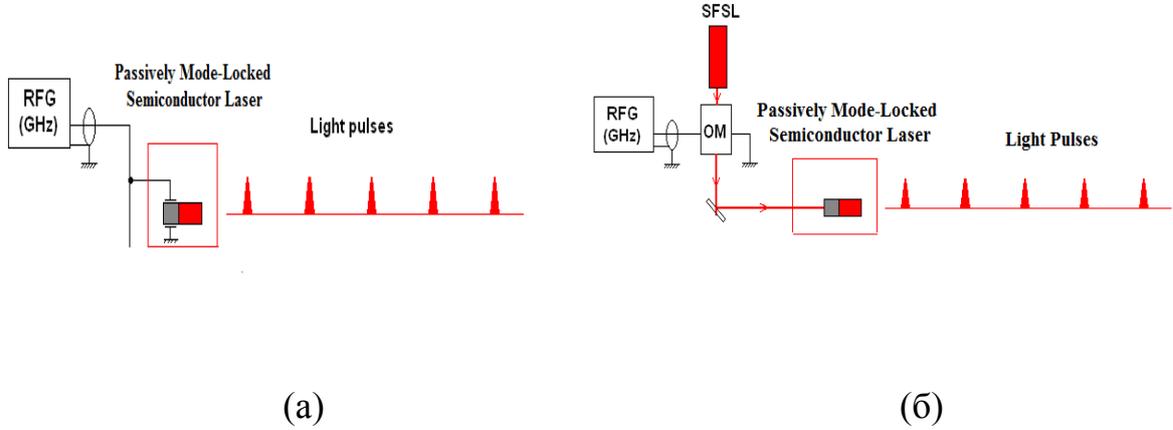


Рис. 1. Схематическое изображение установки для привязки частот следования ПЛПМСМ к частоте радиочастотного генератора RFG в случае режима гибридной синхронизации мод (а) и при инъекции бигармонического излучения (б). На Рис.1 б SFSL – стабилизированный одночастотный лазер, ОМ – оптический модулятор.

В качестве математической модели лазера с синхронизацией мод мы использовали систему из трех дифференциальных уравнений с временным запаздыванием, которая имеет вид [10]:

$$\frac{dA}{dt} = -\gamma A + \gamma \sqrt{\kappa e} \frac{(1-i\alpha_g)G(t-T) - (1-i\alpha_q)Q(t-T)}{2} A(t-T) + E_i(t), \quad (1)$$

$$\frac{dG}{dt} = g_0 - \gamma_g G(t) - e^{-\rho} (e^G - 1) / A^2, \quad (2)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \gamma_q (q_0 - Q) - s(1 - e^{-\rho}) / A^2. \quad (3)$$

Здесь $A(t)$ – амплитуда электрического поля, $G(t)$ – насыщающееся усиление активной секции лазера, $Q(t)$ – насыщающееся поглощение пассивной секции, α_g , α_q – т. н. факторы уширения линии в усиливающей и поглощающей секциях лазера, соответственно, учитывающие зависимость показателя преломления от концентрации носителей, κ – коэффициент линейного ослабления излучения за один проход в резонаторе, T – время обхода «холодного» резонатора, s – отношение интенсивностей насыщения в усиливающей и поглощающей секциях лазера, γ_g, γ_q – скорость

релаксации усилителя и поглотителя, соответственно, g_0 – параметр накачки, q_0 – линейное поглощение.

Амплитуда электрического поля инжектируемого бигармонического излучения имеет вид:

$$E_i(t) = be^{i2\pi\delta_o t} \left(e^{i2\pi(\Delta_1 - \delta)t} + e^{i2\pi(\Delta_2 + \delta)t} \right), \quad (4)$$

где b – амплитуда поля. Параметры Δ_1 и Δ_2 фиксированы и совпадают с частотами мод лазера, работающего в режиме ПСМ. Параметры $\delta_o, \delta \ll \Delta_1, \Delta_2$ описывают частотные расстройки между частотами инжектируемых мод и модами лазера с синхронизацией мод.

Границы области синхронизации определялись по схеме, которая описана в работе [7], посвященной исследованию гибридной синхронизации мод. При малых амплитудах инжектируемого сигнала граница области синхронизации остается практически симметричной относительно нулевой расстройки. Однако при больших амплитудах наблюдается асимметрия – граница синхронизации смещается влево по оси частот. Ширина области синхронизации сильно зависит от положения мод оптической инжекции на шкале частот по отношению к частотам лазерных мод. Если моды оптической инжекции находятся вблизи центральной и соседней лазерной моды, то наблюдается увеличение ширины области синхронизации по сравнению со случаем, когда моды оптической инжекции находятся дальше от центральной частоты генерации лазера.

В работе [7] теоретически предсказано возникновение гибридной синхронизации мод в случае, когда частота внешней модуляции не равна собственной частоте следования импульсов синхронизации мод, а в два раза меньше или в два раза больше нее. Численные оценки ширины области синхронизации в этих случаях и результаты эксперимента показывают, что ширина области синхронизации становится значительно уже при модуляции внешнего сигнала на половинной частоте. При модуляции на удвоенной частоте она остается практически такой же, как и для случая модуляции на частоте следования импульсов.

Аналогичные исследования были проведены нами для случая двухмодовой оптической инжекции, когда частотный интервал между двумя инжектируемыми модами в два раза превосходит или в два раза меньше межмодового интервала в лазере с синхронизацией мод. Область синхронизации была практически одинаковой, когда разность частот инжекции равна или в два раза больше межмодового интервала. В случае же, когда она была в два раза меньше этого интервала, наблюдалось сильное уменьшение ширины зоны синхронизации. Как уже было упомянуто выше, аналогичная ситуация наблюдалась при изучении гибридной синхронизации мод в работе [7].

Таким образом, в настоящей работе с помощью численного решения системы лазерных уравнений с временным запаздыванием (1)-(3) проведено теоретическое исследование эффекта синхронизации импульсов полупроводникового лазера, работающего в режиме ПСМ, с инжектируемым в него внешним двухмодовым когерентным оптическим излучением. Исследовано влияние на ширину области синхронизации амплитуд и частот инжектируемых полей, а так же параметров лазера. В докладе обсуждается физический смысл полученных результатов.

Данная работа выполнена при поддержке европейского проекта EU FP ITN PROPHEET (Grant No. 264687).

ЛИТЕРАТУРА

1. Bimberg D., Grudmann M. and Ledentsov N. N. Quantum dot heterostructures. J. Wiley, 1999.
2. Rafailov E.U., Cataluna M.A., Avrutin E.A. Ultrafast lasers based on quantum dot structures. WILEY-VCX, 2011.
3. Rafailov E.U., Cataluna M. A., W. Sibbett // Nat. Phot. 1. 2007. P. 395.
4. Багаев С.Н., Чеботаев В.П. // УФН. 1986. Т.148. Вып. 1. С.143.
5. Kuntz M. // Proceedings of the IEEE 95. 2007. P.1767.
6. Fiol G. // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 96. P. 011104.
7. Arkhipov R., Pimenov A., Radziunas M., Rachinskii D., Arsenijevic D., Schmeckeber H., Bimberg D. // IEEE J. Select. Topics Quantum Electron, 2013 (в печати).
8. Habruseva T., O'Donoghue S., Rebrova N., Reid D. A., Barry L. P., Rachinskii D., Huyet G., and S. P. Hegarty // IEEE Photon. Technol. Lett. 2010. V.22. No 6. P. 359.
9. Sooudi E., Huyet G., McInerney J., Lelarge F, Merghem K., Rosales R., Martinez A., Ramdane A., Hegarty S. // IEEE J. Quantum Electron. 2012. V.48. No. 10. P. 1327.
10. Vladimirov A.G., Turaev D. // Phys. Rev. A 72. 2005. P. 033808.