

06

Фазовые эффекты в широкополосковых гетеролазерах с искривленными штрихами решетки обратной связи

© В.В. Дюделев, Г.С. Соколовский, С.Н. Лосев,
А.Г. Дерягин, В.И. Кучинский, С.А. Никишин,
М. Холтц, Э.У. Рафаилов, В. Сиббет

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия
E-mail: gs@mail.ioffe.ru

Department of Electrical and Computer Engineering, Texas Tech University,
Lubbock, TX 79409, USA

Division of Electronic Engineering and Physics, University of Dundee,
Dundee DD1 4HN, UK

School of Physics and Astronomy, University of St Andrews,
North Haugh, St Andrews, KY169SS, UK

Поступило в Редакцию 13 сентября 2006 г.

Проведено теоретическое исследование фазовых эффектов в AlGaAs/GaAs лазерах с квантово-размерной активной областью с распределенной обратной связью с искривленными штрихами (и-РОС), обеспечивающей фокусировку выходного излучения, и проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными для аналогичных лазеров с искривленными штрихами распределенного брэгговского зеркала (и-РБЗ). Показано, что учет рассмотренных фазовых эффектов при конструировании и-РОС резонатора играет ключевую роль для обеспечения спектрального и пространственного совершенства излучения таких лазеров.

PACS 42.55.Px

Лазеры с распределенной обратной связью и/или с распределенным брэгговским зеркалом с искривленными штрихами решетки (и-РОС/и-РБЗ) [1,2], способные обеспечивать высокую мощность в сочетании со спектральным и пространственным совершенством выходного излучения, наряду с лазерными линейками с узкими полосками с фазовым сдвигом накачки [3], лазерами с неустойчивым резонатором [4] и усилителями мощности с задающим осциллятором (МОРА — англ.) [5] являются в настоящее время весьма привлекательными приборами для

многих областей науки и техники, таких как фотомедицина, накачка твердотельных лазеров, нелинейных кристаллов, оптоволоконных усилителей и др. Отличительной особенностью и-РОС/и-РБЗ лазеров являются цилиндрическая симметрия резонатора, приводящая к „самофокусировке“ излучения в плоскости $p-n$ -перехода в точке, положение которой определяется кривизной решетки.

Как известно, фазовые эффекты на торце резонатора оказывают огромное влияние на работу классических РОС и РБЗ лазеров [6]. В настоящей работе исследуется влияние фазы отражения на зеркалах на пороговые и спектральные характеристики лазеров с искривленными штрихами решетки обратной связи.

Рассмотрим и-РОС лазер с длиной L , много большей периода решетки Λ , и полным набегом фазы ϕ на незаконченном периоде решетки на выходном зеркале. Хотя вклад последнего незаконченного периода в обеспечение распределенной обратной связи мал по сравнению с вкладом всех остальных штрихов решетки, однако он оказывает огромное влияние на характеристики лазера. Для учета этого влияния следует представить коэффициент отражения зеркал лазера в комплексном виде:

$$r_{1,2} = R_{1,2}^{1/2} e^{i\phi_{1,2}}, \quad (1)$$

где $R_{1,2}$, $\phi_{1,2}$ — коэффициенты и фазы отражения переднего и заднего зеркал соответственно.

Спектральные и пороговые характеристики и-РОС лазера определяются решением уравнений связанных волн [2], аналогичным полученным Когельником и Шенком для классических РОС лазеров [7]:

$$\begin{aligned} \frac{dR}{dz} &= i\delta R + i\kappa S, \\ -\frac{dS}{dz} &= i\delta S + i\kappa R, \end{aligned} \quad (2)$$

где R и S — амплитуды связанных волн, распространяющихся по резонатору в противоположных направлениях, δ — брэгговская расстройка частоты, κ — константа связи („coupling“), причем граничные условия с учетом отражения на зеркалах записываются в виде

$$\begin{aligned} S(\rho_0) &= r_1 R(\rho_0), \\ S(L + \rho_0) &= r_2 R(L + \rho_0). \end{aligned} \quad (3)$$

Решение системы уравнений (2) сводится к трансцендентному уравнению для собственных значений комплексной константы распространения γ :

$$\frac{(\gamma + \delta)r_1 + \kappa}{\gamma + \delta + \kappa r_1} \frac{(\gamma + \delta)r_2 + \kappa}{\gamma + \delta + \kappa r_2} e^{2i\gamma L} = 1. \quad (4)$$

Пороговые условия и спектр мод определяются из условия

$$\pm(\gamma^2 + \kappa^2)^{1/2} = \delta. \quad (5)$$

В и-РОС/и-РБЗ лазерах, в отличие от обычных РОС/РБЗ лазеров, фаза отражения на торцах не является постоянной, а плавно изменяется вдоль зеркала по следующим законам:

$$\phi_1(\varphi) = \frac{2\pi n}{\lambda} \rho_0 \left(\frac{1}{\cos(\varphi_0)} - \frac{1}{\cos(\varphi)} \right), \quad (6)$$

$$\phi_2(\varphi) = \frac{2\pi n}{\lambda} (\rho_0 + L) \left(\frac{1}{\cos(\varphi)} - 1 \right), \quad (7)$$

где φ_0 — половинный угол клиновидного полоска и-РОС/и-РБЗ лазера, φ — угол распространения луча относительно оси симметрии. Для нахождения зависимости порогового усиления от частоты генерации и-РОС лазера при наличии отражения от торцов следует подставить выражения (6), (7) в выражение (1) и решить уравнение (4) с комплексным коэффициентом отражения, который является функцией угла распространения луча по отношению к оси симметрии.

Для лучшего понимания того, как изменяющаяся фаза отражения влияет на пороговые и спектральные характеристики и-РОС лазеров, рассмотрим два предельных случая. Первый случай „короткого и узкого“ и-РОС лазера с кривизной решетки ρ_0 , много большей его длины L , схематически изображен на вставке на рис. 1, *a*. Решетка такого лазера практически прямая, изменение фазы отражения на обоих зеркалах мало, и поэтому его спектральные характеристики практически соответствуют характеристикам классического РОС лазера с отражением на торцах, хорошо известным из литературы [8]. Зависимость нормированного порогового усиления αL „короткого и узкого“ и-РОС лазера от нормированной брэгговской расстройки δL представлена на рис. 1, *a* (в расчете были использованы следующие параметры: $\rho_0 = 10$ mm, $L = 1$ mm, $\kappa L = 1$, $R_{1,2} = 5\%$, $\varphi_0 = 0.2^\circ$).

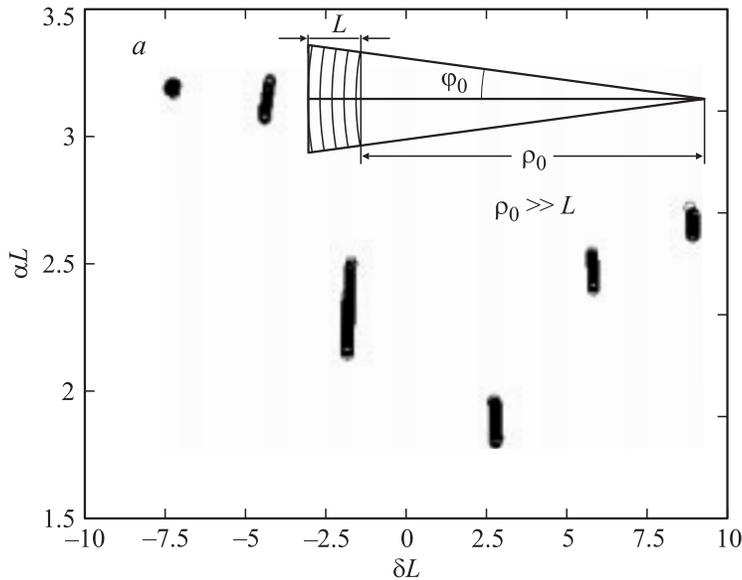


Рис. 1. Зависимость нормированного порогового усиления αL от нормированной брэгговской расстройки δL для „короткого и узкого“ с параметрами $\rho_0 = 10 \text{ mm}$, $L = 1 \text{ mm}$, $\kappa L = 1$, $R_{1,2} = 5\%$, $\phi_0 = 0.2^\circ$ (a) и „длинного и широкого“ и-РОС лазеров с параметрами $\rho_0 = 50 \mu\text{m}$, $L = 1 \text{ mm}$, $\kappa L = 1$, $R_{1,2} = 5\%$, $\phi_0 = 1.3^\circ$ (b). На вставках схематически изображены упрощенные конструкции рассмотренных лазеров.

Второй случай „длинного и широкого“ и-РОС лазера с кривизной решетки ρ_0 , много меньшей длины лазера L , схематически изображен на вставке на рис. 1, b. В таком лазере изменение фазы отражения на переднем зеркале пренебрежимо мало, а на заднем оно может составлять до 2π и более. На рис. 1, b представлена зависимость порогового усиления от брэгговской расстройки для „длинного и широкого“ и-РОС лазера (в расчете были использованы следующие параметры: $\rho_0 = 50 \mu\text{m}$, $L = 1 \text{ mm}$, $\kappa L = 1$, $R_{1,2} = 5\%$, $\phi_0 = 1.3^\circ$). Данный рисунок в точности повторяет хорошо известную дисперсионную кривую порогового усиления классического РОС лазера с фиксированной фазой отражения на одном зеркале и переменной на другом [8]. Полученный результат говорит о том, что в и-РОС лазере с такой геометрией

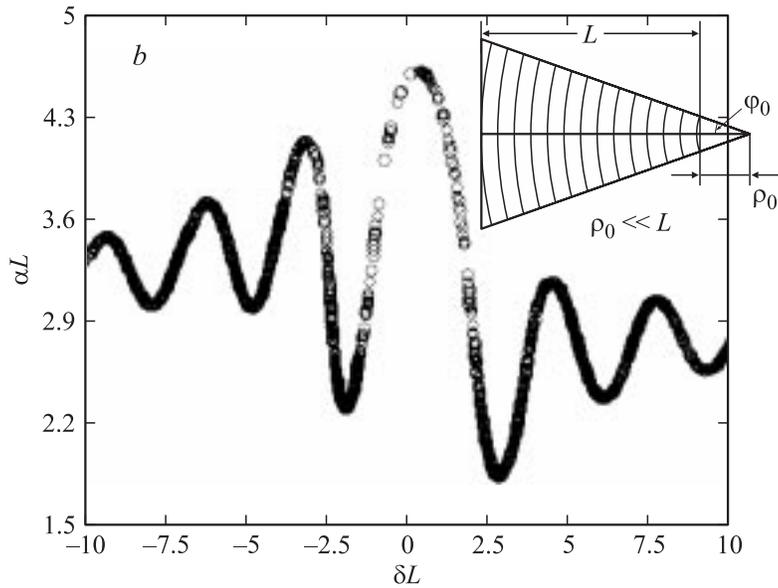


Рис. 1 (продолжение).

частота и пороговое усиление любой из продольных мод зависят от угла распространения луча относительно оси симметрии резонатора. Поэтому и-РОС лазер с такой геометрией не может генерировать одночастотное излучение, а его ближнее поле представляет собой набор более светлых и более темных пятен в зависимости от значения порогового усиления.

Параметры реальных и-РОС лазеров лежат между рассмотренными предельными случаями. На рис. 2 приведены зависимости нормированного порогового усиления αL и нормированной расстройки брэгговской частоты δL от угла распространения луча φ (рис. 2, *b* и *c*), а также зависимость αL от δL (рис. 2, *a*) для реального и-РОС лазера со следующими параметрами: $\kappa L = 1.7$, $L = 1.5$ mm, $\rho_0 = 10$ mm, $\varphi_0 = 0.3^\circ$, $R_{1,2} = 3\%$. Максимальный набег фаз отражения на зеркалах в таком лазере составил порядка π . Хотя параметры данного лазера близки случаю „короткого и узкого“ и-РОС лазера, но больший набег фаз порождает значительные изменения зависимости порогового усиления

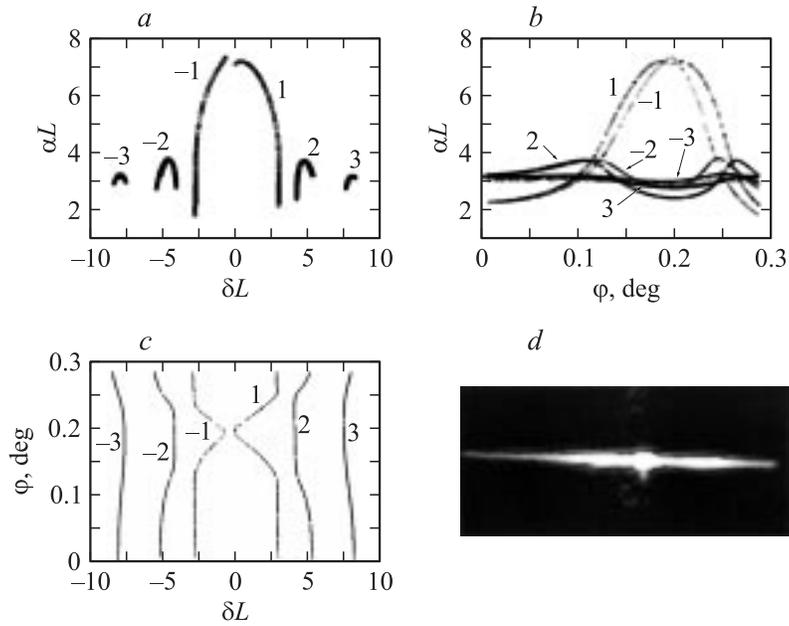


Рис. 2. Зависимость нормированного порогового усиления αL от нормированной брэгговской расстройки δL (a), зависимости этих параметров от угла распространения луча по резонатору (b) и (c) и-РОС лазера с $\kappa L = 1.7$, $L = 1.5$ mm, $\rho_0 = 10$ mm, $\varphi_0 = 0.3^\circ$, $R_{1,2} = 3\%$, а также экспериментальное распределение ближнего поля и-РБЗ лазера с такими же параметрами конструкции (d). Цифрами обозначены номера мод и-РОС резонатора.

продольной моды от угла распространения луча (рис. 2, b), что приводит к появлению в данном лазере областей с высоким пороговым усилением и соответственно неоднородной картине ближнего поля. Из рис. 2, b также следует, что спектр лазера в различных точках зеркала будет различным, так как пороговое усиление в зависимости от угла распространения луча меньше то у одной, то у другой продольной моды. Экспериментальное измеренное распределение интенсивности ближнего поля (рис. 2, d) AlGaAs/GaAs и-РБЗ лазера с квантово-размерной активной областью с такими же параметрами резонатора [9] хорошо согласуется с расчетами зависимости нормированного порогового усиления от угла распространения (рис. 2, b).

Таким образом, в настоящей работе были исследованы фазовые эффекты в широкополосковых лазерах с искривленными штрихами решетки обратной связи и показано, что зависимость фазы отражения на торцах от угла распространения луча по резонатору приводит к зависимости порогового усиления и резонансных частот от угла распространения луча по резонатору, неоднородности распределения интенсивности на выходном зеркале и затруднению одночастотной генерации. По нашему мнению, учет рассмотренных фазовых эффектов при конструировании и-РОС резонатора будет играть ключевую роль для обеспечения спектрального и пространственного совершенства излучения таких лазеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦНТП (госконтракт 02.442.11.7382), Royal Society и Правительства Санкт-Петербурга (грант PD06-1.2-239).

Список литературы

- [1] Sokolovskii G.S., Rafailov E.U., L. Birkin D.J. et al. // J. Opt. and Quant. El. 1999. V. 31. P. 215–221.
- [2] Sokolovskii G.S., Rafailov E.U., L. Birkin D.J. et al. // IEEE J. Quant. El. 2000. V. 36. P. 1412–1420.
- [3] Botez D., Mawst L.J. // IEEE Circuits and Devices Magazine. 1996. V. 12. P. 25–32.
- [4] Francis D.A., Changhashain C.J., Eason K. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. P. 1598–1600.
- [5] Walpole J.N., Kintzer E.S., Chinn S.R. et al. // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 61. P. 740–742.
- [6] Streifer W., Burnham R.D., Scifers D.R. // IEEE J. Quant. El. 1975. V. 11. P. 154–161.
- [7] Kogelnik H., Shank C.V. // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. P. 2327–2335.
- [8] Agrawal G.P., Dutta N.K. Semiconductor lasers. 2-Ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993. P. 334.
- [9] Yanson D.F., Rafailov E.U., Sokolovskii G.S. et al. // J. of Appl. Phys. 2004. V. 95. P. 1502–1509.