

# ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНО-ОНДУЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА С ВНЕШНЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Хоу Фанхуань, Е.Д. Карих

*Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь*

**Цель работы:** исследование модового спектра и пространственных ондуляций мощности многомодового полупроводникового лазера при изменении условий внешней оптической обратной связи.

### Коэффициент потерь в составном резонаторе.

При работе лазера в условиях ООС от внешнего объекта эффективные коэффициенты потерь для мод с различными  $q$  оказываются разными ( $\alpha_q$ ) и мощности мод будут равны  $p_q = \alpha / (\alpha_q - \Gamma g_q)$ . Предполагается, что коэффициент усиления в лазере с внешней ООС остается тем же, что и в уединенном лазере. Это обосновано в случае слабой связи, когда изменение населенностей уровней за счет ООС очень мало (эти небольшие изменения можно зарегистрировать, фиксируя в цепи питания лазера так называемый оптоэлектронный сигнал [1, 8]). Изменение коэффициента потерь зависит от фазы возвращающегося в лазер излучения, а значит, и от индекса моды. Присвоим значение  $q = 0$  номеру доминирующей моды в уединенном лазере, тогда  $p_{s_0} = \alpha / (\alpha - \Gamma g_0)$ . В дальнейшем удобно рассматривать нормированные спектры  $\tilde{p}_q = p_q / p_{s_0}$ :

$$\tilde{p}_q = \frac{\alpha - \Gamma g_0}{\alpha_q - \Gamma g_q} \quad (1)$$

В лазере с длиной собственного резонатора  $L$  и групповым показателем преломления  $\bar{n}_g$  величина  $\Delta\omega = \pi c / \bar{n}_g L$ , где  $c$  – скорость света в вакууме. Ширина спектра усиления может быть оценена из соотношения  $\hbar\Delta\omega_g \approx 2kT$  [7]. При этом из (2) для коэффициента усиления имеем

$$g_q = g_0(1 - bq^2), b = \left( \frac{\pi\hbar c}{\sqrt{2kT\bar{n}_g}L} \right)^2, g_0 = \sigma_g(n - n_g) \quad (3)$$

Полные оптические потери в резонаторе уединенного лазера

$$a = a_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad (4)$$

где  $a_i$  – внутренние потери в лазере;  $R_1$  и  $R_2$  – коэффициенты отражения собственных зеркал лазера по интенсивности ( $R_2$ -для зеркало, обращенного к внешнему отражателю).

Предположим теперь, что в лазер через зеркало  $R_2$  возвращается часть излучения, отраженного от внешнего объекта.

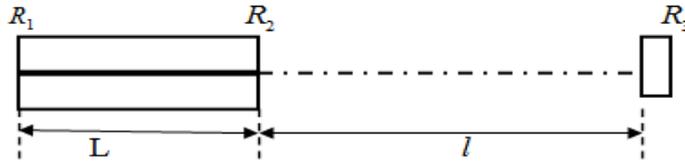


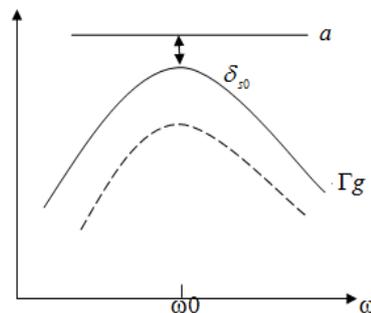
Рис. 1 Полупроводниковый лазер с трехзеркальным резонатором

Для коэффициента потерь в лазере при наличии внешней ООС. По аналогии с (4) имеем

$$a_q = a_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_{2_{eq}}} = a_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} - \frac{1}{2L} \ln(1 + \beta_q)$$

При слабой связи лазера с внешним отражателем ( $R_3 \ll 1, R_q \ll 1$ ) можно воспользоваться известным приближением  $\ln(1 + \beta_q) \approx \beta_q$ . Тогда

$$a_q \approx a - \beta_q / 2L \quad (8)$$



Таким образом, для дальнейших расчетов лазера с внешней ООС должно использоваться выражение (8).

## 2. Расчет спектра мощности продольных мод лазера.

Обозначим  $\delta_{s0}$  – дефицит усиления доминирующей моды в уединенном лазере:

$$\delta_{s0} = a - \Gamma g_0 = x \Gamma g_0 \quad (9)$$

Тогда на основании (1), (3), (8) и (9) будем иметь:

$$\tilde{P}_q \approx \left( 1 + \frac{b}{x} q^2 - \frac{\beta_q}{2x \Gamma g_0 L} \right)^{-1}$$

Для уединенного лазера  $R_3 = 0$ , тогда  $\beta_q = 0$  и для мощности будем иметь

$$\tilde{P}_q \approx \left(1 + \frac{b}{x} q^2\right)^{-1} \quad (10)$$

Время задержки излучения во внешней части резонатора равно  $\tau = 2l/c$ , где  $l$  - расстояние от выходного зеркала  $R_2$  до внешнего объекта. Введем обозначения;  $\xi = 2l/\lambda_0$  ( $\lambda_0 = 2\pi c/\omega_0$  - длина волны доминирующей моды в уединенном лазере);  $\sigma = \lambda_0/2\bar{n}_g L$ ;  $p = (1 - R_2)^2 / R_2$ . В итоге для мощностей лазерных мод окончательно получаем

$$\tilde{P}_q = \left\{ 1 + \frac{b}{x} q^2 - \frac{\rho R_3}{2\Gamma g_0 L x} \left[ 1 + \frac{2}{\sqrt{\rho R_3}} \cos[2\pi\xi(1 + \sigma q)] \right] \right\}^{-1} \quad (11)$$

В данной модели значения  $\tilde{P}_q$  положительны при выполнении неравенства

$$\rho R_3 / 2 + \sqrt{\rho R_3} < \Gamma g_0 L x \quad (12)$$

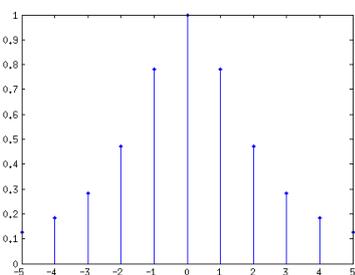
Зависимости мощностей отдельных мод и суммарной по спектру мощности от расстояния до объекта представлены на рис. 2 и 3, где обозначено

$$\Sigma_{e/s} (\%) = 100 \left( \frac{\sum_{q=-10}^{10} p_q}{\sum_{q=-10}^{10} p_{sq}} - 1 \right) \quad (13)$$

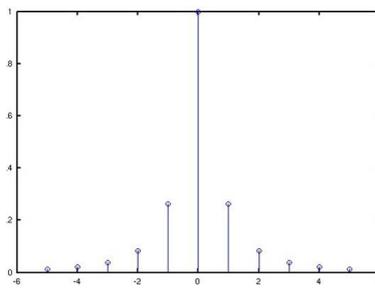
### 3. Пространственные ондуляции мощности лазера с составным резонатором.

Исследование спектрально-ондуляционных характеристик полупроводникового лазера производится с помощью численного моделирования в системах компьютерной математики MATLAB.

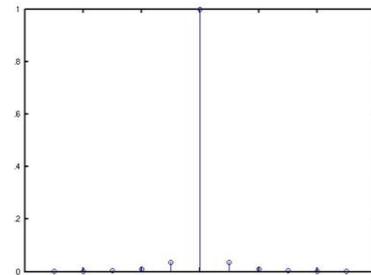
На основании формулы (10) рассчитаем модовый спектр уединенного лазера при  $b = 2.8 \cdot 10^{-4}$ ;  $q = -5 \dots 0 \dots 5$ ;  $\chi = 10^{-5}$  получаем Рис.4, где ось  $x$  - номер мод, ось  $y$  - мощность мод.



(2)



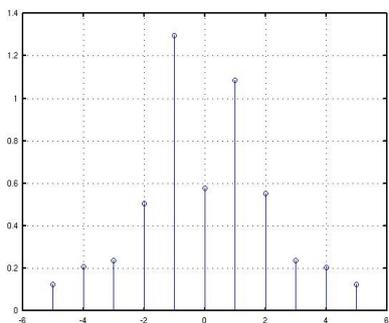
(3)



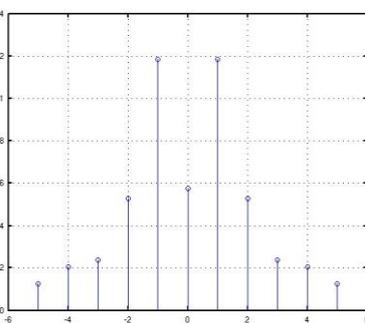
(4)

Спектр продольных мод уединенного лазера  
при  $x : 10^{-3}$  (2);  $10^{-4}$  (3);  $10^{-5}$  (4)

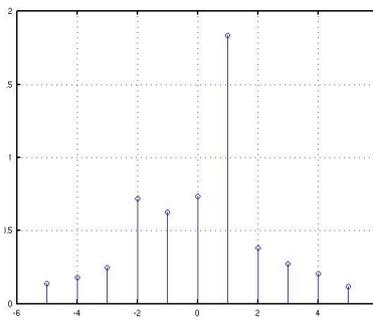
Рассчитаем спектр продольных мод лазера с внешней оптической обратной связью с помощью формулы (11) с использованием следующих численных значений параметров:  $b = 2,8 \cdot 10^{-4}$ ;  $\chi = 10^{-3}$ ;  $\rho = 1,45$ ;  $R3 = 10^{-6}$ ;  $\Gamma g_0 = 65 \text{ см}^{-1}$ ;  $L = 250 \text{ мкм}$ ;  $\sigma = 3,35 \cdot 10^{-4}$ ;  $q = -5 \dots 0 \dots 5$ .



(5)

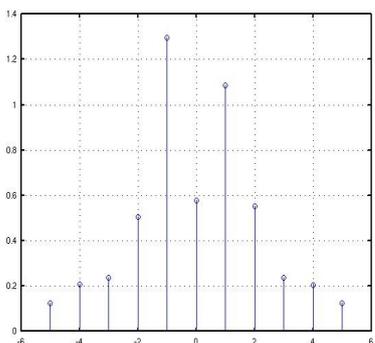


(6)

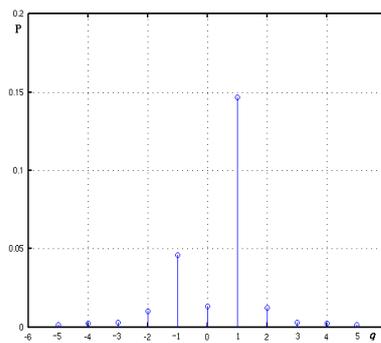


(7)

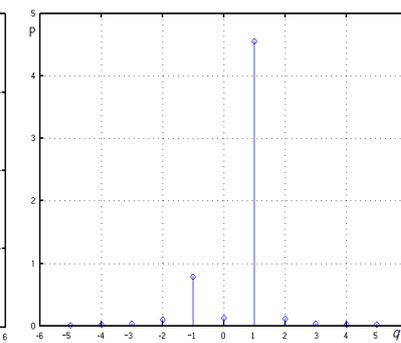
*Спектр продольных мод лазера с внешней ООС  
при  $\xi = 1000048$  (5);  $10000,50$  (6);  $10000,67$  (7)*



(4)



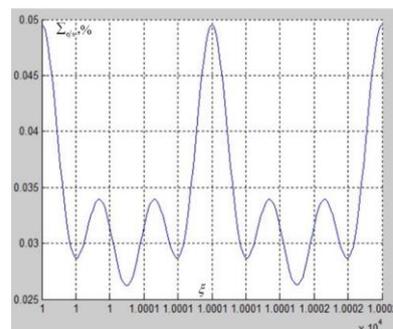
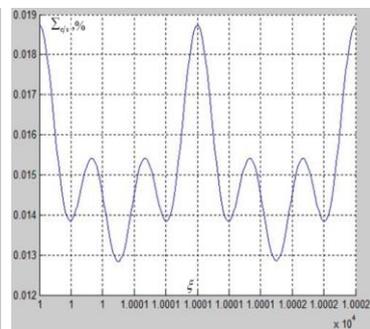
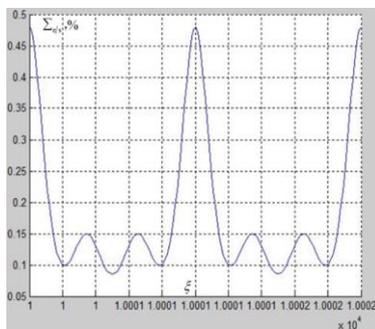
(7)



(8)

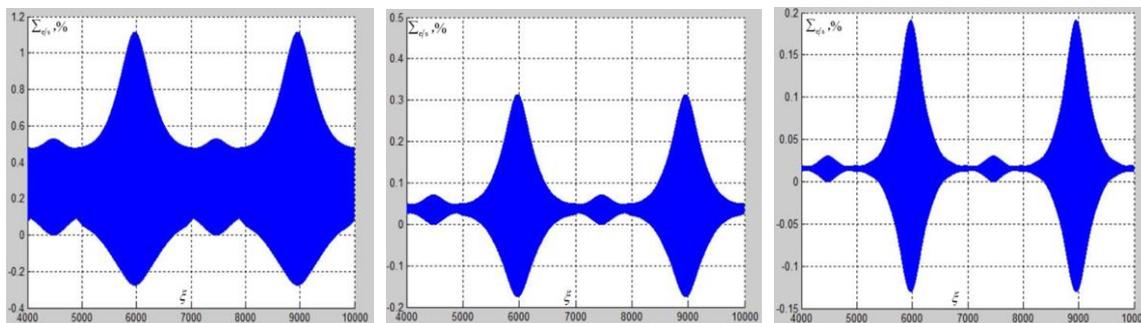
Рис 7 и 8 значения остальных параметров те же, что и на рис.4, кроме  $\chi = 10^{-4}$  и  $\chi = 10^{-5}$ .

Для исследования пространственных ондуляций суммарной мощности 19 мод лазера используем формулу (13) с использованием следующих численных значений параметров:  $b = 2,8 \cdot 10^{-4}$ ;  $\rho = 1,45$ ;  $R3 = 10^{-6}$ ;  $\Gamma g_0 = 65 \text{ см}^{-1}$ ;  $L = 250 \text{ мкм}$ ;  $\sigma = 3,35 \cdot 10^{-4}$ .



*Локальные пространственные ондуляции суммарной мощности лазера при  
 $x = 1 \cdot 10^{-3}$ (10);  $2 \cdot 10^{-3}$ (11);  $3 \cdot 10^{-3}$ (12)*

Для выявления общего характера ондуляций проведены расчеты в более широком диапазоне изменения расстояния до внешнего отражателя. Для этого рассчитайте зависимость суммарной мощности 19 мод от параметра  $\xi$  по формуле (13) в диапазоне значений  $\xi = 4000 \dots 10000$ . значения остальных параметров те же что и на рис.12.



*Пространственные ондуляции суммарной мощности лазера при  $x = 1 \cdot 10^{-3}(13); 2 \cdot 10^{-3}(14); 3 \cdot 10^{-3}(15)$*

### **Заключение.**

1. Рассмотрено асимптотическое приближение для расчета мощности продольных мод лазера. При расчете потерь в составном резонаторе использовано условие слабой оптической обратной связи.
2. Рассчитаны спектры продольных мод уединенного лазера при различном дефиците усиления доминирующей моды. Показано, что с уменьшением дефицита усиления спектр лазера приближается к одномодовому.
3. Проведен расчет спектра лазера с внешней оптической обратной связью при различном расстоянии до внешнего отражателя и различном дефиците усиления. Показано, что огибающая спектра в этом случае мод приобретает сложный характер. При этом возможно появление нескольких, в том числе не соседних, доминирующих мод.
4. При уменьшении дефицита усиления число мод в спектре, как и в случае уединенного лазера, уменьшается.
5. Рассчитана зависимость мощности излучения лазера от расстояния до внешнего отражателя. Показано, что с уменьшением числа мод в спектре локальные максимумы мощности становятся более резкими.
6. Полученные результаты могут быть использованы при построении прецизионных датчиков смещения на основе полупроводниковых инжекционных лазеров.