

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ МНОГОМОДОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРАХ

Р. Г. Аллахвердян, В. Н. Морозов, А. Ф. Сучков

Экспериментальное исследование спектра генерации полупроводникового лазера показывает, что одновременная генерация нескольких аксиальных мод начинается уже при 5–10%-ном превышении мощности накачки над порогом /1/. Однако известные механизмы многомодовой генерации позволяют объяснить возбуждение нескольких мод лишь при 1,5–2-кратном повышении порога генерации /2,3/.

В работе /4/ было высказано предположение о возможной взаимосвязи уширения спектра генерации с автомодуляцией интенсивности излучения. Из результатов исследования динамики спектра ОКГ на стеклах с неодимом /5/ следует, что спонтанный шум играет важную роль в процессе формирования спектра генерации. Учет влияния спонтанного излучения на спектр генерации особенно важен в полупроводниковых лазерах, так как интенсивность спонтанного шума в них велика по сравнению с другими активными средами. В настоящей работе показано, что действие спонтанного шума в режиме незатухающих пульсаций приводит к многомодовой генерации.

Автомодуляция излучения с большой глубиной модуляции в полупроводниковых лазерах может возбуждаться вследствие нелинейных потерь из активной области. В настоящей работе нас интересует лишь сам факт нестационарности режима генерации, а не причины его возникновения, поэтому мы для простоты рассматриваем не автономную задачу, когда "пиковый" режим возбуждается модуляцией тока накачки. Для исследования влияния пульсаций излучения на спектр генерации воспользуемся обычными уравнениями баланса и учтем в них спонтанное излучение s . В безразмерных переменных $v = \sqrt{\tau/\eta}(x - 1)$, $u_0 = n_0/\bar{n}_0$, $u_1 = n_1/\bar{n}_0$, $\theta = \omega_k t$

система уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{v} &= 1 - u_0 - 2u_1 + \mu f_2 = 1 - u_0 - 2u_1 - \varepsilon v - \varepsilon \eta v u_0 - \\ &\quad - 2\varepsilon \eta v u_1 + 2\beta u_1 + \frac{\Delta}{\tau} \text{Sin}\Omega(\theta + \theta_0), \\ \dot{u}_0 &= v u_0 + \mu f_0 = v u_0 + \varepsilon s \tau^2 / \eta, \\ \dot{u}_1 &= v u_1 + \mu f_1 = v u_1 - \varepsilon \beta \tau u_1 + \varepsilon s \tau^2 / \eta, \end{aligned} \quad (I)$$

где x - число активных частиц, m_0 - интенсивность основной моды, возбуждаемой на пороге генерации, m_1 - интенсивность соседних боковых мод, $\bar{m}_0 = (x' - 1)/\tau = \eta/\tau$ - стационарная интенсивность поля в одномодовом лазере, $\tau_p = 1/G$ - время жизни фотона в резонаторе, τ_0 - время спонтанной рекомбинации, x' - число частиц, накачиваемых в активной области, η - превышение накачки над порогом генерации, $\omega_k = \sqrt{\eta/\tau}$; $\tau = \tau_0 G$; $\varepsilon = 1/\omega_k \tau \sim 10^{-1} - 10^{-2}$; $\beta = (\delta\omega)^2/2 \sim 10^{-3} - 10^{-4}$ - разница в коэффициентах усиления типов колебаний.

В правые части (I) формально введен малый параметр μ , чтобы отобразить малость функций f_i , поэтому при достаточно малом μ решение (I) будет близко к решению порождающей системы

$$\begin{cases} \dot{v} = 1 - \phi \\ \dot{\phi} = v\phi, \end{cases} \quad (2)$$

где $\phi = u_0 + 2u_1$.

Система (2) консервативна и обладает двумя однозначными аналитическими интегралами движения

$$\begin{cases} (v)^2/2 + \phi - \ln \phi = C \\ u_1/u_0 = \gamma. \end{cases} \quad (3)$$

На фазовой плоскости $(\phi, \dot{\phi})$ уравнения (2) определяют замкнутые траектории, удовлетворяющие известному уравнению предельного цикла /6/,

$$\ddot{\phi} - \dot{\phi}^2/\phi + \phi(\phi - 1) = 0. \quad (4)$$

С неявно определяет глубину модуляции: $\phi_{\max} = C/2$; $\phi_{\min} = \exp(-C/2)$. В зависимости от постоянной γ происходит перераспределение полной энергии излучения по спектру. Действительно, усредненные за

период пульсаций интенсивности мод равны: $\bar{u}_0 = 1/(1 + 2\gamma)$,
 $\bar{u}_1 = \gamma/(1 + 2\gamma)$. γ определяется следующим выражением:

$$\gamma = \frac{s\tau\varphi(C) - \eta\beta + \sqrt{[s\tau\varphi(C) - \eta\beta]^2 + 8(s\tau)^2\varphi(C)}}{4s\tau\varphi(C)}, \quad (5)$$

где $\varphi(C) = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \frac{d\theta}{\Phi}$.

При $s \rightarrow 0$, $\gamma \rightarrow 0$ и следовательно, $\bar{u}_1 \rightarrow 0$. При большой глубине модуляции ($C \gg 1$)

$$\gamma \approx 1 - \frac{\eta\beta T_0 C}{4s\tau\sqrt{C} - 2\exp(C + 2)}$$

Для сравнения интенсивностей мод система (I) решалась в стационарном режиме, когда отсутствуют пульсации излучения ($\Delta = 0$). Интенсивности основной и боковых мод соответственно равны:

$$\bar{m}_0 = (x' - 1)/\tau - 2s/\beta; \quad \bar{m}_1 = s/\beta.$$

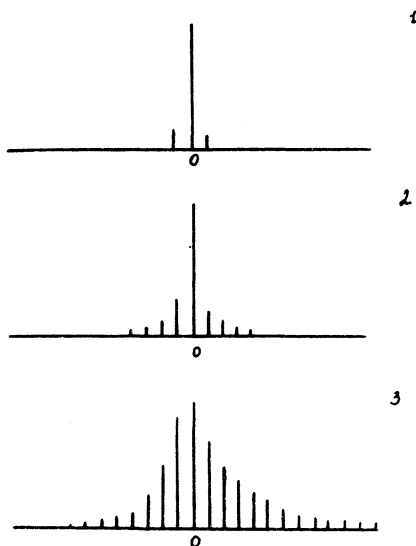
Приведем численный пример. Для резонатора с длиной $L = 250$ мм $\tau_p = 2 \cdot 10^{-12}$ сек, $\hbar\delta\Omega = 4,4 \cdot 10^{-4}$ эв, $\beta \sim 3 \cdot 10^{-4}$ и при $\tau_0 = 10^{-9}$ сек, $s \sim 10^{-9}$ (заметим, что $s/m_0 \sim 10^{-5}$), $\eta \sim 0,1$ (10%-ное превышение порога генерации) в стационарном режиме $\gamma \sim 0,01$. В режиме пульсаций с большой глубиной модуляции ($C \gg 1$) при $C = 8$, $\Phi_{\max} = 4$, $\Phi_{\min} = 0,018$, $\gamma \sim 0,94$, боковая мода сравнима по интенсивности с основной. Полупроводниковый лазер генерирует несколько типов колебаний.

Одновременно генерацию нескольких мод можно объяснить следующим образом. При глубокой модуляции излучения спонтанное излучение в тип колебания играет по отношению к индуцированному излучению в ту же моду роль внешнего фактора, компенсирующего разницу в потерях типов колебаний в промежутках между световыми импульсами, когда интенсивность индуцированного излучения мала. Поэтому в среднем за время между "пичками" пороговые условия для возбуждения нескольких мод оказываются выполненными.

Анализ многомодовой генерации мы провели для трех мод. При учете большого числа колебаний (25 мод) задача решалась чис-

ленно на ЭМ. Результаты численного решения для 3 мод совпадают с результатами аналитического рассмотрения:

I. При $s = 0$ для любой глубины модуляции излучения в установившемся режиме генерации возбуждается одна мода.



Р и с. I. Спектр генерации полупроводникового лазера в режиме пульсаций излучения при различной глубине модуляции поля Φ :

$\lambda = \frac{\Phi_{\max}}{\Phi_{\min}} \tau_p = 3 \cdot 10^{-12}$, $\eta \sim 0,1$, $\delta E \sim 10^{-4}$ эв, $s = 10^{-9}$. Индексу 0 соответствует основная мода. 1 - $\lambda = 0$; 2 - $\lambda = 30$; 3 - $\lambda = 130$.

2. При $s \neq 0$ в стационарном режиме генерация имеет одно-модовый характер ($\chi \leq 0,01$).

3. При наличии пульсаций и учете действия спонтанного излучения спектр уширяется и становится многомодовым.

4. Интенсивности боковых мод растут с увеличением глубины модуляции излучения.

Эти выводы, справедливы и для 25 мод, иллюстрируются рис.

I. Асимметрия спектра генерации связана с асимметрией формы коэффициента усиления и сканированием квазиуровня Ферми.

Полученные результаты качественно согласуются с данными эксперимента /7,8/.

Таким образом, пульсации излучения полупроводникового лазера могут привести к одновременному возбуждению нескольких мод вблизи порога генерации. С этой точки зрения для получения одномодовой генерации в полупроводниковых лазерах необходимо сгладить пульсации излучения, например, путем введения отрицательной обратной связи.

Поступила в редакцию

27 января 1972 г.

Л и т е р а т у р а

1. Н. Г. Басов, П. Г. Елисеев, И. М. Исмаилов, И. З. Пинскер, В. П. Страхов. *ЖТФ*, **37**, 351 (1967).
2. H. Statz, G. L. Tang, J. M. Lavine. *J. Appl. Phys.*, **35**, 2581 (1964).
3. И. А. Полуэктов, Ю. М. Попов, И. Н. Шуйкин. IX Международная конференция по физике полупроводников, изд. "Наука", 1968 г. В. Ю. Никитин, И. А. Полуэктов, *ФТТ*, **3**, 851 (1969).
4. N. G. Basov. *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-4**, 855 (1968).
5. А. Ф. Сучков. Препринт ФИАН № 126, 1970 г.
6. Э. М. Беленов, В. Н. Морозов, А. Н. Ораевский. "Квантовая радиофизика", Труды ФИАН, **52**, 237 (1970).
7. Ю. П. Захаров, В. А. Коваленко, В. Ф. Литвинов, В. Н. Морозов, В. В. Никитин, А. С. Семенов, В. Л. Смирнов. Сб. "Квантовая электроника" № **4**, 99, изд. "Советское радио" (1971).
8. А. П. Богатов, В. И. Пантелеев, Е. Г. Шевченко. Сб. "Квантовая электроника" № **5**, 93, изд. "Советское радио" (1971).