

## НАБЛЮДЕНИЕ ПРОВАЛА В СПЕКТРЕ СПОНТАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И НАСЫЩЕНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ОДНОМОДОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ

*В.Ф.Елесин, А.И.Ерко, А.И.Ларкин*

Обнаружен провал в спектре спонтанного излучения вблизи частоты генерации. Величина критической мощности появления провала, его ширина и зависимость ширины от интенсивности позволяют интерпретировать явление, как образование щели в энергетическом спектре электронов. Наблюдено насыщение одномодовой генерации до порога возникновения второй моды. Значение предельной мощности, ее квадратичная зависимость от времени жизни фотонов в резонаторе находятся в согласии с кинетической теорией лазеров.

В работе [1] было показано, что в спектре электронов полупроводника, находящегося в сильном электромагнитном поле с энергией кванта, большей ширины запрещенной зоны, появляется щель, обусловленная снятием вырождения в системе электроны-фотоны за счет силь-

ного электрон-фотонного взаимодействия. В результате столкновения электронов с фононами, дырками и заряженными примесями [2, 3] щель в спектре разрушается при некотором критическом значении поля  $\lambda_c$ , где  $\lambda$  — ширина щели, пропорциональная амплитуде поля. Для легированного GaAs критическое значение интенсивности появления щели оценивается в  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. При наличии щели в спектре спонтанного излучения должен образоваться провал шириной  $\Delta = 2\lambda$  вблизи частоты генерации [4]. Ряд экспериментальных данных [5, 6] свидетельствуют в пользу этой теории, однако, до настоящего времени прямых исследований эффекта образования щели в энергетическом спектре электронов не было. Постановка эксперимента при интенсивности излучения  $\sim 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> оказалась возможной в результате использования инжекционного полупроводникового лазера (ПЛ) с голографическим селектором [7] во внешнем резонаторе, благодаря его большой дифракционной эффективности и высокой угловой дисперсии.

В экспериментах использовались инжекционные ПЛ с полосковым контактом, работающие при комнатной температуре в импульсном режиме, а также ПЛ, работающие в непрерывном режиме при температуре жидкого азота. Торцы лазерных диодов не просветлялись, так что собственные грани ПЛ и голографический селектор образовывали составной селективный резонатор. Частота голографической решетки селектора 3060 л/мм дифракционная эффективность 85% на длине волны 860 нм. Длина внешнего резонатора 30 см. Общее разрешение тракта регистрации спектра 0,7Å.

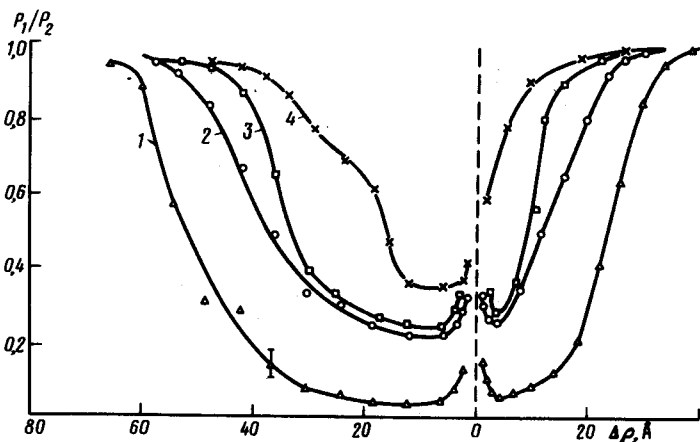


Рис. 1,а. Относительная величина провала в огибающей спектра нелазерных мод: 1 — интенсивность лазерной моды  $P_0 = 1,8 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, 2 —  $0,65P_0$ , 3 —  $0,46P_0$ , 4 —  $0,20P_0$ .

На рис. 1, а приведены кривые относительного подавления нелазерных (суперлюминисцентных) мод при различных интенсивностях лазерной моды, выделенной резонансом внешней голографической решетки. Здесь  $P_2$  — интенсивность нелазерной моды без внешней связи,  $P_1$  — при включении внешнего резонатора. Положение моды, на которую настроен внешний резонатор выделено на рисунке пунктирной линией.

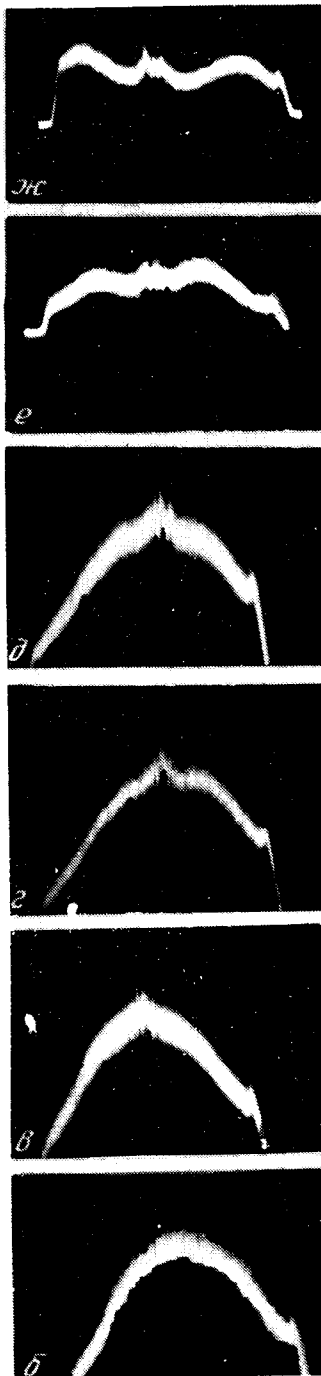


Рис. 1, б - ж. Спектры спонтанного излучения ПЛ в направлении  $21^\circ$  к оси резонатора. По вертикали - относительная интенсивность спектральных компонент. Масштаб по горизонтали  $6 \text{ \AA}/\text{дел}$ : б - интенсивность когерентного излучения  $P = 0,02 \cdot 10^5 \text{ Вт}/\text{см}^2$ , в -  $P = 0,8 \cdot 10^5 \text{ Вт}/\text{см}^2$ , г -  $P = 0,9 \cdot 10^5 \text{ Вт}/\text{см}^2$ , д -  $P = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Вт}/\text{см}^2$ , е -  $P = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Вт}/\text{см}^2$ , ж -  $P = 2,3 \cdot 10^5 \text{ Вт}/\text{см}^2$

Вправо и влево от нее отложена расстройка  $\Delta\rho$  в  $\text{\AA}$ . Все кривые сняты при одинаковой накачке. Интенсивность лазерной моды изменялась введением дополнительных потерь во внешний резонатор.

Изменения в спектрах спонтанного излучения с увеличением тока накачки показаны на рис. 1, б – ж. Здесь приведены спектры спонтанного излучения, снятые под углом  $21^\circ$  к оси резонатора, в телесном угле  $12''$  вне диаграммы направленности когерентного излучения. На фотографиях также видно образование провала в спектре спонтанного излучения при интенсивностях выше  $0,9 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Критическое поле появления провала и предельная интенсивность одномодовой генерации по порядку величины соответствуют оценкам теории сильного поля [2–4]. Теоретическая величина провала в спектре при интенсивности  $2 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> составляет по порядку величины  $10^{12}$  сек<sup>-1</sup>. Измеренное значение полуширины провала равно  $(1 \pm 0,5) \cdot 10^{12}$  сек<sup>-1</sup>. Изменение ширины провала с интенсивностью генерации в пределах ошибки измерений пропорциональна амплитуде поля, в соответствии с теорией [1].

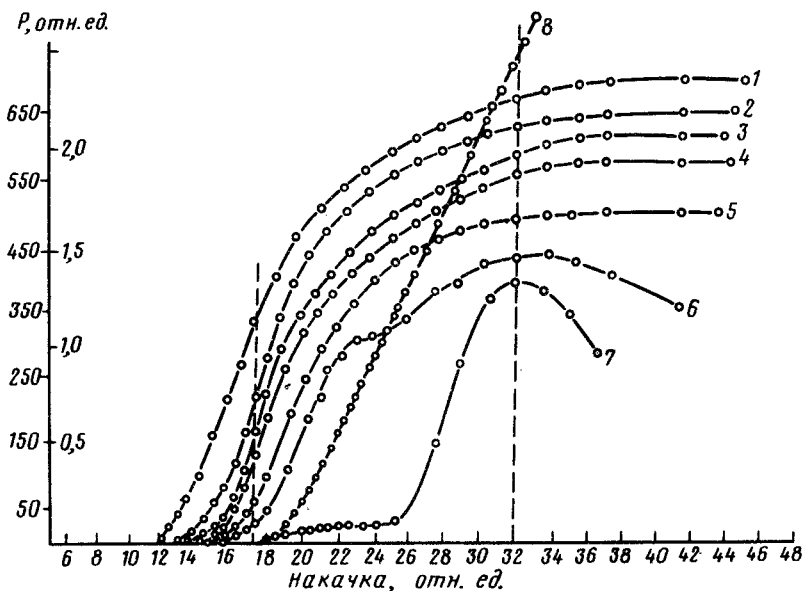


Рис. 2. Ватт-амперные характеристики моды излучения ПЛ с внешним голографическим резонатором: 1 – без потерь во внешнем резонаторе; 2 – пропускание фильтра 0,8; 3 – 0,68; 4 – 0,52; 5 – 0,3; 6 – 0,13; 7 – без внешнего резонатора; 8 – интегральная по спектру мощность излучения без внешнего резонатора

Одним из важных результатов, полученных в кинетической теории ПЛ было предсказание насыщения одномодовой генерации до порога возникновения второй моды [8, 9]. На рис. 2 приведены зависимости мощности одномодовой генерации от тока накачки при различных потерях во внешнем резонаторе. Пороговый ток второй моды равен  $34\text{А}$ . Видно, что насыщение генерации происходит в одномодовом режиме, причем, как показали измерения, предельная мощность пропорциональна квадрату времени жизни фотонов в резонаторе  $\tau_0$ . Величина предельной мощности, ее зависимость от  $\tau_0$  в согласии с выводами кинетической теории [9] позволяет сделать заключение о важности учета эффекта насыщения – основного нелинейного эффекта в ПЛ.

Авторы выражают благодарность научно-техническому совету кафедры физики твердого тела МИФИ под председательством Ю.А.Быковского за обсуждение экспериментальных результатов, Ю.П.Захарову за предоставленные образцы лазерных диодов, В.Г.Бахтину за помощь в проведении эксперимента.

Московский  
инженерно-физический институт

Поступила в редакцию  
18 апреля 1979 г.

### Литература

- [1] С.П.Гореславский, В.М.Галицкий, В.Ф.Елесин. ЖЭТФ, 57, 207, 1969.
  - [2] В.Ф.Елесин. ФТТ, 11, 1820, 1969; ЖЭТФ, 59, 602, 1970.
  - [3] В.Ф.Елесин. ФТП, 4, 1524, 1970.
  - [4] А.С.Александров, В.Ф.Елесин. ФТП, 5, 615, 1971.
  - [5] F. Nicoll. J. Appl. Phys., 42, 2743, 1971.
  - [6] M. Nakamura et. al. J. Appl. Phys., 49, 4644, 1978.
  - [7] М.С.Соскин, В.Б.Тараненко. Квантовая электроника, 4, 536, 1977.
  - [8] В.М.Галицкий, В.Ф.Елесин. ЖЭТФ, 68, 216, 1975.
  - [9] В.М.Галицкий, В.Ф.Елесин, В.Е.Кондрашов. Кинетическая теория полупроводниковых квантовых генераторов, ИАЭ, 1978.
-