

АВТОМОДУЛЯЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ИНЖЕКЦИОННОГО  
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА

В.Д.Курносков, В.И.Магалис, А.А.Плешков,  
Л.А.Ривлин, В.Г.Трухан, В.В.Цветков

Известный факт существования амплитудной автомодуляции излучения квантовых генераторов с оптической накачкой, например, на рубине [1] или другом диэлектрике (так называемый режим "пичков") дает основание ожидать и в инжекционных полупроводниковых генераторах аналогичных явлений, если, следуя [2,3], полагать, что в них находят свое отражение общие свойства лазеров, как автоколебательных систем.

Кинетические уравнения для мощности инжекционного полупроводникового генератора  $P$ , отнесенной к единичному поперечному сечению активного слоя, и для нормированной концентрации  $S$  можно записать в виде:

$$\frac{dP}{d\theta} = \alpha u \tau \frac{1+\gamma}{S_n-1} \frac{S-S_n}{\gamma S+1} P, \quad (1)$$

$$\frac{dS}{d\theta} = S_a - S - (S_a - S_n) \frac{\gamma S_n + 1}{S_n - 1} \frac{S-1}{\gamma S+1} \frac{P}{P_0}, \quad (2)$$

где коэффициент поглощения монохроматического света частоты  $\nu$  в полупроводнике с параболической валентной зоной и экспоненциаль-

ной зоной проводимости представлен [4] выражением  $\alpha_0 + \Psi = \alpha_0 + \Psi_0(1-S)(1+\gamma S)^{-1}$ , причем  $S = (n - n_0)/(n_H - n_0)^{-1}$ ,  $n$  - концентрация электронов или дырок (предполагается, что они равны),  $n_0$  - их равновесное значение,  $n_H$  - их значение, при котором для фотонов с энергией  $h\nu$  происходит насыщение (т.е.  $\Psi = 0$ ),  $\Psi_0$  и  $\gamma$  - положительные константы,  $\alpha_0$  - коэффициент затухания, характеризующий все виды потерь фотонов в веществе,  $\alpha$  - эффективный коэффициент затухания, учитывающий как  $\alpha_0$ , так и потери на излучение из резонатора,  $\theta = t/\tau$  - нормированное время,  $\tau$  - время спонтанной рекомбинации,  $S_n = (1 + \frac{\alpha}{\Psi_0})(1 - \gamma \frac{\alpha}{\Psi_0})^{-1}$  - пороговое значение  $S$ ,  $P_0 = (1 - \frac{\alpha_0}{\alpha})(S_\alpha - S_n)(n_H - n_0) \frac{h\nu}{\tau} L$ ,  $L$  - длина резонатора,

$S_\alpha = j\mu\tau [ed(n_H - n_0)]^{-1}$  - асимптотическое значение  $S$ , достигаемое при  $P = 0$  и  $\theta \rightarrow \infty$ ,  $j$  - плотность тока инъекций в активный слой толщины  $d$ ,  $e$  - элементарный заряд,  $\mu$  - квантовый выход инъекции,  $c$  - скорость света в веществе. В уравнениях (1), (2) предполагается равномерность распределения всех величин в активном слое, независимость  $\tau$  от  $n$ , а также возможность пренебрежения эффектами пространственного заряда и ловушками.

Система (1), (2) с сингулярностями в точках  $S = S_n$ ,  $P = P_0$  и  $S = S_\alpha$ ,  $P = 0$  образует типичную для режима "пичков" фазовую картину, аналогичную полученной в [3] для диэлектрических генераторов с оптической накачкой.

Если, как обычно,  $S = S_n(1 + \varphi)$ ,  $|\varphi| \ll 1$ , то в консервативном приближении интегрирование (1), (2) дает форму "пичка" волизи вершины

$$\frac{P}{P_n} = 1 - A \frac{(P_n - P_0)^3}{P_n^2} \operatorname{th}^2 \left[ \left( \frac{P_n}{P_0} - 1 \right) \left( \frac{S_\alpha}{S_n} - 1 \right) \theta \right], \quad (3)$$

где  $A = 2(S_\alpha - S_n)(\gamma S_n + 1)(S_n - 1) [\alpha \mu \tau S_n^2 P_0 (\gamma + 1)]^{-1}$ , и для отношения мощностей в минимуме между "пичками"  $P_u$  и в максимуме на вершине  $P_n$

зависимость  $P_n - P_u = P_0 \ln \frac{P_n}{P_u}$ . Для случая  $P_n \gg P_0$  длительность "пичка"  $\theta_n$  и интервала между ними  $\theta_u$  оцениваются соответственно как

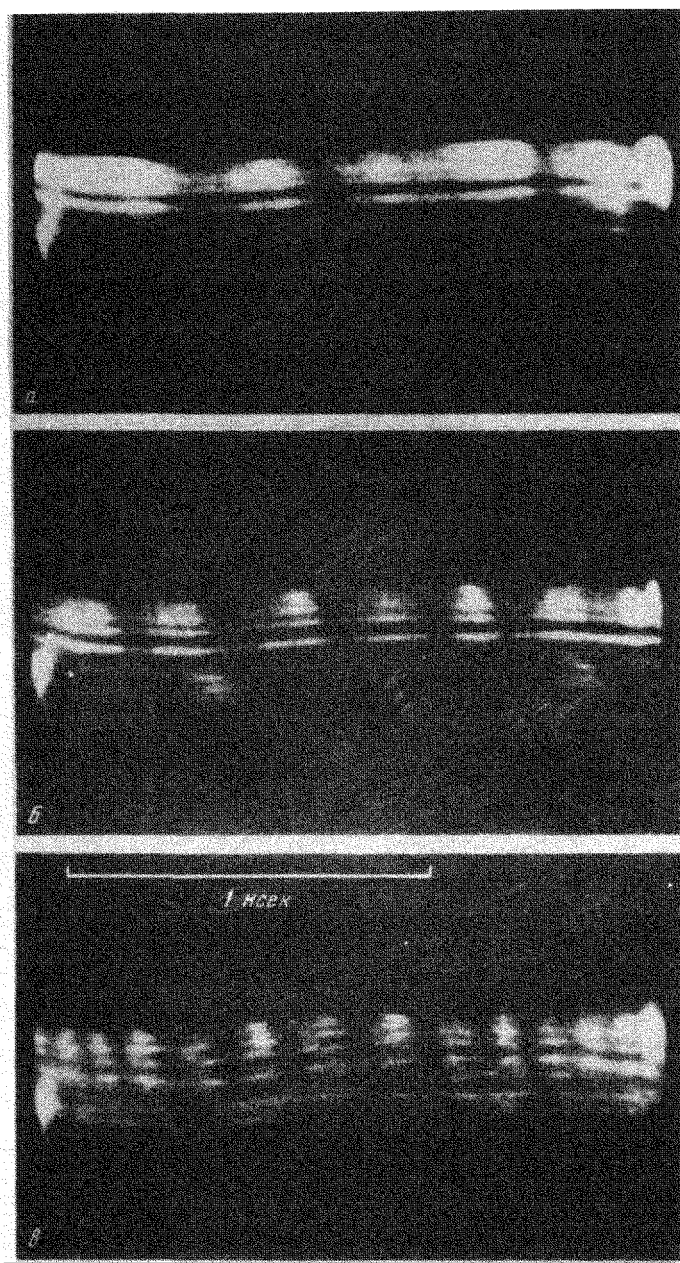
$$\theta_n \approx P_0 S_n [(S_\alpha - S_n) P_n]^{-1} \ln \frac{\sqrt{2AP_n + 1}}{\sqrt{2AP_n - 1}} \quad \text{и} \quad \theta_u = 2S_n (S_\alpha - S_n)^{-1} \sqrt{AP_n},$$

причем для типичных значений параметров  $\theta_n$  и  $\theta_u$  существенно меньше единицы, что предъявляет высокие требования к временной разрешающей способности аппаратуры для регистрации излучения.

Экспериментальное наблюдение временной структуры излучения GaAs-лазера производилось с помощью электронно-оптического преобразователя [5] со сканированием изображения с длительностью развертки около 2 нсек на 35 мм экране при разрешающей способности не хуже 0,02 нсек. Калибровка времени осуществлялась двумя независимыми способами: с помощью синусоидального напряжения с частотой 500 Мгц и методом оптической задержки на 0,11 нсек расщепленного светового сигнала. Изображение светящегося активного слоя диода проектировалось микрообъективами с увеличением от  $1^x$  до  $30^x$  из вакуумного криостата с жидким азотом на фотокатод электронно-оптического преобразователя так, что плоскость  $p-n$ -перехода была перпендикулярна направлению развертки. Диод GaAs с  $p-n$ -переходом, образованным диффузионным методом, возбуждался одиночными импульсами тока инжекции от 1 до 5 а и длительностью 600 нсек, синхронизованными с импульсным питанием электронно-оптического преобразователя.

На типичных фотографиях (см. рисунок) развернутого во времени изображения светящегося активного слоя отчетливо видна автомодуляция излучения ("пички") (диод № 63M4, пороговый ток 1,85 а). Заметно также уменьшение периода автомодуляции при увеличении тока инжекции: рис. I, а - 2 а и 0,35 нсек, рис. I, б - 2,7 а и 0,21 нсек, рис. I, в - 4,3 а и 0,17 нсек. Автомодуляция спонтанного свечения ниже порога отсутствовала (при экспонировании яркость излучения при разных токах уравнивалась светофильтрами). На других диодах были зарегистрированы периоды автомодуляции около 0,05 нсек при трехкратном превышении над порогом. Кроме синхронной автомодуляции излучения из

всех отдельных светящихся областей активного слоя, как на рисунке, у диодов с резко изолированными светящимися точками наблюдалась и не-



синхронная автомодуляция с неодинаковыми периодами для разных точек, что, возможно, связано с различием в их локальных порогах и с неоднородностью распределения плотности тока инжекции.

Следует заметить, что наблюдавшаяся амплитудная автомодуляция с периодом менее 0,1 нсек может вносить значительный вклад в уширение линии полупроводниковых генераторов.

Приведенный выше расчет сделан, по существу, в одномодовом приближении. Поэтому для сопоставления расчетных и экспериментальных данных последние необходимо дополнить спектральными измерениями, позволяющими судить о составе мод в излучении, а сами временные характеристики следует подвергнуть микрофотометрическому анализу. Однако уже сейчас можно отметить совпадение по порядку величины расчетных и экспериментальных значений периода автомодуляции в зависимости от уровня тока инжекции.

Авторы благодарны М.М.Бутслову за ценные консультации и предоставление трубок электронно-оптического преобразователя.

Поступило в редакцию

29 июля 1966 г.

#### Литература

- [1] R.J.Collins, D.P.Nelson, A.L.Schawlow, W.Bond, C.G.B.Garret, W.Kaiser. *Phys. Rev.Lett.*, 5, 303, 1960.
- [2] D.M.Sinnet. *J.Appl. Phys.*, 33, 1578, 1962.
- [3] В.И.Беспалов, А.В.Гапонов. *Изв. Вузов.Радиофизика*, 8, 70, 1965.
- [4] F.Stern. *Phys. of Quant. Electr. Conf. Proc. (Puerto-Rico,1965)*, p.442, N.Y., 1966.
- [5] М.М.Бутслов. *Успехи научной фотографии*, № 6, 76, 1959.