

06.2;06.3;07

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В InGaAsP/InP ($\lambda = 1.55$ МКМ) ГЕТЕРОЛАЗЕРАХ С НАСЫЩАЮЩИМСЯ ПОГЛОТИТЕЛЕМ

© А.Г.Дерягин, В.И.Кучинский, Г.С.Соколовский

В настоящее время техника введения насыщающегося поглотителя (НП) широко используется как для лазеров с резонатором Фабри-Перо (для получения режима модуляции добротности и синхронизации мод $[1-3]$), так и для лазеров с распределенной обратной связью — РОС-лазеров (для подавления генерации мод Фабри-Перо и для получения режима модуляции добротности $[4,5]$). Анализу оптических характеристик таких лазеров было посвящено большое количество работ, но до сих пор их скоростные свойства вне режима пассивной модуляции добротности были недостаточно изучены.

В настоящей работе представлены результаты исследования и сравнения скоростных свойств имплантированных и неимплантированных полупроводниковых гетеролазеров с НП и рассмотрены факторы, их определяющие. В качестве экспериментальных образцов использовались инжекционные мезалосковые InGaAsP/InP ($\lambda \approx 1.55$ мкм) лазеры с шириной полоска ≈ 4 мкм и длиной 250 мкм как с резонатором Фабри-Перо, так и РОС. Область насыщающего поглотителя была образована имплантацией ионов N^{+3} ($5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) со стороны заднего зеркала на глубину ≈ 10 мкм.

Наиболее простым и удобным способом исследования скоростных свойств является наблюдение картин релаксационных колебаний (РК). Наблюдение РК позволяет исключить влияние электрических параметров лазерного диода и не требует высокого спектрального разрешения. Критерием, характеризующим максимальное быстродействие полупроводникового лазера, является предельная частота РК, которая ограничивает внутреннюю полосу модуляции лазера.

Частота РК определялась на экспериментальной установке, состоящей из схемы высокочастотной накачки, быстродействующего InGaAs $p-i-n$ -фотодиода с разрешением до 15 ГГц и стробоскопического осциллографа С1-91.

Нами наблюдалось прекращение линейного роста квадрата частоты РК при повышении выходной мощности $f_p \approx \text{const}(P_{\text{вых}})$, связанное с эффектом насыщения усиления

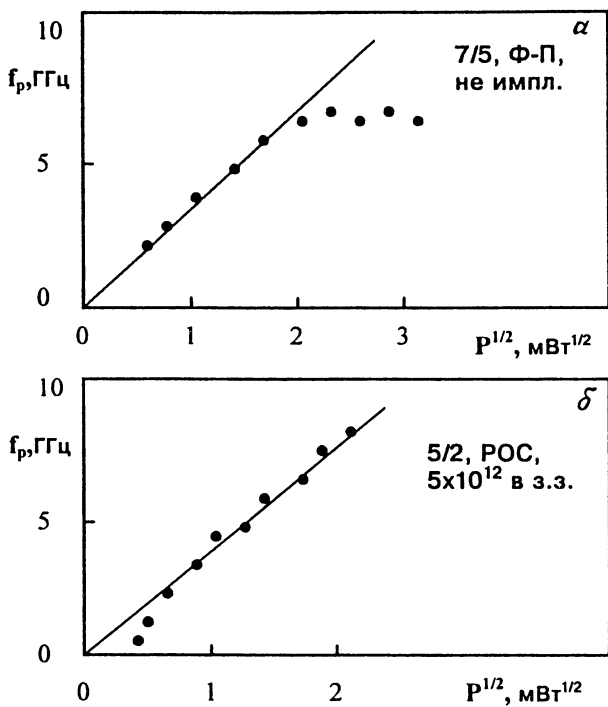


Рис. 1. Зависимость частоты релаксационных колебаний от выходной мощности и для сравнения линейная аппроксимация экспериментальных данных: *a* — для неимплантированного лазера с резонатором Фабри-Перо, *b* — для имплантированного лазера с РОС.

(рис.1, *a*), чем экспериментально подтверждены результаты теоретических исследований [6]. Заметим, что в ранних работах [7,8], посвященных этой тематике, подобный эффект не наблюдался. Кроме того, в настоящей работе экспериментально наблюдалась область малых мощностей выходного излучения лазеров с НП, свободная от РК (рис. 1, *b*), и построена теоретическая модель, объясняющая этот эффект.

Для описания переходных процессов в лазере с НП при малых мощностях выходного излучения была использована система балансных уравнений [9]

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - A(N - N_{np})S - \frac{N}{\tau}, \\ \frac{d\tilde{N}}{dt} = -\frac{\tilde{N} - N_n}{\tau_n} - B\tilde{N}S, \\ \frac{dS}{dt} = (1 - r)GA(N - N_{np})S - rB\tilde{N}S + \frac{\Gamma\beta N}{\tau} - \frac{S}{\tau_\Phi}, \end{cases} \quad (1)$$

где N — концентрация носителей заряда в активной области, S — концентрация фотонов в активной области, $N_{\text{пр}}$ — концентрация прозрачности, \tilde{N} — концентрация носителей заряда в активной области НП, $N_{\text{п}}$ — концентрация носителей заряда в области НП в отсутствие света, A — дифференциальное усиление, B — “дифференциальное поглощение” в области НП, τ — время жизни носителей заряда в активной области, $\tau_{\text{п}}$ — время жизни носителей заряда в области НП, $\tau_{\text{ф}}$ — время жизни фотонов, I — ток накачки, V — объем активной области, q — заряд электрона, r — объемная доля области НП в резонаторе. При выполнении условия $1/f_p \ll \tau_{\text{п}}$ система (1) преобразуется к виду

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - A(N - N_{\text{пр}})S - \frac{N}{\tau}, \\ \tilde{N}(t) = \frac{N_{\text{п}}}{1+B\tau_{\text{п}}S}(1 - e^{-t/\tau - BSt}) \approx \frac{N_{\text{п}}}{1+B\tau_{\text{п}}S}, \\ \frac{dS}{dt} = (1-r)\Gamma A(N - N_{\text{пр}})S - \frac{\tau BN_{\text{п}}S}{1+B\tau_{\text{п}}S} + \frac{\Gamma\beta N}{\tau} - \frac{S}{\tau_{\text{ф}}}. \end{cases} \quad (2)$$

При токе накачки, близком к пороговому: $B\tau_{\text{п}}S \ll 1$, т. е. когда влияние НП существенно, анализ системы (2) в режиме малого сигнала позволяет получить выражения для равновесных концентраций фотонов и носителей заряда, вид которых идентичен случаю отсутствия НП:

$$I = \text{const} \begin{cases} n_{\text{пор}} = N_{\text{пр}} + \frac{1}{\tau_{\text{ф}}A} & I = \text{const} \quad \tau_{\text{ф}} \rightarrow \tilde{\tau}_{\text{ф}}, \\ S = \left(\frac{I\tau_{\text{п}}}{qV} - n_{\text{пор}}\right) \frac{\tau}{\tau_{\text{ф}}} & ; r > 0 \\ & B\tau_{\text{п}}S \ll 1 \quad \tilde{\tau}_{\text{ф}} = \frac{\tau_{\text{ф}}}{1 + rBN_{\text{п}}\tau_{\text{ф}}}. \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, причиной исчезновения РК вблизи порога генерации является ухудшение дифференциальной ваттамперной характеристики лазерного диода при введении области НП в резонатор (рис. 2).

При численном моделировании были использованы следующие значения параметров лазерных диодов (см. таблицу).

A	$2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$	τ	$3 \cdot 10^{-9} \text{ с}$	$N_{\text{пр}}$	$1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
B	$5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3/\text{с}$	$\tau_{\text{п}}$	$1 \cdot 10^{-10} \text{ с}$	$N_{\text{п}}$	$1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
ϵ	$1.5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^3$	$\tau_{\text{ф}}$	$1 \cdot 10^{-12} \text{ с}$	r	0.01
q	$1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$	Γ	0.1	β	$1 \cdot 10^{-4}$
L	200 мкм	s	5 мкм	d	0.25 мкм

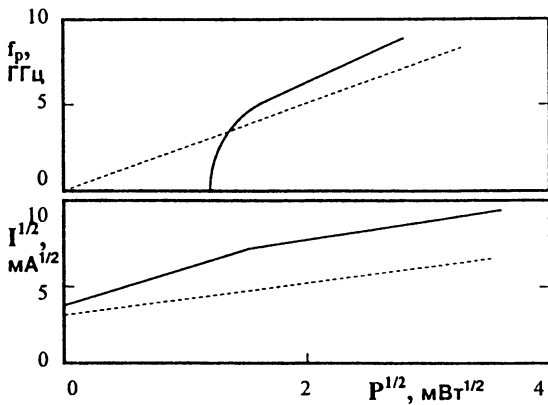


Рис. 2. Теоретически рассчитанная для околопороговой области зависимость частоты релаксационных колебаний от выходной мощности и ватт-амперная характеристика неимплантированных лазеров (пунктирная линия), а также лазеров с НП (сплошная линия).

Метод малосигнального анализа системы (2) с учетом нелинейного усиления ε позволяет получить аналитические выражения для частоты релаксационных колебаний $f_p(S)$ и декремента затухания $\delta_p(S)$:

$$\omega(S) = \delta_p(S) + f_p(S) = i \frac{\Delta(S)}{2} + \sqrt{f(S) - \frac{1}{4} \Delta(S)^2},$$

$$\Delta(S) = \frac{AS}{1 + \varepsilon S} - \frac{\Gamma A(N - n_{\text{пор}})}{(1 + \varepsilon S)^2} + \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_\phi} + \frac{rBN_n(1 + \varepsilon S)}{1 + B\tau_n S},$$

$$f_p(S) = \frac{\Gamma A(N - n_{\text{пор}}) \beta - 1}{(1 + \varepsilon S)^2} +$$

$$+ \left(\frac{AS}{1 + \varepsilon S} + \frac{1}{\tau} \right) \left(\frac{1}{\tau_\phi} + \frac{rBN_n(1 + \varepsilon S)}{1 + B\tau_n S} \right), \quad (4)$$

где

$$N - n_{\text{пор}} = \frac{S/\tau_\phi - \Gamma\beta n_{\text{пор}}/\tau + rBN_n/(1 + B\tau_n S)}{\Gamma AS/(1 + \varepsilon S) + \Gamma\beta/\tau}.$$

Рассмотрение выражения (4) для частоты РК выявляет существенное различие между околопороговой областью и областью высоких мощностей, свободными от релаксационных колебаний: в первом случае РК подавлены полностью

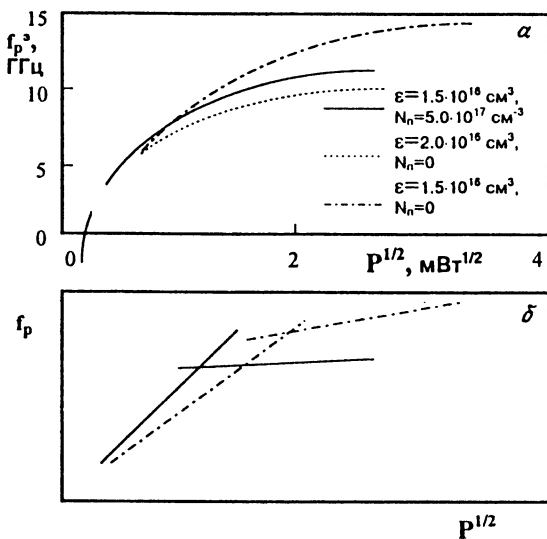


Рис. 3. Влияние величины насыщения усиления и концентрации рассеивающих центров в области НП на зависимость частоты релаксационных колебаний от выходной мощности (а). Возможная аппроксимация экспериментальных данных при измерении зависимости частоты релаксационных колебаний от выходной мощности для имплантированных (сплошная линия) и неимплантированных (пунктирная линия) лазерных диодов (б).

(f_p — чисто мнимая величина), а во втором — увеличивается скорость их затухания, но первый пик не исчезает. Поэтому для теоретического предсказания возможности экспериментального измерения частоты РК нами была использована функция Хевисайда, принимающая ненулевое значение только в том случае, если второй пик релаксационных колебаний не более чем в ϵ раз меньше первого по амплитуде:

$$\begin{cases} h(x) = 0, & x < 0, \\ h(x) = 1, & x \geq 0. \end{cases}$$

Произведение

$$f_p^{\circ}(S) = f_p(S) \cdot h(f_p(S)/\Delta(S)^{-1})$$

принимает значение частоты релаксационных колебаний в области выходных мощностей, где их экспериментальное измерение возможно и равно нулю в противном случае. На рис. 3, а представлен вид зависимостей для имплантированных и неимплантированных лазерных диодов. Из рисунка видно, что, хотя введение насыщающегося поглотителя

(увеличение N_n) уменьшает диапазон выходных мощностей, где частота РК поддается экспериментальному измерению, предельная частота РК уменьшается слабо, а участок нелинейной зависимости, обусловленной насыщением усиления, становится более ярко выраженным (рис. 3, б).

Таким образом, в настоящей работе получено экспериментальное подтверждение теории относительно нелинейной зависимости квадрата частоты РК от выходной мощности в области высоких мощностей. Нами также обнаружена область малых мощностей выходного излучения лазеров с НП, свободная от релаксационных колебаний, и дано теоретическое объяснение этого явления.

Авторы выражают благодарность Э.У. Рафаилову за полезные дискуссии.

Работа была выполнена благодаря финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), код проекта 93-02-16253.

Список литературы

- [1] Алферов Ж.И., Журавлев А.Б., Портной Е.Л., Стельмах Н.М. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 18. С. 1093-1098.
- [2] Волков Л.А., А.И. Гурьев, Данильченко В.Г., Дерягин А.Г., Куксенков Д.В., Кучинский В.И., Смирницкий В.Б., Е.Л. Портной // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 13. С. 6-9.
- [3] Deryagin A.G., Kuksenkov D.V., Kuchinskii V.I., Portnoi E.L., Khrushchev I.Yu. // Electr. Lett. 1994. V. 30. N 4. P. 309-311.
- [4] Барышев В.И., Голикова Е.Г., Дерягин А.Г., Дураев В.Г., Куксенков Д.В., Кучинский В.И., Смирницкий В.Б., Портной Е.Л. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 17. С. 47-51.
- [5] Кижжаев К.Ю., Куксенков Д.В., Кучинский В.И., Портной Е.Л., Смирницкий В.Б. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 10. С. 601-604.
- [6] Bowers J.E. // Solid State Electr. 1987. V. 30. N 1. P. 1-11.
- [7] Журавлев А.Б., Плявенек А.Г., Портной Е.Л., Серегин В.Ф., Стельмах Н.М., Якубович С.Д. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 7. С. 1208-1212.
- [8] Portnoi E.L., Avrutin E.A., Chelnokov A.V. Joint Soviet-American workshop on the physics of semiconductor lasers. Leningrad, USSR, May 20-June 3, 1991. P. 58-66.
- [9] Kuznetsov M. // IEEE J. Quant. El. 1985. V.QE-21. N 6. P. 587-592.

Физико-технический
институт
им. А.Ф. Иоффе РАН
С.-Петербург

Поступило в Редакцию
6 декабря 1995 г.