

01;06.2;06.3;07;12

## **К вопросу о времени переключения поляризации излучения полупроводникового лазера**

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

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

Поступило в Редакцию 11 декабря 1996 г.

В работе получены выражения для времени переключения поляризации излучения полупроводникового лазера. Полученные выражения позволяют оценить влияние параметров лазерного диода на время переключения поляризации выходного излучения. Результаты анализа полученных выражений показывают, что основным параметром, влияющим на процесс переключения поляризации выходного излучения полупроводникового лазера, являются коэффициенты нелинейного усиления.

Переключение, сосуществование и бистабильность ТЕ/ТМ-поляризации излучения полупроводниковых лазеров с напряженным активным слоем наблюдались в работах [1–3,5–7]. В работе [3] особое ударение было сделано на селективной роли резонатора. Позднее была предложена [4] квантово-механическая модель, описывающая внутризонные переходы в напряженных полупроводниковых слоях, и было показано [5], что поляризация лазерного излучения зависит от положения линии генерации на кривой усиления. Феноменологическая модель, объясняющая эффект переключения поляризации и поляризационной бистабильности, была развита в [6,7].

Полупроводниковые лазеры с поляризационным переключением и бистабильностью могут оказаться весьма полезными для систем оптической обработки и передачи данных, например в системах со спектральным уплотнением [8]. В связи с этим возникает вопрос, как быстро может происходить смена поляризации. К сожалению, до настоящего времени этой проблеме в литературе было уделено явно недостаточное внимание.

Нами предпринята попытка получить в явном виде выражения для времени переключения поляризации излучения полупроводникового

лазера и оценить влияние параметров лазерного диода на это время переключения.

Для получения аналитического выражения для времени переключения поляризации излучения полупроводникового лазера к системе скоростных уравнений был применен метод Ляпунова [9] — анализа устойчивости решений систем дифференциальных уравнений. Согласно Ляпунову, состояние системы (не)устойчиво, если малое отклонение от этого состояния в момент времени  $t = 0$  остается малым (увеличивается) за время  $0 < t < \infty$ . Так как рассматриваемое отклонение мало, система дифференциальных уравнений может быть линеаризована. Зависимость малого отклонения от положения равновесия от времени может быть записана следующим образом:

$$\delta(t) = \sum_i A_i V_i e^{P_i t}, \quad (1)$$

где  $P_i$  — собственные значения, а  $V_i$  — собственные вектора линеаризованной системы. Очевидно, что положение равновесия системы (не)устойчиво, если вещественные части всех (одного или более) собственных значений  $P_i$  отрицательны (положительны). Важно отметить, что собственные значения  $P_i$  представляют собой характеристическое время перехода системы из одного положения равновесия в другое.

Система скоростных уравнений имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = \frac{1}{qV} - g_{TE}(N - N_{TE})(1 - \varepsilon_{EE}S_{TE} - \varepsilon_{EM}S_{TM})S_{TE} \\ \quad - g_{TM}(N - N_{TM})(1 - \varepsilon_{ME}S_{TE} - \varepsilon_{MM}S_{TM})S_{TM} - \frac{N}{\tau}, \\ \frac{dS_{TE}}{dt} = g_{TE}(N - N_{TE})(1 - \varepsilon_{EE}S_{TE} - \varepsilon_{EM}S_{TM})S_{TE} + \beta \frac{N}{\tau} - \frac{S_{TE}}{\tau_{TE}}, \\ \frac{dS_{TM}}{dt} = g_{TM}(N - N_{TM})(1 - \varepsilon_{ME}S_{TE} - \varepsilon_{MM}S_{TM})S_{TM} + \beta \frac{N}{\tau} - \frac{S_{TM}}{\tau_{TM}}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $N$  — концентрация носителей заряда,  $s_{TE/TM}$  — плотность TE/TM-поляризованных фотонов,  $g_{TE/TM}$  — линейное усиление для TE/TM-поляризованного света,  $\tau_{TE/TM}$  — время жизни TE/TM-поляризованных фотонов,  $N_{TE/TM}$  — концентрация прозрачности для TE/TM-поляризованного света,  $\tau$  — время жизни носителей заряда,

$\varepsilon_{ij}$  — коэффициенты нелинейного усиления,  $\beta$  — коэффициент спонтанной эмиссии,  $q$  — элементарный заряд,  $V$  — объем активной области. Анализ устойчивости системы (2) проводился в приближении постоянной концентрации носителей заряда  $dN/dt = 0$ . Воспользовавшись этим условием, можно произвести весьма удобное преобразование:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dS_{TE}}{dt} &= g_{TE}\tau \left( \frac{I}{qV} - \frac{S_{TE}}{\tau_{TE}} - \frac{S_{TM}}{\tau_{TM}} - \frac{N_{TE}}{\tau} \right) \\ &\quad \times (1 - \varepsilon_{EE}S_{TE} - \varepsilon_{EM}S_{TM})S_{TE} - \frac{S_{TE}}{\tau_{TE}} \\ \frac{dS_{TM}}{dt} &= g_{TM}\tau \left( \frac{I}{qV} - \frac{S_{TE}}{\tau_{TE}} - \frac{S_{TM}}{\tau_{TM}} - \frac{N_{TM}}{\tau} \right) \\ &\quad \times (1 - \varepsilon_{ME}S_{TE} - \varepsilon_{MM}S_{TM})S_{TM} - \frac{S_{TM}}{\tau_{TM}}. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

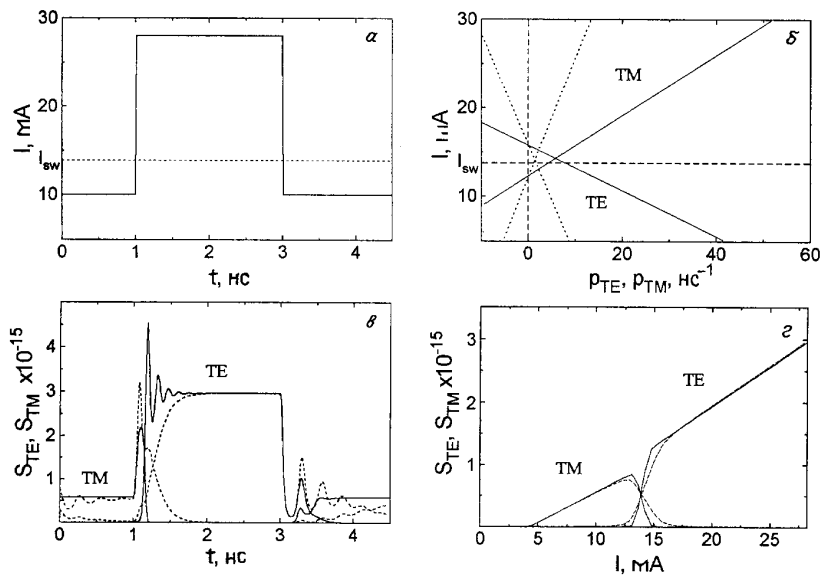
Основной интерес для исследования представляют ”тривиальные” решения  $S_{TE} = 0, S_{TM} \neq 0$  (TM-поляризованное излучение) и  $S_{TE} \neq 0, S_{TM} = 0$  (TE-поляризованное излучение). Линеаризовав модифицированную систему скоростных уравнений (3), получаем ее собственные значения, называемые также, согласно (1), коэффициентами (не)устойчивости:

$$P_{TE/TM} = g_{TE/TM} \left( \frac{1}{qV} - \frac{S_{TM/TE}}{\tau_{TM/TE}} - \frac{N_{TE/TM}}{\tau} \right) (1 - \varepsilon_{EM/ME}S_{TM/TE}) - \frac{1}{\tau_{TE/TM}}, \quad (4)$$

где  $s_{TE/TM}$  — плотность TE/TM-поляризованных фотонов при отсутствии света другой поляризации:

$$S_{TE/TM} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\varepsilon_{EE/MM}} + \tau_{TE/TM} \left( \frac{1}{qV} - \frac{N_{TE/TM}}{\tau} \right) \right) - \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{1}{\varepsilon_{EE/MM}} + \tau_{TE/TM} \left( \frac{I}{qV} - \frac{N_{TE/TM}}{\tau} \right) \right)^2 - \frac{\tau_{TE/TM}}{\varepsilon_{EE/MM}} \left( \frac{I}{qV} - \frac{N_{TE/TM}}{\tau} - \frac{1}{g_{TE/TM}\tau\tau_{TE/TM}} \right)}. \quad (5)$$

Из (4) видно, что возможны три комбинации коэффициентов устойчивости  $P_{TE/TM}$ : оба коэффициента положительны — ”тривиальные”



**Рис. 1.** *a* — зависимость тока накачки от времени; *б* — зависимость коэффициентов устойчивости  $\rho_{TE}$ ,  $\rho_{TM}$  от тока накачки; *в* — результаты численного моделирования процесса переключения поляризации; *г* — расчетная ватт-амперная характеристика. Пунктирные линии соответствуют лазеру с параметрами  $\varepsilon_{ME} = 1.5 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$ ,  $\varepsilon_{MM} = 2.0 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$ ,  $\tau_{TM} = 1.55 \text{ пс}$ , сплошные линии —  $\varepsilon_{ME} = 4.5 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$ ,  $\varepsilon_{MM} = 6.0 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$ ,  $\tau_{TM} = 1.61 \text{ пс}$ . Остальные параметры лазеров одинаковы:  $g_{TE} = 1.45 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$ ,  $g_{TM} = 1.40 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$ ,  $\tau_{TE} = 2.0 \text{ пс}$ ,  $N_{TE} = 4.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{TM} = 3.29 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $\tau = 3 \text{ нс}$ ,  $\varepsilon_{EM} = 2.0 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$ ,  $\varepsilon_{EE} = 1.0 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$ .

решения неустойчивы, т. е. TE- и TM-моды сосуществуют; оба отрицательны — состояние бистабильности и, последнее, коэффициенты устойчивости имеют разные знаки — при этом лазер генерирует излучение той поляризации, для которой собственное значение отрицательно. Рассмотрим эти три случая подробнее.

Когда один из коэффициентов устойчивости отрицателен, а другой положителен, последнее обратно пропорционально времени смены поляризации выходного излучения лазера. Например, переключение

тока накачки лазера со значения  $I_1$ , соответствующего ТМ-поляризации выходного излучения, на значение  $I_2$ , соответствующее ТЕ-поляризации (рис. 1, а), ведет к переключению поляризации генерируемого излучения с характерным временем  $1/P_{\text{ТМ}}(I_2)$  (рис. 1, б). На рис. 1, в приведены результаты численного моделирования процесса переключения поляризации выходного излучения двух InGaAsP/InP ( $\lambda = 1.55$  мкм) лазеров, параметры которых представлены на подписи к рисунку. Из рисунка видно, что в области малых токов накачки для обоих лазеров доминирует излучение ТМ-поляризации, а при повышении тока выше некоторого уровня  $I_{\text{sw}}$ -ТЕ-поляризованное излучение (рис. 1, з).  $I_{\text{sw}}$  — это ток переключения поляризации, т. е. значение тока накачки, соответствующего неполяризованному выходному излучению лазера. Его точное значение может быть вычислено, если в (3) принять  $S_{\text{ТЕ}} = S_{\text{ТМ}} = S_{\text{sw}}$ ,  $dS_{\text{ТЕ}}/dt = dS_{\text{ТМ}}/dt = 0$ :

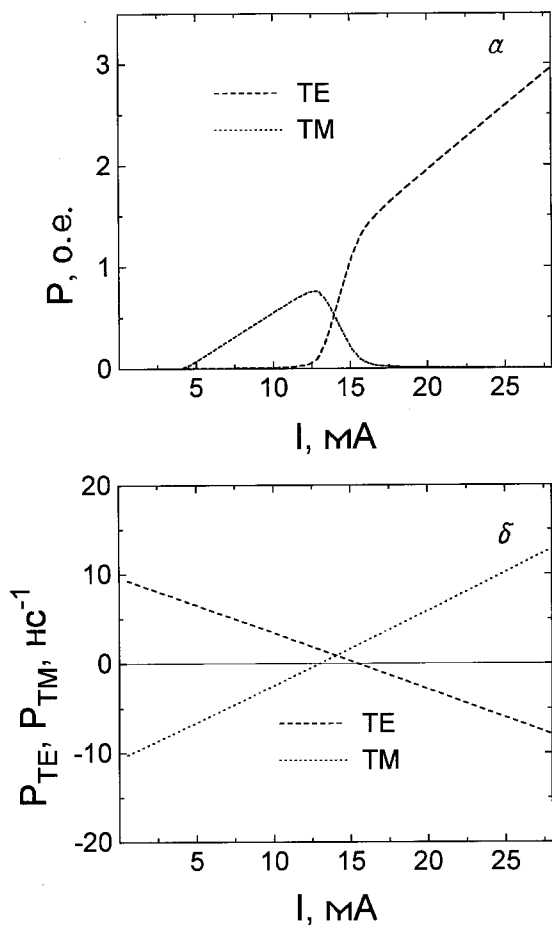
$$I_{\text{sw}} = \frac{1}{g_{\text{ТЕ}}\tau_{\text{ТЕ}}(1 - \varepsilon_{\text{Е}}S_{\text{sw}})} + \left( \frac{1}{\tau_{\text{ТЕ}}} + \frac{1}{\tau_{\text{ТМ}}} \right) S_{\text{sw}} + \frac{N_{\text{ТЕ}}}{\tau}, \quad S_{\text{sw}} = B - \sqrt{B^2 - C}, \quad (6)$$

$$B = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\varepsilon_{\text{Е}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{М}}} + \frac{1}{g_{\text{ТЕ}}\tau_{\text{ТЕ}}\varepsilon_{\text{Е}}\Delta N} - \frac{1}{g_{\text{ТМ}}\tau_{\text{ТМ}}\varepsilon_{\text{М}}\Delta N} \right),$$

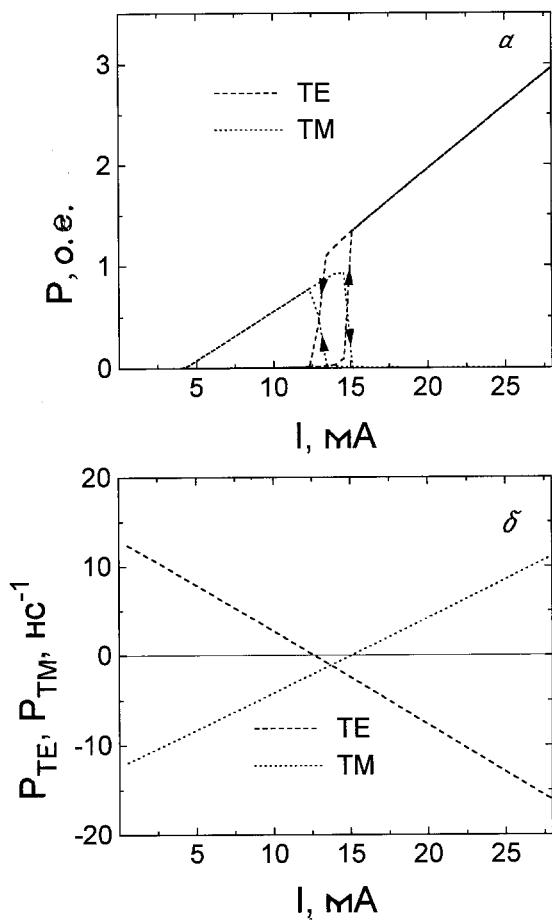
$$C = \frac{1}{\varepsilon_{\text{Е}}\varepsilon_{\text{М}}} \left( 1 + \left( \frac{1}{g_{\text{ТЕ}}\tau_{\text{ТЕ}}} - \frac{1}{g_{\text{ТМ}}\tau_{\text{ТМ}}} \right) \Delta N \right),$$

$$\varepsilon_{\text{Е}} = \varepsilon_{\text{ЕЕ}} + \varepsilon_{\text{ЕМ}}, \quad \varepsilon_{\text{М}} = \varepsilon_{\text{ММ}} + \varepsilon_{\text{МЕ}}, \quad \Delta N = N_{\text{ТЕ}} - N_{\text{ТМ}}.$$

Время смены (переключения) поляризации выходного излучения лазера, вызванного изменением тока накачки, определяется как величина, обратная коэффициенту устойчивости (4) системы, вычисленному при "новом" значении тока накачки. Иными словами, в рассматриваемом случае переключение поляризации происходит за время, обратное тому собственному значению (коэффициенту устойчивости) системы, которое положительно при "новом" токе накачки (рис. 1, б, в). Параметры лазеров 1 (штриховые линии) и 2 (сплошные линии) выбраны таким образом, чтобы для них токи переключения поляризации были равны. Из рис. 1, б и в видно, что в равных условиях переключение поляризации в лазере 1, у которого коэффициенты устойчивости в  $\approx 5$  раз выше, чем у лазера 2, происходит приблизительно в 5 раз быстрее. Таким образом,



**Рис. 2.**  $a$  — зависимость плотности ТЕ- и ТМ-поляризованных фотонов от тока накачки для лазера с параметрами:  $g_{TE} = 1.45 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$ ,  $g_{TM} = 1.40 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$ ,  $\tau_{TE} = 2.0 \text{ пс}$ ,  $\tau_{TM} = 1.55 \text{ пс}$ ,  $N_{TE} = 4.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{TM} = 3.29 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $\tau = 3 \text{ нс}$ ,  $\varepsilon_{EE} = 1.0 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$ ,  $\varepsilon_{ME} = 1.5 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$ ,  $\varepsilon_{MM} = 2.0 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$ ,  $\varepsilon_{EM} = 2.0 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$ ;  $b$  — зависимость коэффициентов устойчивости ТЕ- и ТМ-поляризованных мод от тока накачки.



**Рис. 3.** *a* — зависимость плотности ТЕ- и ТМ-поляризованных фотонов от тока накачки для лазера с параметрами:  $g_{TE} = 1.45 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$ ,  $g_{TM} = 1.40 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$ ,  $\tau_{TE} = 2.0 \text{ пс}$ ,  $\tau_{TM} = 1.55 \text{ пс}$ ,  $N_{TE} = 4.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{TM} = 3.29 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $\tau = 3 \text{ нс}$ ,  $\varepsilon_{EE} = 1.0 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$ ,  $\varepsilon_{ME} = 1.0 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$ ,  $\varepsilon_{MM} = 2.0 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$ ,  $\varepsilon_{EM} = 2.0 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$ ; *b* — зависимость устойчивости ТЕ- и ТМ-поляризованных мод от тока накачки.

результаты численного моделирования (рис. 1, в) хорошо согласуются с полученными из аналитических выражений (рис. 1, б).

Результаты проведенного нами анализа выражений (4) и (5) показывают, что при постоянном токе переключения поляризации (6) время переключения поляризации зависит только от величины коэффициентов нелинейного усиления  $\varepsilon_{ij}$  и не зависит от линейных параметров лазерного диода.

Теперь рассмотрим случаи, когда коэффициенты устойчивости имеют один знак. В случае, когда оба собственных значения положительны, "тривиальные" состояния неустойчивы, моды обеих поляризаций сосуществуют и концентрации ТЕ- и ТМ-поляризованных фотонов уже не описываются выражениями (5). При плавном изменении тока накачки лазерного диода (рис. 2, а) в этой области (рис. 2, б), наблюдается плавное переключение поляризации выходного излучения лазера (рис. 2, а).

В области параметров лазерного диода, где оба коэффициента устойчивости отрицательны, наблюдается некоторое противоречие: оба "тривиальные" состояния устойчивы, хотя существование одного исключает существование другого (см. выше). Это область бистабильности. Здесь поляризация выходного излучения лазера определяется тем, в каком состоянии была система до входа в рассматриваемую область. Так, при плавном изменении тока накачки лазерного диода (рис. 3, а) в некоторой области, где оба коэффициента устойчивости отрицательны (рис. 3, б), существует два значения тока накачки, при которых происходит переключение поляризации выходного излучения лазера (рис. 3, а), причем переключение наблюдается при "выходе" лазера из состояния бистабильности. Ватт-амперная характеристика лазера в рассматриваемой области имеет гистерезис, "ширину" которого можно определить из соотношений (4).

Таким образом, в данной работе представлены выражения для времени переключения поляризации излучения полупроводникового лазера. Полученные выражения позволяют оценить влияние параметров лазерного диода на время переключения поляризации выходного излучения. Результаты анализа полученных выражений показывают, что основным параметром, влияющим на процесс переключения поляризации выходного излучения полупроводникового лазера, являются коэффициенты нелинейного усиления.

Авторы благодарят Е.Л. Портного за постоянное внимание и интерес, проявленный к работе.



Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 96-02-17864а).

## **Список литературы**

- [1] *Ахмедов Д., Бежан Н.П., Берт Н.А., Конников С.Г., Кучинский В.И., Мишурный В.А., Портной Е.Л.* // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. В. 12. С. 705–708.
- [2] *Елюхин В.А., Кочарян В.Р., Портной Е.Л., Рывкин Б.С.* // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. В. 12. С. 708–712.
- [3] *Каландаришвили К.Г., Карпов С.Ю., Кучинский В.И., Мизеров М.Н., Портной Е.Л., Смирницкий В.Б.* // ЖТФ. 1983. Т. 53. В. 8. С. 1560–1567.
- [4] *Аврутин Е.А., Алексеев М.А., Кучинский В.И., Лазутка А.С.* // ФТП. 1989. Т. 23. В. 7. С. 1207–1213.
- [5] *Deryagin A.G., Kuksenkov D.V., Kuchinskii V.I., Portnoi E.L., Smirnitckii V.B.* // IEE Proc.-Optoelectron. 1995. V. 142. N 1. P. 51–54.
- [6] *Chen Y.C., Liu J.M.* // Optical and Quantum Electronics. 1987. V. 19. P. S93–S102.
- [7] *Ropas G., Le Floch A., Jezequel G., Le Naour R., Chen Y.C., Liu J.M.* // IEEE J. of Quant. El. 1987. V. QE-23. N 6. P. 1027–1031.
- [8] *Hill P.M., Olshansky R., Burns W.K.* // IEEE Phot. Tech. Lett. 1992. V. 4. N 5. P. 500–502.
- [9] *Ляпунов А.М.* Общая задача об устойчивости движения. М.: Гостехиздат, 1950.