

06:07:12

Модуляция поляризации излучения полупроводникового лазера при постоянной выходной мощности

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

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

Поступило в Редакцию 25 февраля 1998 г.

Для анализа степени поляризации излучения лазера при "двойной" модуляции (током накачки и коэффициентом оптического ограничения) к системе скоростных уравнений был применен метод анализа устойчивости решений систем дифференциальных уравнений Ляпунова. В результате анализа системы скоростных уравнений были получены ее собственные значения, называемые также коэффициентами устойчивости, которые представляют собой характеристическое время перехода системы из одного состояния в другое. Проведено математическое моделирование поведения лазера при "двойной" модуляции, доказавшее возможность управлять поляризацией выходного излучения лазера при практически постоянной выходной мощности.

Переключение, сосуществование и бистабильность ТЕ/ТМ-поляризаций излучения полупроводниковых лазеров с напряженным активным слоем наблюдались в работах [1–4]. Феноменологическая модель, объясняющая эффект переключения поляризации и поляризационной бистабильности, была развита в [5,6]. В дальнейшем [7] были получены аналитические выражения для времени переключения поляризации излучения полупроводникового лазера, позволяющие оценить влияние параметров лазерного диода на поляризацию выходного излучения.

Модуляция состояния поляризации излучения в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) подавляет эффект анизотропного насыщения усиления (поляризационного выжигания дыр) в эрбиевых волоконных оптических усилителях, который может значительно ухудшить отношение оптического сигнала к шуму в сверхдальних ВОЛС с оптической регенерацией передаваемого сигнала [8]. В современных ВОЛС для деполяризации оптического сигнала используются дорогостоящие высокоскоростные поляризационные скрамблеры. Таким образом, полупроводниковые лазеры с деполяризованным излучением представляются

весьма перспективными источниками излучения для ВОЛС, поскольку они могут быть легко интегрированы вместе с оптическими модуляторами в единое компактное монолитное устройство.

В настоящей работе рассмотрена возможность "двойной" модуляции (током накачки и коэффициентом оптического ограничения) полупроводникового лазера для прямого управления поляризацией излучения и, в частности, получения деполаризованного лазерного излучения.

Идея двойной модуляции заключается в следующем. В ватт-амперной характеристике лазера с переключением поляризации выходного излучения существует область, где степень поляризации и выходная мощность линейно зависят от тока накачки [7]. Расположение этой области переключения поляризации на ВАХ зависит, в частности, от коэффициента оптического ограничения. Таким образом, представляется возможным модуляцией коэффициента оптического ограничения изменять степень поляризации, а током накачки поддерживать постоянной мощность выходного излучения.

Модуляция коэффициента оптического ограничения может осуществляться приложением напряжения на дополнительные боковые контакты лазерного диода, нанесенные с обеих сторон полоска [9].

Система скоростных уравнений [7] с учетом фактора оптического ограничения для ТЕ/ТМ-мод $\Gamma_{TE/TM}$ принимает вид

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

где N — концентрация носителей заряда, $S_{TE/TM}$ — плотность ТЕ/ТМ-поляризованных фотонов, $g_{TE/TM}$ — линейное усиление для ТЕ/ТМ-поляризованного света, $\tau_{TE/TM}$ — время жизни ТЕ/ТМ-поляризованных фотонов, $N_{TE/TM}$ — концентрация прозрачности для ТЕ/ТМ-поляризованного света, τ — время жизни носителей заряда, ε_{ij} — коэффициенты нелинейного усиления, β — коэффициент спонтанной эмиссии, q — элементарный заряд, V — объем активной области.

Обычно для анализа системы скоростных уравнений используются методы численного интегрирования что, к сожалению, не позволяет описать динамику процесса переключения поляризации излучения гетеролазера в явном виде. Однако в работе [7] было предложено применить

к системе скоростных уравнений метод [10] анализа устойчивости решений систем дифференциальных уравнений Ляпунова. В результате анализа устойчивости системы скоростных уравнений были получены ее собственные значения, которые представляют собой характеристическое время перехода системы из одного состояния в другое.

Анализ устойчивости системы (1) проводился в приближении постоянной концентрации носителей заряда $dN/dt = 0$. Воспользовавшись этим условием, можно произвести весьма удобное преобразование:

$$\begin{cases} \frac{dS_{TE}}{dt} = \Gamma_{TE} g_{TE} \tau \left(\frac{I}{qV} - \frac{S_{TE}}{\Gamma_{TE} \tau_{TE}} - \frac{S_{TM}}{\Gamma_{TM} \tau_{TM}} - \frac{N_{TE}}{\tau} \right) \\ \quad \times (1 - \varepsilon_{EE} S_{TE} - \varepsilon_{EM} S_{TM}) S_{TE} - \frac{S_{TE}}{\tau_{TE}}, \\ \frac{dS_{TM}}{dt} = \Gamma_{TM} g_{TM} \tau \left(\frac{I}{qV} - \frac{S_{TE}}{\Gamma_{TE} \tau_{TE}} - \frac{S_{TM}}{\Gamma_{TM} \tau_{TM}} - \frac{N_{TM}}{\tau} \right) \\ \quad \times (1 - \varepsilon_{ME} S_{TE} - \varepsilon_{MM} S_{TM}) S_{TM} - \frac{S_{TM}}{\tau_{TM}}. \end{cases} \quad (2)$$

Линеаризовав модифицированную систему скоростных уравнений (2), получаем ее собственные значения, называемые также, согласно [10], коэффициентами (не)устойчивости:

$$P_{TE/TM} = \Gamma_{TE/TM} g_{TE/TM} \tau \left(\frac{I}{qV} - \frac{S_{TM/TE}}{\Gamma_{TM/TE} \tau_{TM/TE}} - \frac{N_{TE/TM}}{\tau} \right) \times (1 - \varepsilon_{EM/ME} S_{TM/TE}) - \frac{1}{\tau_{TE/TM}}, \quad (3)$$

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

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

Как было показано в [7], возможны три комбинации коэффициентов устойчивости $P_{TE/TM}$: оба коэффициента положительны — ТЕ и ТМ 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.

На рис. 1 приведены ватт-амперные характеристики лазера для излучения ТЕ и ТМ-поляризацій, построенные при двух различных значениях коэффициента оптического ограничения Γ . Как видно из рисунка, изменение коэффициентов оптического ограничения $\Gamma_{TE/TM}$ позволяет изменить положение точки переключения поляризации на ватт-амперной характеристике лазера (рис. 1). Так, при использованных нами при моделировании параметрах лазера десятипроцентное изменение фактора оптического ограничения позволяет изменить ток переключения поляризации почти в 1.5 раза. Однако изменение оптического ограничения приводит также и к вариации внешней дифференциальной эффективности лазера, т.е. к изменению выходной мощности излучения при том же значении тока накачки. Таким образом, модулируя фактор оптического ограничения и поддерживая постоянной выходную мощность путем соответствующего изменения тока накачки, можно добиться плавной перестройки степени поляризации лазерного излучения (рис. 2). Возникающие при изменении коэффициента оптического ограничения релаксационные колебания могут быть практически полностью устранены сдвигом фазы модуляции тока накачки относительно фазы модуляции $\Gamma_{TE/TM}$ [9].

Воспользовавшись (2), можно для упрощения расчета амплитуды модуляции $\Gamma_{TE/TM}$ определить также переключения поляризации I_{sw} , т.е. значение тока накачки, соответствующего неполяризованному выходному излучению лазера. Его точное значение может быть вычислено, если в (2) принять $S_{TE} = S_{TM} = S_{sw}$, $dS_{TE}/dt = dS_{TM}/dt = 0$:

$$I_m = \frac{I}{\Gamma_{TE}g_{TE}\tau_{TE}\tau(1 - \varepsilon_E S_{sw})} + \left(\frac{1}{\tau_{TE}} + \frac{1}{\tau_{TM}} \right) S_{sw} + \frac{N_{TE}}{\tau},$$

$$S_{sw} = B - \sqrt{B^2 - C},$$

$$B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\varepsilon_E} + \frac{1}{\varepsilon_M} + \frac{1}{\Gamma_{TE}g_{TE}\tau_{TE}\varepsilon_E\Delta N} - \frac{1}{\Gamma_{TM}g_{TM}\tau_{TM}\varepsilon_M\Delta N} \right),$$

$$C = \frac{1}{\varepsilon_E\varepsilon_M} \left(1 + \left(\frac{1}{\Gamma_{TE}g_{TE}\tau_{TE}} - \frac{1}{\Gamma_{TM}g_{TM}\tau_{TM}} \right) \Delta N \right), \quad (5)$$

$$\varepsilon_E = \varepsilon_{EE} + \varepsilon_{EM}, \quad \varepsilon_M = \varepsilon_{MM} + \varepsilon_{ME}, \quad \Delta N = N_{TE} - N_{NM}.$$

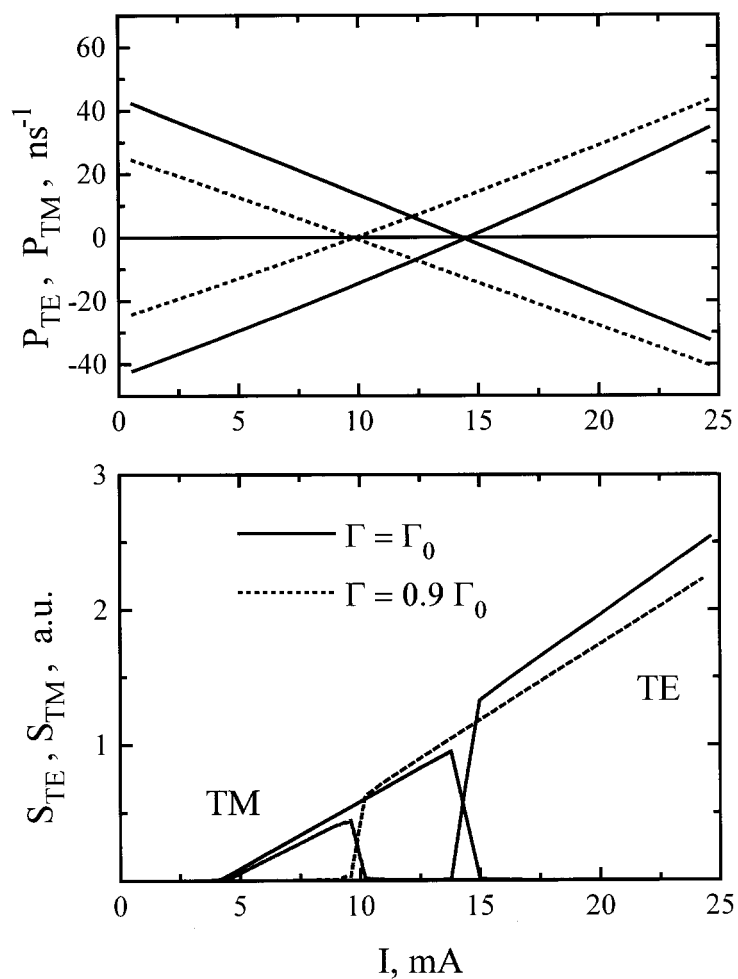


Рис. 1. Ватт-амперные характеристики и коэффициенты устойчивости при различных значениях фактора оптического ограничения для лазера со следующими параметрами: $g_{TE} = 1.45 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{s}$, $g_{TM} = 1.40 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{s}$, $\tau_{TE} = 2.0 \text{ ps}$, $\tau_{TM} = 1.6 \text{ ps}$, $N_{TE} = 4.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_{TM} = 3.29 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $\tau = 3 \text{ ns}$, $\epsilon_{EM} = 2.0 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^3$, $\epsilon_{EE} = 1.0 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^3$, $\epsilon_{ME} = 4.5 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^3$, $\epsilon_{MM} = 6.0 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^3$.

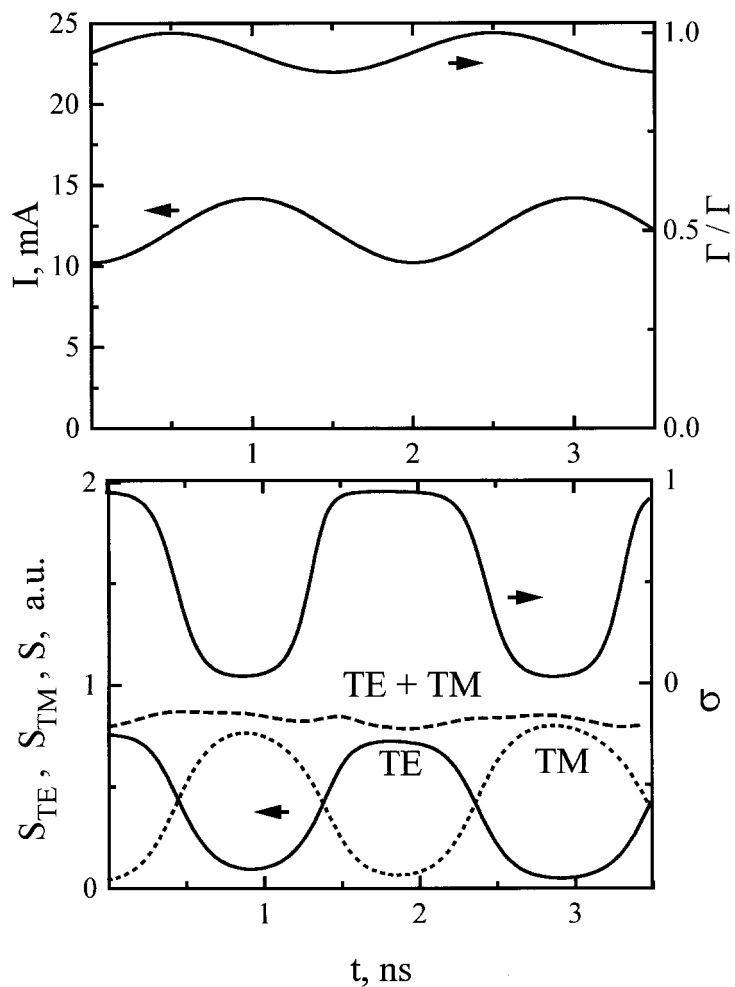


Рис. 2. Зависимость степени поляризации $\sigma = S_{TE}/(S_{TE} + S_{TM})$ и плотности Те/ТМ-поляризованных фотонов $S_{TE/TM}$ от времени при "двойной" модуляции.

Область переключения поляризации при модуляции $\Gamma_{TE/TM}$ ограничивается значениями тока переключения при максимальном и минимальном значениях Γ . Надо заметить, что существование гистерезиса на ватт-амперной характеристике лазера [7] может существенно уменьшить величину области переключения поляризации, определенную из [5].

Таким образом, в настоящей работе рассмотрена возможность "двойной" модуляции (током накачки и коэффициентом оптического ограничения) полупроводникового лазера для управления поляризацией лазерного излучения. Проведено математическое моделирование поведения лазера при "двойной" модуляции, доказавшее возможность управлять поляризацией выходного излучения лазера при практически постоянной выходной мощности.

В заключение авторы выражают благодарность Ф.Н. Тимофееву, плодотворные дискуссии с которым стимулировали проведение данной работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 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] 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.
- [5] Chen Y.C., Liu J.M. // Optical Quantum Electronics. 1987. V. 19. P. S93–S102.
- [6] Roras 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.
- [7] Соколовский Г.С., Дерягин А.Г., Кучинский В.И. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 9. С. 87–95.
- [8] Taylor M.G. // IEEE Photon. Tech. Lett. 1993. V. 5. P. 1244–1246.
- [9] Gurevich S.A., Shatalov M.S., Simin G.S. // International Journal of High Speed Electronics and Systems. 1997. V. 8. N 3. P. 547–574.
- [10] Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения. М.: Гостехиздат, 1950.