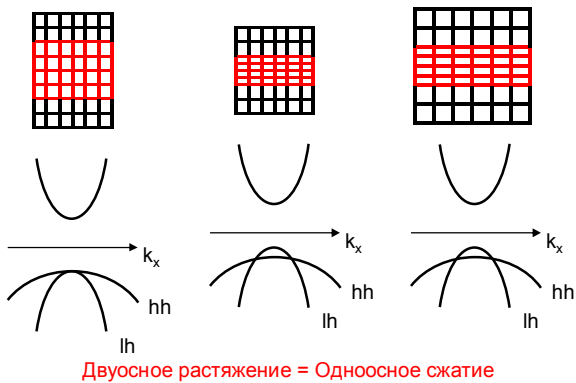
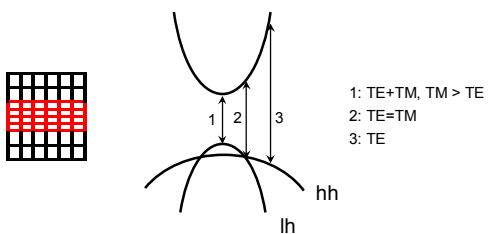


Переключение поляризации излучения в полупроводниковых лазерах

Зонная инженерия



Зонная инженерия



Система скоростных уравнений для двух мод

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - g_{TE}(N - N_{TE})S_{TE} - g_{TM}(N - N_{TM})S_{TM} - \frac{N}{\tau} \\ \frac{dS_{TE}}{dt} = g_{TE}(N - N_{TE})S_{TE} + \beta \frac{N}{\tau} - \frac{S_{TE}}{\tau_{TE}} \\ \frac{dS_{TM}}{dt} = g_{TM}(N - N_{TM})S_{TM} + \beta \frac{N}{\tau} - \frac{S_{TM}}{\tau_{TM}} \end{cases}$$

Несложно видеть, что решение имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{S_{TE}}{\tau_{TE}} + \frac{S_{TM}}{\tau_{TM}} = \frac{I}{qV} - \frac{N_{th}}{\tau} \\ N_{TE} + \frac{1}{g_{TE}\tau_{TE}} = N_{TM} + \frac{1}{g_{TM}\tau_{TM}} \end{cases}$$

Система скоростных уравнений для двух мод с насыщением усиления

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

Критерий устойчивости Ляпунова:

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

P_i - собственные значения

V_i - собственные вектора линеаризованной системы.

Положение равновесия системы (не)устойчиво, если вещественные части всех (одного или более) собственных значений P_i отрицательны (положительны).

NB: собственные значения P_i представляют собой характеристическое время перехода системы из одного положения равновесия в другое.

Анализ устойчивости системы СУ для двух мод

В приближении постоянной концентрации носителей заряда $dN/dt = 0$ можно произвести весьма удобное преобразование:

$$\begin{cases} \frac{dS_{TE}}{dt} = g_{TE} \tau \left(\frac{I}{qV} - \frac{S_{TE}}{\tau_{TE}} - \frac{S_{TM}}{\tau_{TM}} - \frac{N_{TE}}{\tau} \right) (1 - \epsilon_{EE}S_{TE} - \epsilon_{EM}S_{TM})S_{TE} - \frac{S_{TE}}{\tau_{TE}} \\ \frac{dS_{TM}}{dt} = g_{TM} \tau \left(\frac{I}{qV} - \frac{S_{TE}}{\tau_{TE}} - \frac{S_{TM}}{\tau_{TM}} - \frac{N_{TM}}{\tau} \right) (1 - \epsilon_{ME}S_{TE} - \epsilon_{MM}S_{TM})S_{TM} - \frac{S_{TM}}{\tau_{TM}} \end{cases}$$

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, можно получить ее собственные значения, называемые коэффициентами (не)устойчивости.

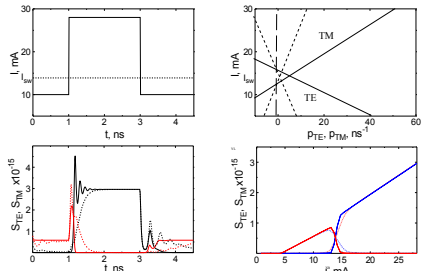
Коэффициенты устойчивости системы СУ для двух мод

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

$S_{TE/TM}$ - плотность TE/TM-поляризованных фотонов при отсутствии света другой поляризации

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

Коэффициенты устойчивости системы СУ для двух мод



Пунктирные линии соответствуют лазеру с параметрами $\epsilon_{ME} = 1.5 \cdot 10^{-17} \text{cm}^3$, $\epsilon_{MM} = 2.0 \cdot 10^{-17} \text{cm}^3$, $\tau_{TM} = 1.55 \text{пс}$, сплошные линии - $\epsilon_{ME} = 6.5 \cdot 10^{-17} \text{cm}^3$, $\epsilon_{MM} = 6.0 \cdot 10^{-17} \text{cm}^3$, $\tau_{TM} = 1.61 \text{пс}$.
 Остальные параметры лазеров одинаковы: $g_{TE} = 1.45 \cdot 10^6 \text{cm}^3/\text{с}$, $g_{TM} = 1.40 \cdot 10^6 \text{cm}^3/\text{с}$, $\tau_{TE} = 2.0 \text{пс}$, $N_{TE} = 4.5 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$, $N_{TM} = 3.29 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$, $\tau = 3 \text{пс}$, $\epsilon_{EM} = 2.0 \cdot 10^{-17} \text{cm}^3$, $\epsilon_{EE} = 1.0 \cdot 10^{-17} \text{cm}^3$.

Ток переключения поляризации

Ток переключения поляризации (значение тока накачки, соответствующее неполяризованному выходному излучению лазера) может быть вычислено, если принять $S_{TE} = S_{TM} = S_{sw}$, $dS_{TE}/dt = dS_{TM}/dt = 0$:

$$I_{sw} = \frac{1}{g_{TE} \tau_{TE} (1 - \epsilon_E S_{sw})} + \left(\frac{1}{\tau_{TE}} + \frac{1}{\tau_{TM}} \right) S_{sw} + \frac{N_{TE}}{\tau}$$

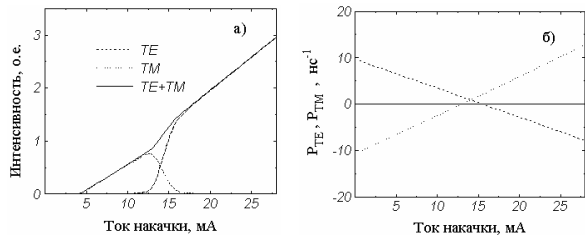
$$S_{sw} = B - \sqrt{B^2 - C}$$

$$B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\epsilon_E} + \frac{1}{\epsilon_M} + \frac{1}{g_{TE} \tau_{TE} \epsilon_E \Delta N} - \frac{1}{g_{TM} \tau_{TM} \epsilon_M \Delta N} \right)$$

$$C = \frac{1}{\epsilon_E \epsilon_M} \left(1 + \left(\frac{1}{g_{TE} \tau_{TE}} - \frac{1}{g_{TM} \tau_{TM}} \right) \Delta N \right)$$

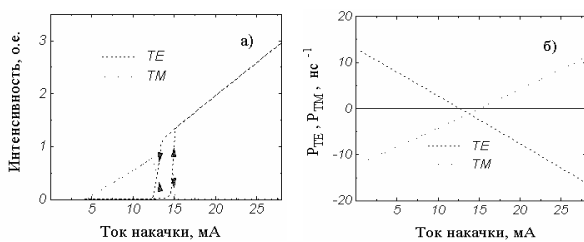
$$\epsilon_E = \epsilon_{EE} + \epsilon_{EM} \quad \epsilon_M = \epsilon_{MM} + \epsilon_{ME} \quad \Delta N = N_{TE} - N_{TM}$$

Ток переключения поляризации



$g_{TE} = 1.45 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$, $g_{TM} = 1.40 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$, $\tau_{TE} = 2.0 \text{ пс}$, $\tau_{TM} = 1.55 \text{ пс}$,
 $N_{TE} = 4.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_{TM} = 3.29 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $\tau = 3 \text{ нс}$, $\epsilon_{EE} = 1.0 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$,
 $\epsilon_{ME} = 1.5 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$, $\epsilon_{MM} = 2.0 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$, $\epsilon_{EM} = 2.0 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$

Гистерезис при переключении поляризации



$g_{TE} = 1.45 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$, $g_{TM} = 1.40 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$, $\tau_{TE} = 2.0 \text{ пс}$, $\tau_{TM} = 1.554 \text{ пс}$,
 $N_{TE} = 4.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_{TM} = 3.29 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $\tau = 3 \text{ нс}$, $\epsilon_{EE} = 1.0 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$,
 $\epsilon_{ME} = 1.0 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$, $\epsilon_{MM} = 2.0 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$, $\epsilon_{EM} = 2.0 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3$
