

ДИНАМИКА ПЕРЕФОРМИРОВАНИЯ СВЕРХКОРОТКИХ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ МЕДЛЕННО РЕЛАКСИРУЮЩЕЙ МНОГОСЛОЙНОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРОЙ

А.С.Щербаков, А.Ю.Косарский

Интерес к исследованию свойств полупроводниковых структур бегущей волны в значительной степени связан с их способностью управлять параметрами оптических сверхкоротких импульсов (СКИ). Так, были созданы полупроводниковые усилители СКИ бегущей волны и разработаны методы их описания [1-3]. В то же время до сих пор не уделялось достаточного внимания возможностям многослойных в направлении распространения импульса полупроводниковых структур. В связи с этим для управления параметрами СКИ была предложена [4] состоящая из чередующихся усиливающих и поглощающих слоев полупроводниковая структура бегущей волны с временем релаксации просветленного состояния поглотителя, меньшим длительности импульса, а также представлен метод пошагового моделирования процесса переформирования СКИ такой структурой. Однако управление параметрами СКИ может быть осуществлено и с использованием в многослойной полупроводниковой структуре слоев с характерными временами релаксации, большими длительности импульса. При этом вид операторов воздействия полупроводниковых слоев на параметры СКИ становится более сложным.

Целью данной работы является моделирование процесса переформирования спектрально-ограниченных пикосекундных оптических импульсов функционирующей в ждущем режиме многослойной полупроводниковой структурой, содержащей слои с "медленным" нелинейным усилением и "медленным" насыщающимся поглощением, и изучение таким образом динамики стабилизации параметров СКИ при большом числе слоев, а также определение оптимальных с точки зрения формирования стабильного оптического импульса с заданными параметрами характеристик слоев полупроводниковой структуры, осуществляющей, по сути, пассивную синхронизацию мод бегущей волны.

Для описания некогерентного взаимодействия пикосекундных оптических импульсов с последовательностью

идентичных двухкомпонентных (усиление–поглощение) полупроводниковых слоев с идеально просветленными торцами воспользуемся известными [2] скоростными уравнениями, которые будем анализировать в случае $\tau_p \ll T_1, T_2$, где τ_p — длительность импульса. Физически это неравенство соответствует “медленному” нелинейному усилению и “медленному” насыщающемуся поглощению и означает, что за время прохождения импульса истощенные им усиление и поглощение каждой пары слоев не успевают восстановиться, так что возможно использование упрощенных скоростных уравнений вида

$$\frac{\partial P}{\partial z} = gP, \quad \frac{\partial g}{\partial \tau} = -\frac{gP}{E_1}, \quad \frac{\partial P}{\partial z} = -\kappa P, \quad \frac{\partial \kappa}{\partial \tau} = -\frac{\kappa P}{E_2}, \quad (1)$$

где z и τ — сопровождающие импульс координаты, P — мгновенное значение мощности импульса, g и κ — усиление и поглощение полупроводниковых слоев, E_1 и E_2 — энергии насыщения усиления и поглощения. Однако к приходу следующего импульса система должна полностью восстановить свои свойства. Это означает, что период следования импульсов T должен превышать характерные времена релаксации T_1 и T_2 или $T \gg T_1, T_2$. Интегрирование уравнений (1) следует проводить с использованием в качестве начальных значений функций g и κ соответствующих коэффициентов малосигнального усиления η_1 и поглощения η_2 .

Для исследования процесса переформирования СКИ в ждущем режиме пассивной синхронизации мод многослойной полупроводниковой структурой можно, как и в [4], воспользоваться двумя алгоритмами. Первый из них относится к случаю установившейся бегущей волны при $N \rightarrow \infty$. При этом в отличие от [4] амплитуда спектральноограниченного импульса $A(\tau)$ описывается приближенным уравнением, содержащим оператор временного сдвига \hat{T} :

$$\left[\eta_1 l_1 \hat{G}_1 - \eta_2 l_2 \hat{G}_2 - \alpha \hat{L}(\omega_s) + \hat{T} \right] A(\tau) = 0, \quad (2)$$

где $A(\tau) = \sqrt{P(\tau)}$ для спектрально ограниченного импульса, а операторы нелинейного усиления и насыщающегося поглощения \hat{G}_1 и \hat{G}_2 принимают вид

$$\hat{G}_{1,2} = \frac{1}{2} \exp \left\{ - \int_{-\infty}^{\tau} |A_i(\tau')|^2 \cdot E_{1,2}^{-1} d\tau' \right\}, \quad (3)$$

$\hat{T} = \delta T \cdot \frac{d}{d\tau}$, а $\hat{L} = 1 - \omega_s^{-2} \cdot \frac{d^2}{d\tau^2}$ — оператор потерь и спектральной селекции. Здесь l_1 и l_2 — толщины усиливающих и поглощающих слоев, ω_s — эффективная полоса частот спектральной селекции, α — коэффициент потерь, δT — временной сдвиг. Уравнение (2) имеет решение вида

$$A_\infty(\tau) = \sqrt{\frac{\mathcal{E}_\infty}{2\tau_\infty}} \operatorname{sech}\left(\frac{\tau}{\tau_\infty}\right), \quad (4)$$

где \mathcal{E}_∞ и τ_∞ — энергия и длительность импульса на выходе структуры с $N \rightarrow \infty$ в установившемся режиме. При этом должны выполняться неравенства

$$E_1 > E_2 > \mathcal{E}_\infty; \quad -\frac{\alpha}{\omega_s^2 \tau_\infty} < \delta T < \frac{\alpha}{\omega_s^2 \tau_\infty}.$$

При наперед заданных значениях \mathcal{E}_∞ и τ_∞ приведенный алгоритм дает возможность определить требуемые для формирования импульса вида (4) параметры слоев полупроводниковой структуры: коэффициенты η_1 и η_2 , толщины слоев l_1 и l_2 , а также временной сдвиг δT .

Второй алгоритм предназначен для изучения эволюции импульса по мере прохождения полупроводниковой структуры с целью определения числа слоев N , обеспечивающего на выходе стабилизацию параметров СКИ. Для этого используется процедура вида

$$A_i(\tau) = \exp\left[\eta_1 l_1 \hat{G}_1 - \eta_2 l_2 \hat{G}_2 - \alpha \hat{L}(\omega_s)\right] A_{i-1}(\tau) = \hat{D} A_{i-1}(\tau), \quad (5)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$, а операторы определяются соотношениями (3).

В качестве примера применения вышеуказанных алгоритмов был проведен анализ эволюции огибающей СКИ по мере прохождения пар слоев “медленный” нелинейный усилитель — “медленный” насыщающийся поглотитель. В качестве входного был выбран импульс вида

$$A_0(\tau) = \sqrt{\frac{\mathcal{E}_0}{2\tau_0}} \operatorname{sech}\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right) \quad (6)$$

с параметрами $\mathcal{E}_0 = 0.4$ пДж, $\tau_0 = 80$ пс; параметры среды $\alpha = 0.6$, $\omega_s = 0.25$ ТГц. При этом выходной sech -образный импульс вида (4) характеризовался энергией $\mathcal{E}_\infty = 0.5$ пДж и длительностью $\tau_\infty = 10$ пс. В результате решения уравнения (2) с использованием приведенных данных были опре-

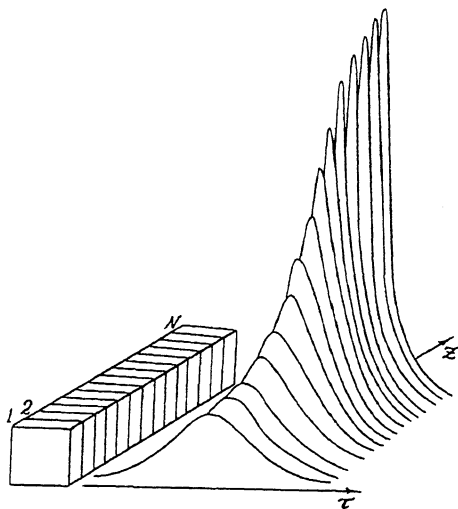


Рис. 1. Процесс переформирования СКИ по мере прохождения многослойной полупроводниковой структуры.

делены значения коэффициентов усиления и поглощения полупроводниковых слоев и величина временного сдвига импульса: $\eta_1 l_1 = 5.30$, $\eta_2 l_2 = 4.40$, $\frac{\delta T}{T_\infty} = -5.28 \cdot 10^{-2}$. Подстановка приведенных величин в выражение (5) позволила использовать итерационную процедуру для расчета эволюции огибающей входного импульса. Результаты расчета представлены на рис. 1. Из рисунка видно, что с ростом числа пройденных слоев за счет постоянного увеличения амплитуды и сокращения длительности происходит переформирование широкого и маломощного импульса в симметричный короткий и мощный пик. Следует отметить, что скорость переформирования СКИ меняется по мере его прохождения через многослойную структуру. Сначала рост амплитуды значительно опережает сокращение длительности импульса и переформирование имеет квазилинейный характер. Далее скорость переформирования имеет выраженный максимум, и наконец она уменьшается вследствие эффекта стабилизации основных параметров импульса, связанного с достижением установившегося режима. Эффект стабилизации амплитуды и длительности импульса продемонстрирован на рис. 2 соответственно сплошной и штриховой линиями. Существенной особенностью данного рассмотрения является наличие временного сдвига центра импульса δT , связанного с асимметричным по отношению к профилю импульса воздействием нелинейных процессов истощения усиления и насыщения поглощения.

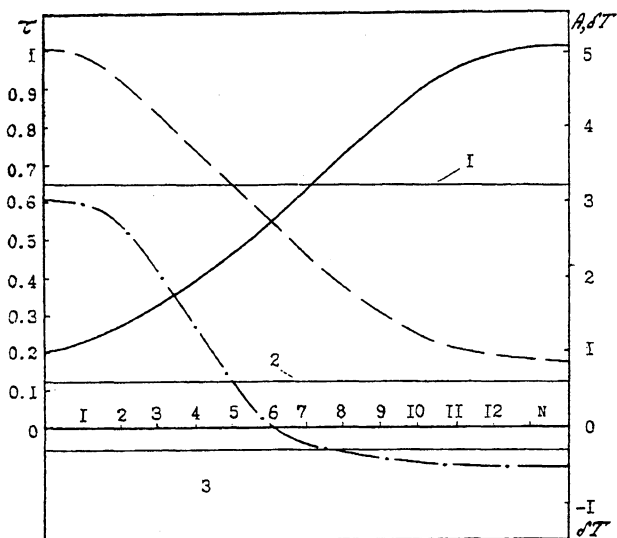


Рис. 2. Динамика изменения пиковой амплитуды (сплошная линия), длительности (штриховая линия) и временного сдвига максимума (штрих-пунктир) импульса в процессе распространения; показаны заданные значения: 1 — A_∞ , 2 — τ_∞ , а также 3 — δT .

Динамика изменения δT по мере прохождения последовательности полупроводниковых слоев представлена на рис. 2 штрихпунктирной линией. Тонкими линиями на рис. 2 показаны значения амплитуды, длительности и временного сдвига выходного импульса полупроводниковой структуры (4). Некоторое отличие этих значений от расчетных объясняется погрешностями приближенного численного вычисления операторов, входящих в (5).

Анализ эволюции СКИ без внутренней частотной модуляции в одной многослойной структуре (случай 1) может быть отнесен к эволюции СКИ с тем же профилем огибающей, но с другими энергией и длительностью (случай 2). Такого рода масштабирование возможно при преобразовании параметров задачи с коэффициентами a и b в соответствии с таблицей.

| Случай 1 | ε_i | τ_i | E_1 | E_2 | α | ω_s | $\eta_1 l_1$ | $\eta_2 l_2$ | δT |
|----------|------------------|------------------------|--------|--------|----------|----------------------|--------------|--------------|-------------|
| Случай 2 | $a\varepsilon_i$ | $b\tau_i \ll T_1, T_2$ | aE_1 | aE_2 | α | $\frac{\omega_s}{b}$ | $\eta_1 l_1$ | $\eta_2 l_2$ | $b\delta T$ |

В результате сохраняется в прежнем виде оператор \hat{D} из (5). Таким образом, для управления параметрами СКИ предложена многослойная медленно релаксирующая полупроводниковая структура. На основе разработанной мето-

дики пошагового моделирования проведен анализ процесса реформирования СКИ в полупроводниковой структуре. Показана возможность масштабирования параметров как оптических импульсов, так и многослойной полупроводниковой структуры.

Список литературы

- [1] *Simon J.C.* // J. of Lightwave Technol. 1987. V. LT-5. N 9. P. 1286-1295.
- [2] *Agrawal G.P., Olsson N.A.* // IEEE J. of Quantum Electron. 1989. V. QE-25. N 11. P. 2297-2306.
- [3] *Lowery A.J.* // Intern. J. of Optoelectron. 1988. V. 3. N 6. P. 497-508.
- [4] *Шербаков А.С., Косарский А.Ю.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 23. С. 7-11.

Санкт-Петербургский
государственный
технический университет

Поступило в Редакцию
18 апреля 1995 г.
