

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА САМОСИНХРОНИЗАЦИИ МОД В ИНЖЕКЦИОННОМ ЛАЗЕРЕ С ТОНКОПЛЕНОЧНЫМ МОДУЛИРУЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ**

Известно, что лазеры, излучающие последовательность коротких импульсов, находят применение в лазерной метрологической технике, а также в современных устройствах передачи информации. Получение стабильных серий контрастных световых импульсов в диапазоне субпико- и пикосекундной длительностей возможно на основе высокоточных лазерных технологий. Полупроводниковые структуры в качестве пассивных модуляторов добротности с недавнего времени используются как элементы твердотельных лазеров, генерирующих сверхкороткие импульсы в режиме синхронизации мод. Твердотельные лазеры при возбуждении релаксационных колебаний могут излучать регулярную последовательность достаточно коротких импульсов. Для достижения этого эффекта необходима незначительная внешняя модуляция мощности накачки или добротности резонатора. В целях пассивной модуляции возможно применение затворов на основе тонких полупроводниковых пленок.

Получение одиночных ультракоротких лазерных импульсов или контрастных периодических серий таких импульсов для разработчиков систем оптической обработки информации является актуальной задачей, которая может быть решена как с применением оптических модуляторов, так и с использованием режимов синхронизации мод лазеров. Так как полупроводниковым лазерам характерен широкий спектр генерируемого излучения, то они являются потенциальными источниками импульсов фемтосекундной длительности [1]. Поэтому анализу временных характеристик инжекционных полупроводниковых лазеров (ИПЛ) с разными активными средами и с различными конструкциями лазерных резонаторов уделяется немало внимания. Одним из широко исследуемых типов импульсных лазеров являются лазеры с внешним резонатором, так как внутри их резонатора можно установить различные элементы, предназначенные для управления спектральными и временными характеристиками генерируемого излучения.

Динамическая модель импульсного лазера с пленочным модулятором, в рамках которой может быть описан энергообмен между излучением и средой, возбуждаемой посредством накачки, возможно строить, базируясь на точечной балансной модели [2]. Она основывается на обычных скоростных уравнениях, записанных для усредненных по длине активного слоя интенсивности  $Y(t)$  и инверсной заселенности  $y(t)$  (для ИПЛ – концентрации носителей в активном слое лазерного диода). Модификация расчетной модели, предлагаемая ниже, состояла в учете особой физической ситуации, связанной с наличием на неко-

тором расстоянии вблизи торцов усиливающей среды тонких слоев, для которых характерно насыщение поглощения и нелинейная рефракция. Предполагалось, что подобный слой с переменным отражением (пропусканием), рассчитываемым по аналогии с [2], примыкает к внешнему отражателю. В рассматриваемой схеме сложного резонатора с внешним отражателем аналогично [3] учитывалось запаздывание реакции усиливающей среды на излучение, и систему скоростных уравнений при фиксированном уровне накачки тогда можно было сформулировать в таком виде:

Динамическая модель импульсного лазера с пленочным модулятором, в рамках которой может быть описан энергообмен между излучением и средой, возбуждаемой посредством накачки, возможно строить, базируясь на точечной балансной модели [2]. Она основывается на обычных скоростных уравнениях, записанных для усредненных по длине активного слоя интенсивности  $Y(t)$  и инверсной заселенности  $y(t)$  (для ИПЛ – концентрации носителей в активном слое лазерного диода). Модификация расчетной модели, предлагаемая ниже, состояла в учете особой физической ситуации, связанной с наличием на некотором расстоянии вблизи торцов усиливающей среды тонких слоев, для которых характерно насыщение поглощения и нелинейная рефракция. Предполагалось, что подобный слой с переменным отражением (пропусканием), рассчитываемым по аналогии с [2], примыкает к внешнему отражателю. В рассматриваемой схеме сложного резонатора с внешним отражателем аналогично [3] учитывалось запаздывание реакции усиливающей среды на излучение, и систему скоростных уравнений при фиксированном уровне накачки тогда можно было сформулировать в таком виде:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left[ n_o - n - \frac{\sigma n Y_-(t-T)}{\gamma(n)(1+\Delta)} \right], \quad \frac{dy}{dt} = \frac{1}{\tau_1} \left[ \alpha - (1+Y_+ + Y_-) \cdot y \right],$$

$$Y_+(t) = R(t-T)Y_-(t-T) \exp \left\{ K[y(t-T) + y(t)]/2 - \rho \right\},$$

$$Y_-(t) = r^2 Y_+(t) \exp [Ky(t) - \rho],$$

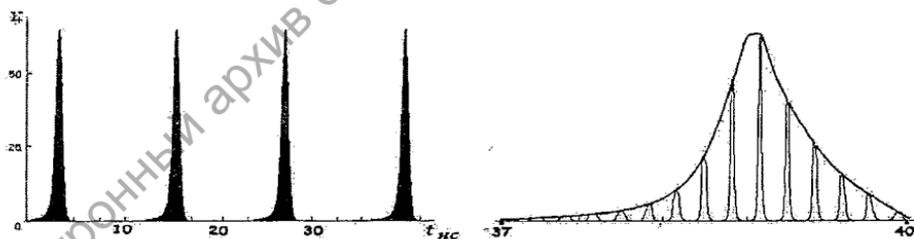
$$\Delta = \left[ \alpha_0 + \beta(y - y_0) \right] \cdot T_2, \quad \gamma(n) = \left( 1 + \frac{\kappa n}{1 + \Delta^2} \right)^2 + \kappa^2 \left[ \frac{n \Delta}{1 + \Delta^2} + \beta'(n - n_o) \right]^2,$$

$$R = \left\{ r_0 - \frac{1-r_0}{\gamma(n)} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{\kappa n}{1 + \Delta^2} \right) \right] \right\}^2 + \left[ \frac{\kappa(1-r_0)}{\gamma(n)} \right]^2 \left[ \frac{n \Delta}{1 + \Delta^2} + \beta'(n - n_o) \right]^2$$

где  $Y_{\pm}$  – нормированные интенсивности встречных потоков излучения,  $\Delta$  – переменный в случае учета эффекта фазовой автомодуляции дефект частоты,  $K$  и  $\kappa$  – величины коэффициентов (показателей) ненасыщенного усиления в среде

и поглощения в пленке,  $\beta$  и  $\beta'$  – значения коэффициентов резонансной нелинейной рефракции в среде и пленке,  $\sigma$  – отношение эффективных сечений переходов в каналах усиления и поглощения,  $\alpha$  – параметр накачки (по отношению к пороговому уровню).  $r_0$  и  $r$  – амплитудные коэффициенты отражения зеркал, образующих резонатор. Автомодуляционный эффект, описываемый в предложенной модели, обусловлен существованием положительной обратной связью в схеме с тонким слоем, отражение которого зависит от интенсивности.  $y_0$  и  $n_0$  начальные значения инверсной заселенности и разности населенностей, временные параметры  $\tau_1$ ,  $\tau_c$  и  $T$  определяют соответственно скорость продольной релаксации в каналах усиления и поглощения, время прохода света по резонатору. Зависимость  $R(t)$  характеризуется динамикой отражения пленочного модулятора, которая определяется интенсивностью формируемого в резонаторе излучения. Выражение для зависимости  $R(t)$  получено на основе результатов, полученных в [4].

Моделирование процесса формирования излучения проводилось для схемы усиления – в начальный момент времени  $t_0 = 0$  предполагалось выполнение порогового условия генерации ( $y(t_0) = y_n = 2\gamma K / (1 + \Delta_c^2)$ ) при относительно небольших величинах интенсивности  $Y(t_0) \ll Y_s$  ( $Y_s$  – равновесное значение интенсивности). Предложенная система интегрировалась методом Рунге-Кутты для параметров, соответствующих инжекционным лазерам на основе *AlGaAs* с постоянным током накачки (уровень тока накачки, определяемый  $\alpha$ , изменялся в вариантах расчета в пределах 1.02...1.80, параметр линейных потерь по величине был фиксирован –  $\rho = 0.17$ ; время продольной релаксации  $\tau_1 = 1.0 \cdot 10^{-9}$  с, тогда с учетом нормировки  $\tau$  бралось равным  $\sim 10^3$ , для  $\tau_2$  принималось значение  $\sim 10^3$ ).



Временная развертка излучения в режиме синхронизации мод  
(справа – отдельный модулированный импульс в большем разрешении)

$$\alpha = 1.80, \kappa = 3.3 \sigma = 10.0, \beta = 4.0, \beta' = 2.5, \tau_1 = 2 \cdot 10^{-8} \text{ с}, \tau_c = 1 \cdot 10^{-9} \text{ с}, \eta_0 = 0.32.$$

Предложенной моделью описываются режим релаксационных пульсаций и режим самосинхронизации мод. Ход временной зависимости ее решений относительно  $Y(t)$ , характеризующий последний режим, оказывается возможным, если при переключении модулятора происходит гистерезисный скачок

пропускания (отражения). Гистерезис в зависимости отражения от интенсивности может быть реализован при высокой плотности излучения, поскольку ненасыщенный уровень резонансной абсорбции в среде должен соответствовать сильному поглощению. Типичный пример временной развертки, описывающей самосинхронизацию мод, приведен на рисунке.

### **Литература**

1. **Ораевский А.Н.** // Квант. электрон. 2003. Т. 33. № 6. С. 847-855.
2. **Glasunova E.V., Yurevich V.A.** // Proceeding SPIE. 2006. V. 6054. P. 60540C-1 60540C-8.
3. **Лойко Н.А, Самсон А.М.** // Квант. электрон. 1994. Т. 21. № 8. С. 713-728.
4. **Glasunova E.V., Yurevich V.A.** // Proceeding SPIE. 2007. V. 6727. P. 67270N-1-67270N-8.