

## ПОВЫШЕНИЕ ЧАСТОТЫ СЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ ЛАЗЕРА С МОДУЛИРОВАННОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ РЕЗОНАТОРА ЗА СЧЕТ ПРОКАЧКИ СРЕДЫ МОДУЛЯТОРА

Лазеры, работающие в режиме пассивной модуляции добротности, являются одними из наиболее перспективных генераторов оптического излучения большой мощности. Они могут найти свое применение в высокоскоростных каналах беспроводной (мобильной) связи, в том числе и спутниковой, в локационных и навигационных системах, а также для высокоточной технологической обработки материалов. Одним из наиболее важных преимуществ пассивной модуляции добротности является простота модулятора. Нет необходимости в дополнительных устройствах управления параметрами модулятора, и как следствие – дешевизна модуляторов. Широкому применению лазеров с пассивными модуляторами препятствует большая нестабильность частоты следования импульсов при ее малой величине. Несмотря на то, что длительность импульсов излучения таких лазеров довольно мала (порядка 3-5нс.), есть способ ее уменьшения за счет сокращения времени релаксации верхнего уровня пассивного модулятора, путем прокачивания пассивной модулирующей среды затвора.[1]

Для математического анализа процессов, происходящих в лазере с внутрирезонаторным пассивным модулятором, используем вероятностный метод описания, который является одним из наиболее простых и достаточно точных методов анализа процессов в системах, где необходимо учитывать поведение большого количества частиц.

Модель состоит из трех скоростных уравнений (1), описывающих временное изменение плотности фотонов внутри резонатора, плотности инверсии активной и пассивной сред.

$$\begin{cases} \frac{di}{du} = i \cdot (a\delta - b\delta' - d), \\ \frac{d\delta}{du} = -(\mu i + N + \beta) \cdot \delta + N, \\ \frac{d\delta'}{du} = -(2i + 1) \cdot \delta' + 1.. \end{cases} \quad (1)$$

$$i = I\sigma'\tau'; \delta = \frac{\Delta}{n_0}; \delta' = \frac{\Delta'}{n'_0}; u = \frac{t}{\tau}; \beta = \frac{\tau'}{\tau}; a = \frac{l}{z} c \sigma n_0 \tau'; b = \frac{l'}{z} c \sigma' n'_0 \tau';$$

$$\Delta_0 = \frac{W n_0 \tau}{W \tau + 1}; d = \frac{c \lambda}{z}; \mu = \frac{\sigma}{\sigma'}; N = W \tau', \quad (2)$$

где  $I$  – суммарная интенсивность лазерного излучения внутри резонатора;  $c$  – скорость света в свободном пространстве;  $\sigma$  – эффективное сечение активной среды;  $\sigma'$  – эффективное сечение пассивной среды;  $\Delta$  – инверсия населенности активной среды;  $\Delta'$  – инверсия населенности пассивной среды;  $z$  – длина лазера;  $l$  – длина активного участка;  $l'$  – длина пассивного участка;  $\gamma$  – потери в резонаторе;  $n_0 = n_1 + n_2$  – плотности частиц на соответствующих энергетических уровнях пассивной среды;  $n_0 = n_1 + n_2 + n_3$  – общая плотность частиц в активной среде;  $W$  – вероятность возбуждения частиц рабочего вещества;  $\tau$  – время жизни частиц на метастабильном уровне активного вещества.

Модель является одномодовой одномерной и одночастотной.

Третье уравнение системы (1), описывающее временное изменение плотности инверсии пассивной среды, составлено при условии постоянства локализации частиц пассивного модулятора в рабочем пространстве, т.е. пространстве взаимодействия [2].

Перепишем это уравнение с учетом равномерной прокачки пассивной среды через область взаимодействия (модулятор), т.е. при постоянном вхождении частиц с одной плотностью инверсии в область взаимодействия и убывании частиц из области взаимодействия с другой плотностью инверсии.



Рис. 1

Обозначим:

$N'_{1in}$  – количество частиц, находящихся на нижнем энергетическом уровне среды затвора и входящих в область взаимодействия за единицу времени;

$N'_{1out}$  – количество частиц, находящихся на нижнем энергетическом уровне среды затвора и покидающих область взаимодействия за единицу времени;

$N'_{2in}$  – количество частиц, находящихся на верхнем энергетическом уровне среды затвора и входящих в область взаимодействия за единицу времени;

$N'_{2out}$  – количество частиц, находящихся на верхнем энергетическом уровне среды затвора и покидающих область взаимодействия за единицу времени;

$n_1$  – плотность частиц, находящихся на нижнем энергетическом уровне среды затвора в области взаимодействия;

$n_2$  – плотность частиц, находящихся на верхнем энергетическом уровне среды затвора в области взаимодействия;

$W_{12}$  – вероятность индуцированного перехода частиц с нижнего энергетического уровня на верхний;

$W_{21}$  – вероятность индуцированного перехода частиц с верхнего энергетического уровня на нижний;

$A_{21}$  – коэффициент Эйнштейна для среды модулятора;

$\tau_{np}$  – среднее время пролета частиц модулирующей среды пространства взаимодействия.

Запишем уравнение для приращения плотности частиц на нижнем энергетическом уровне затвора:

$$\frac{dn'_1}{dt} = W'_{21} \cdot n'_2 - W'_{12} \cdot n'_1 + A'_{21} \cdot n'_2 + \frac{N'_{1in} - N'_{1out}}{\tau_{np}}. \quad (3)$$

Аналогично для частиц на верхнем энергетическом уровне:

$$\frac{dn'_2}{dt} = -W'_{21} \cdot n'_2 + W'_{12} \cdot n'_1 - A'_{21} \cdot n'_2 + \frac{N'_{2in} - N'_{2out}}{\tau_{np}}. \quad (4)$$

На рис. 1 изображена энергетическая схема модулятора с равномерно прокачиваемой средой (пунктиром ограничена область взаимодействия лазерного излучения с частицами

модулирующей среды). Слева обозначены концентрации частиц на соответствующих энергетических уровнях, поступающих в область взаимодействия, справа – частицы, покидающие модулятор.

Если усреднить процессы взаимодействия частиц с излучением по поперечнику затвора и считать их быстрыми, т.е.  $\tau_{\text{вз}} < \tau_{\text{пр}}$ , то в таком приближении  $N'_{1\text{out}} = n_1'$ ,  $N'_{2\text{out}} = n_2'$ .

Учитывая соотношения

$$n_1' - n_2' = \Delta', W'_{12} = W'_{21} = W' = \sigma' \cdot I, A_{21} = \frac{1}{\tau'}, \quad (5)$$

уравнения для приращения  $\Delta'$  будут иметь вид:

$$\frac{d\Delta'}{dt} = -2 \cdot \sigma' \cdot I \cdot \Delta' + 2 \cdot A_{21}' \cdot n_2' + \frac{N'_{1\text{in}} - N'_{1\text{out}} - N'_{2\text{in}} + N'_{2\text{out}}}{\tau_{\text{пр}}}, \quad (6)$$

$$\frac{d\Delta'}{dt} = -2 \cdot \sigma' \cdot I \cdot \Delta' + \frac{(n_0' - \Delta')}{\tau'} + \frac{N'_{1\text{in}} - N'_{1\text{out}} - N'_{2\text{in}} + N'_{2\text{out}}}{\tau_{\text{пр}}}. \quad (7)$$

Обозначим:

$$N'_{1\text{in}} - N'_{2\text{in}} = \Delta'_0; i = I \cdot \sigma' \cdot \tau', \quad (8)$$

где  $\Delta'_0$  – инверсия частиц, входящих в область взаимодействия, тогда уравнение (7) с учетом обозначений (8) примет вид:

$$\frac{d\Delta'}{dt} = -\frac{2 \cdot i \cdot \Delta'}{\tau'} + \frac{(n_0' - \Delta')}{\tau'} + \frac{\Delta'_0 - \Delta'}{\tau_{\text{пр}}}. \quad (9)$$

Разделив это уравнение на  $n_0'$ , умножив на  $\tau'$  и обозначив

$$\delta' = \frac{\Delta'}{n_0'}; u = \frac{t}{\tau'}, \quad (10)$$

получим:

$$\frac{d\delta'}{du} = -(2 \cdot i + 1)\delta' + 1 + \frac{(\delta'_0 - \delta') \cdot \tau'}{\tau_{\text{пр}}}. \quad (11)$$

или

$$\frac{d\delta'}{du} = -(2 \cdot i + 1 + \frac{\tau'}{\tau_{\text{пр}}})\delta' + 1 + \frac{\tau'}{\tau_{\text{пр}}} \cdot \delta'_0. \quad (12)$$

Если считать среду модулятора, входящую в область взаимодействия, абсолютно холодной, т.е.:

$$n_2' = 0, \delta'_0 = 1, \Delta' = n_1' = n_0', \quad (13)$$

то, обозначая  $1 + \frac{\tau'}{\tau_{\text{пр}}} = \xi$ , получим следующее уравнение:

$$\frac{d\delta'}{du} = -(2 \cdot i + \xi)\delta' + \xi. \quad (14)$$

Заменяя третье уравнение системы (1) на уравнение (14), получим модель, учитывающую влияние прокачки среды модулятора на процессы в лазере с этим модулятором.

Введем новые параметры:

$$i_{\text{экс}} = I \cdot \sigma' \cdot \tau_{\text{экс}}, \quad (15)$$

где  $\tau_{\text{экс}}$  – эффективная постоянная времени разрушения верхнего уровня среды пассивного модулятора.

С учетом соотношений (13), (15) перепишем уравнение (14) в виде:

$$\frac{d\Delta'}{dt} = -\frac{2 \cdot i_{\text{экв}} \cdot \Delta'}{\tau_{\text{экв}}} + \frac{(n'_0 - \Delta')}{\tau'} + \frac{(n'_0 - \Delta')}{\tau_{\text{пр}}} \quad (16)$$

Приводя к общему знаменателю, получим:

$$\frac{d\Delta'}{dt} = -\frac{2 \cdot i_{\text{экв}} \cdot \Delta'}{\tau_{\text{экв}}} + (n'_0 - \Delta') \cdot \left( \frac{1}{\tau'} + \frac{1}{\tau_{\text{пр}}} \right) \quad (17)$$

или

$$\frac{d\Delta'}{dt} = -\frac{2 \cdot i_{\text{экв}} \cdot \Delta'}{\tau_{\text{экв}}} + \frac{(n'_0 - \Delta')}{\tau_{\text{экв}}}, \quad (18)$$

где  $\tau_{\text{экв}} = \frac{\tau' \cdot \tau_{\text{пр}}}{\tau' + \tau_{\text{пр}}}$  – эффективное время релаксации верхнего уровня пассивного модулятора, учитывающее скорость прокачки модулирующей среды.

Переходя к новому безразмерному времени  $u' = \frac{t}{\tau_{\text{экв}}}$ , получим:

$$\frac{d\delta'}{du'} = -(2 \cdot i_{\text{экв}} + 1)\delta' + 1. \quad (19)$$

Новая система, учитывающая прокачку пассивного модулятора, будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{di_{\text{экв}}}{du'} = i_{\text{экв}} \cdot (a_{\text{экв}} \delta - b_{\text{экв}} \delta' - d), \\ \frac{d\delta}{du'} = -(\mu i_{\text{экв}} + N_{\text{экв}} + \beta_{\text{экв}}) \cdot \delta + N_{\text{экв}}, \\ \frac{d\delta'}{du'} = -(2i_{\text{экв}} + 1) \cdot \delta' + 1. \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} i_{\text{экв}} &= I \sigma' \tau_{\text{экв}}; \beta_{\text{экв}} = \frac{\tau_{\text{экв}}}{\tau}; a_{\text{экв}} = \frac{l}{z} c \sigma n_0 \tau_{\text{экв}}; \\ b_{\text{экв}} &= \frac{l'}{z} c \sigma' n'_0 \tau_{\text{экв}}; N_{\text{экв}} = W \tau_{\text{экв}}. \end{aligned} \quad (21)$$

Таким образом, система уравнений с новыми параметрами, описывающая лазер с пассивной прокачиваемой модулирующей средой, по форме совпадает с системой скоростных уравнений (1), описывающей лазер с пассивным модулятором, без прокачки модулирующей среды. Это позволяет воспользоваться результатами исследований на устойчивость, произведенное для системы уравнений (1).

Численное моделирование системы однородных уравнений (20) в одной и той же рабочей точке, что и системы (1), показывает что, такие параметры излучения, как длительность импульса и частота их следования, совпадают в безразмерном времени ( $u, u'$ ). Однако при обратном переходе от безразмерного времени  $u$  и  $u'$  к реальному времени  $t$  видно, что импульсы, сгенерированные системой (20), короче на величину  $\frac{\tau'}{\tau_{\text{экв}}}$ , чем импульсы системы (1) [3].

Физический смысл величины  $\tau_{экр}$  заключается в следующем. Частицы вещества пассивного затвора, закачиваемые в пространство взаимодействия, при выполнении условия (13) дополнительно способствуют уменьшению инверсии в затворе наряду с релаксационными переходами, характеризующимися величиной  $A'_{21}$  за счет поступивших в затвор “холодных” частиц. Таким образом, путем прокачки модулирующей среды искусственно уменьшается время релаксации верхнего уровня вещества затвора за счет быстрой откачки возбужденных частиц из области взаимодействия и их замены на “холодные” частицы.

По своему принципу прокачка модулирующей среды аналогична прокачке активной среды лазера, которая используется для уменьшения времени релаксации нижнего лазерного уровня.

**Список литературы:** 1. Булгаков Б.М., Быков М.М. Управление частотой следования импульсов излучения  $CO_2$  – лазера с фототропным затвором // Радиотехника и электроника. 1977. Т. 22, № 3. С. 590 – 596. 2. Давлетнин Р.Ф., Яценко О.В. Математическая модель и численная оптимизация рабочих параметров  $CO_2$  – лазера с оптической накачкой // Естеств. науки. 1995. № 3. С. 48 – 56. (Изв. высш. учебн. заведений. Сев.-кавказ. регион). 3. Рудченко И.М., Быков М.М. Моделирование кинетических процессов в лазерах с нелинейными модуляторами и статическими параметрами // Радиотехника: всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2002. Вып. 124. С. 142 – 147.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 23.04.2002*