

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ ОБЪЕМНЫХ ЛАЗЕРОВ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ (ОЛСЭ) ПОД ВЛИЯНИЕМ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

С.Н. СЫТОВА

*Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета  
ул. Бобруйская, 11, г. Минск, 220030, Республика Беларусь  
sytova@inp.bsu.by*

Проведено исследование хаотической динамики в объемном лазере на свободных электронах (ОЛСЭ) под влиянием внешних падающих на сеточный резонатор ОЛСЭ электромагнитных волн. Показана возможность изменения типа и величины амплитуды динамического решения, а также подавления паразитных мод в ОЛСЭ.

*Ключевые слова:* объемный лазер на свободных электронах, хаос, нелинейная динамика.

ОЛСЭ – электронный прибор, работающий на излучении релятивистских электронов, движущихся в двумерных (трехмерных) пространственно-периодических средах (резонаторах, естественных или искусственных электромагнитных (фотонных) кристаллах) в синхронизме с одной или несколькими электромагнитными волнами, для которых выполняются условия дифракции Брэгга в резонаторе вблизи области вырождения корней дисперсионного уравнения. Принципы функционирования ОЛСЭ, разработанные и экспериментально подтвержденные в [1–2], справедливы для всех частотных диапазонов и различных механизмов спонтанного излучения. Моделированию нелинейной стадии работы различных типов ОЛСЭ посвящены работы [3–4] (см. ссылки).

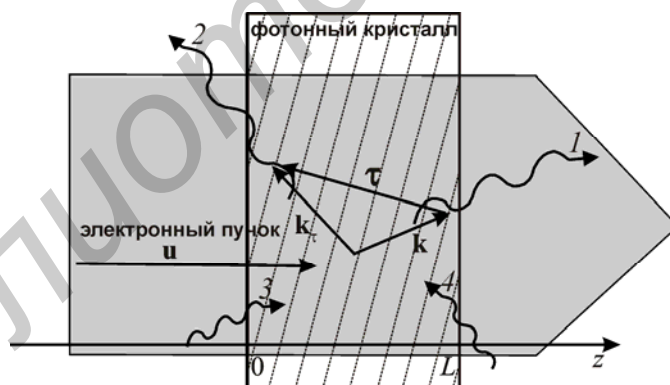


Рис. 1. Схема двухволнового ОЛСЭ в геометрии Брэгга

В [3–4] было впервые продемонстрировано, что при прохождении пучков заряженных частиц через двумерные (трехмерные) пространственно-периодические среды генерируемое квазичеренковское параметрическое излучение является хаотическим. То есть, ОЛСЭ является динамической хаотической системой, характеризующейся различными динамическими режимами работы. Источником хаоса в ОЛСЭ является сложная природа взаимодействия пучка электронов с электромагнитным полем в условиях объемной распределенной обратной связи, реализующейся в резонаторе при выполнении условий динамической дифракции, что приводит к неоднородному распределению ин-

тенсивности электромагнитного поля и ведет к значительным возмущениям в движении электронов и соответственно к многообразию динамики генерации в ОЛСЭ.

Рассмотрим теоретическую модель ОЛСЭ, лежащую в основе его моделирования (см. рис. 1). Электронный пучок со скоростью  $u$  «падает» на полубесконечную пространственно-периодическую мишень (резонатор, фотонный кристалл) толщиной  $L$ . Электроны пучка начинают испускать спонтанное излучение, которое при одновременном выполнении условий дифракции и условий синхронизма преобразуется в коллективное квазичеренковское излучение с частотой  $\omega$  и волновыми векторами  $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{k}_\tau = \mathbf{k} + \boldsymbol{\tau}$ , где  $\boldsymbol{\tau}$  – вектор обратной решетки мишени (волны 1 и 2). Система (рис.1) имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} + \gamma_0 c \frac{\partial E}{\partial z} + 0.5i \omega l E - 0.5i \omega \chi_\tau E_\tau &= j\Phi \int_0^{2\pi} \frac{2\pi - p}{4\pi} \left( e^{-i\theta(t,z,p)} + e^{-i\theta(t,z,-p)} \right) dp, \\ \frac{\partial E_\tau}{\partial t} + \gamma_1 c \frac{\partial E_\tau}{\partial z} + 0.5i \omega \chi_{-\tau} E - 0.5i \omega l_1 E_\tau &= 0, \\ \frac{\partial^2 \theta(t,z,p)}{\partial z^2} &= \frac{e\Phi}{m\gamma^3 \omega^2} \left( k_{0z} - \frac{\partial \theta(t,z,p)}{\partial z} \right)^3 \operatorname{Re} \left( E e^{i\theta(t,z,p)} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta(t,0,p)}{\partial z} = k_{0z} - \omega/u, \quad \theta(t,0,p) = p, \quad E(0,t) = E_0(t), \quad E_\tau(L,t) = E_1(t),$$

где  $t > 0$ ,  $z \in [0, L]$ ,  $p \in [-2\pi, 2\pi]$ .  $E(z,t)$  и  $E_\tau(z,t)$  – амплитуды проходящей и дифрагированной волн (волны 1 и 2 рис.1).  $\theta(t,z,p)$  – фаза электронов относительно электромагнитной волны.  $\gamma_{0,1}$  – направляющие косинусы векторов  $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{k}_\tau$ .  $\Phi$ ,  $l_0$ ,  $l_1$ ,  $l$  – системные параметры.  $\gamma$  – Лоренц-фактор электронного пучка.  $\delta$  – отклонение от точного выполнения условия синхронизма.  $\varepsilon_0 = 1 + \chi_0$  – диэлектрическая проницаемость среды,  $\chi_0$ ,  $\chi_{\pm\tau}$  – коэффициенты ее разложения в ряд по векторам обратной решетки.

$E_0(t)$  и  $E_1(t)$  в (1) определяют граничные условия для волн  $E(z,t)$  и  $E_\tau(z,t)$  и представляют собой внешние падающие на резонатор волны (волны 3 и 4 рис.1). Они обе могут быть равны 0 и тогда при превышении пороговых условий система работает в режиме генерации, либо быть отличными от нуля. Анализ результатов моделирования для различных случаев  $E_0(t)$  по сравнению со случаем  $E_0 \equiv 0$  является целью данной работы. По результатам численного моделирования построены параметрические карты перехода к хаосу для случаев  $E_0 \equiv 0$ ;  $E_0 \equiv 100$ ;  $E_0(t) = 100 + 20 \sin(3t) + 20a$ , где  $a$  – случайное число в интервале  $[0,1]$ , генерируемое в каждый момент времени. На данных картах демонстрируется изменение типов динамических решений для различных  $E_0$ , в том числе вместо высокоамплитудных хаотических режимов местами получены низкоамплитудные режимы и наоборот, а также существенное увеличение по амплитуде электромагнитных волн на выходе из резонатора по сравнению со случаем  $E_0 \equiv 0$ . Показано, как для режима хаотической перемежаемости, представляющего собой случайные переключения между несколькими аттракторами, отвечающими разным модам в системе, внешний сигнал возбуждает сильнее одну из таких мод и решение кардинально меняет свой вид. Продемонстрировано проявление одного из свойств ОЛСЭ – подавления паразитных мод в системе, выражающееся в подавлении хаотической составляющей, вносимой генератором случайных чисел.

#### Список литературы

1. *Baryshevsky V.G., Feranchuk I.D.* // Physics Let. A. 1984. Vol.102. P. 141–144.
2. *Baryshevsky V.G.* High-energy nuclear optics of polarized particles. World Press. 2012.
3. *Батраков К.Г., Сытова С.Н.* // ЖВМ и МФ. 2005. Т. 45, № 4. С. 690–700.
4. *Сытова С. Н.* // Известия вузов. ПНД. 2012. Т. 20, № 6. С.124–135.