

**Модели нелинейной динамики
заряженных частиц в
пространственно-периодических
средах**

Светлана Сытова

**Институт ядерных проблем
Белгосуниверситета**

sytova@inp.bsu.by

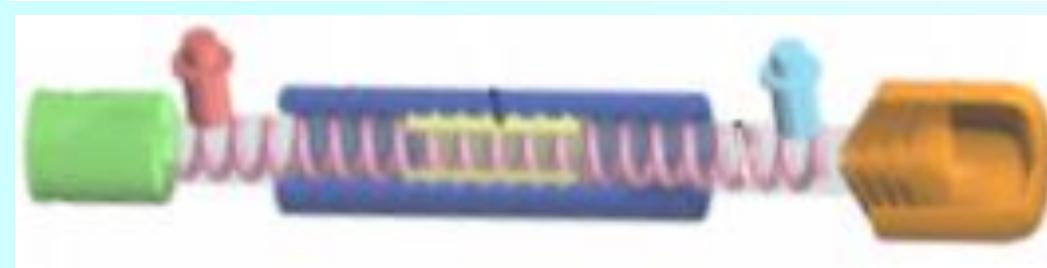
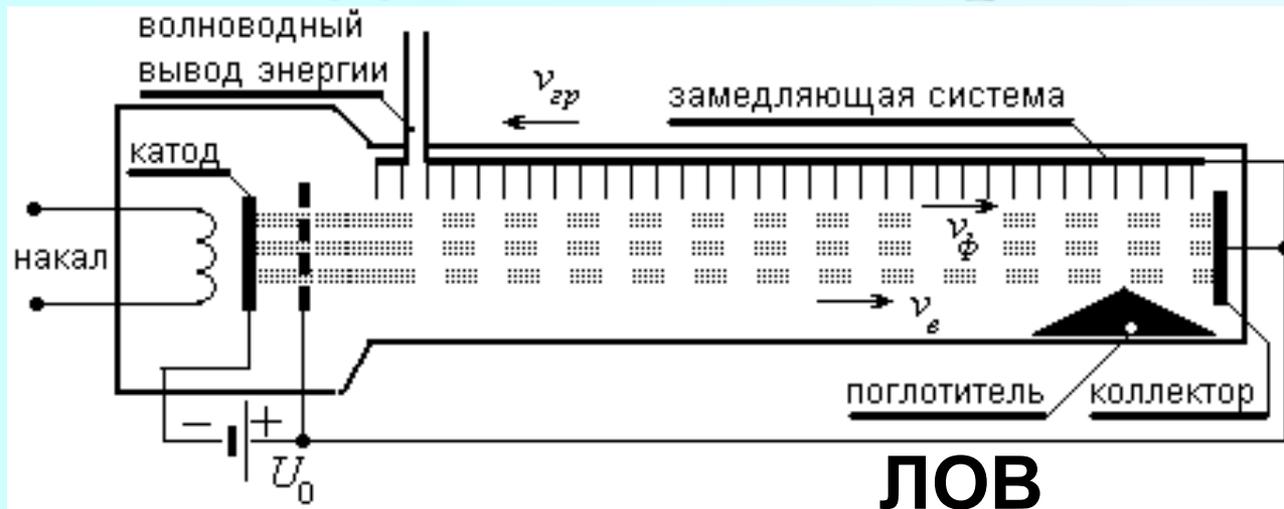


BSU

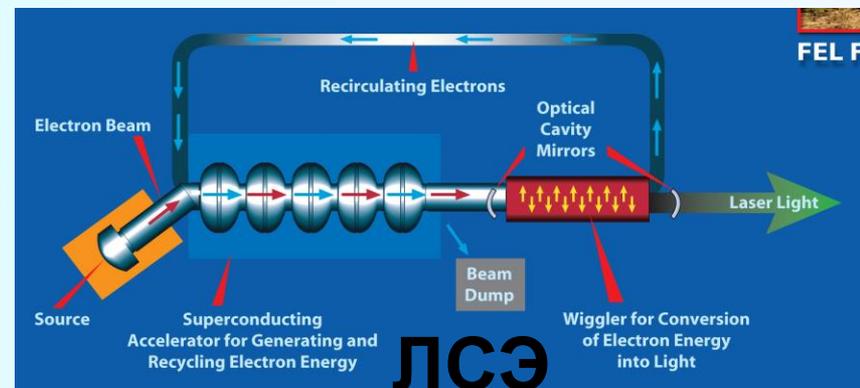


INP

Вакуумные электронные приборы

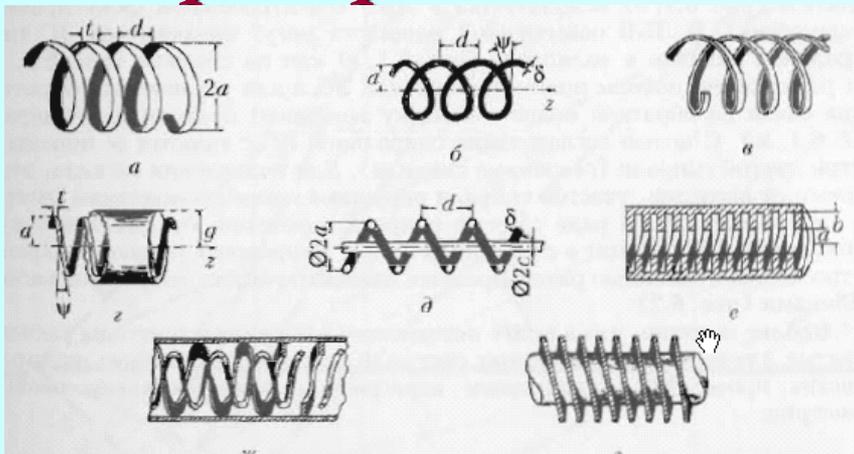


ЛОВ

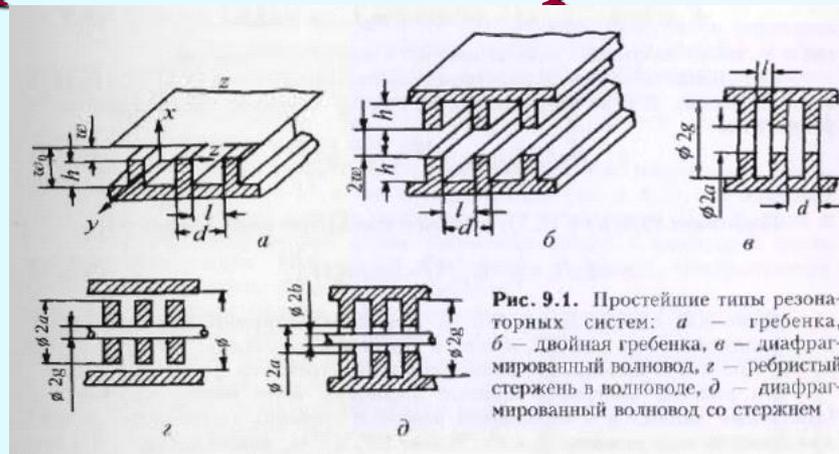


Основа функционирования таких приборов заключается в излучении электронов, сгруппированных в сгустки и взаимодействующих в резонаторе (замедляющей системе - пространственно-периодической среде) с замедленными электромагнитными волнами.

Замедляющие системы – пространственно-периодические среды*

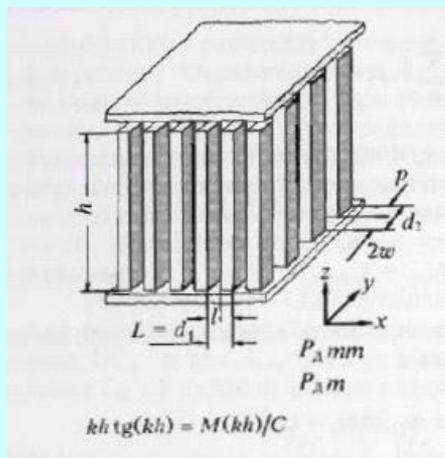


Спиральные замедляющие системы



Резонаторные системы (гребенки)

Рис. 9.1. Простейшие типы резонаторных систем: а – гребенка, б – двойная гребенка, в – диафрагмированный волновод, г – ребристый стержень в волноводе, д – диафрагмированный волновод со стержнем



Штыревые и щелевые системы

* Р. А. Силин. Периодические волноводы. 2002

(19) **SU**⁽¹¹⁾ 1 840 644⁽¹³⁾ A1

(51) МПК
H01J 25/40 (2006.01)
H01J 23/24 (2006.01)



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ СССР

(21), (22) Заявка: 462097/09, 04.09.1956
(45) Опубликовано: 10.08.2007 Бюл. № 22

Адрес для переписки:
117149, Москва, Симферопольский б-р, д.2А,
ка.44, Солнцева В.А.

(71) Заявитель(и):
Тагер Александр Семенович,
Зюлина Елена Аристарховна,
Пободоносцев Александр Сергеевич,
Негирев Александр Андреевич,
Самородова Галина Александровна,
Солнцев Виктор Анатольевич

(72) Автор(ы):
Тагер Александр Семенович (RU),
Зюлина Елена Аристарховна (RU),
Пободоносцев Александр Сергеевич (RU),
Негирев Александр Андреевич (RU),
Самородова Галина Александровна (RU),
Солнцев Виктор Анатольевич (RU)

(54) ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ЛАМПА МАЛОЙ МОЩНОСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА
(57) Реферат:
Изобретение относится к области радиотехники и предназначено для



S U 1 8 4 0 6 4

Объемные лазеры на свободных электронах (ОЛСЭ)

Эта закономерность универсальна и справедлива для всех частотных диапазонов и механизмов спонтанного излучения

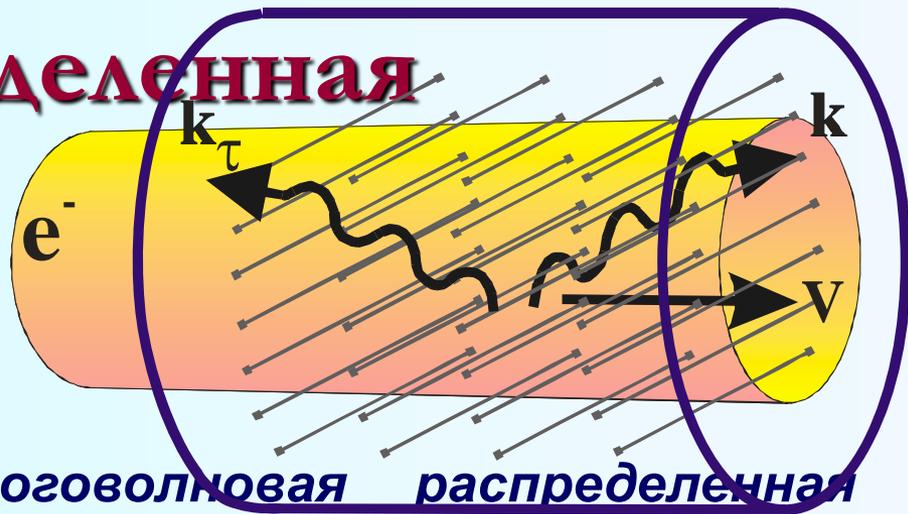
Новая закономерность* для инкремента G излучательной неустойчивости пучка релятивистских частиц, пролетающего через пространственно-периодическую мишень в условиях дифракции Брэгга вблизи области пересечения корней дисперсионного уравнения, когда G оказывается пропорциональным не $\sqrt[3]{\rho}$, а $G \sim \sqrt[3+s]{\rho}$, (s – число дополнительных волн, возникающих в системе благодаря дифракции), **приводит к радикальному изменению пороговых условий генерации**

*V.G.Baryshevsky, I.D.Feranchuk, *Phys.Lett.* 102A (1984) 141,

В.Г.Барышевский, ДАН СССР, 299(1988), 1363

$$j_{start} \sim \frac{1}{(kL)^{3+2s}}$$

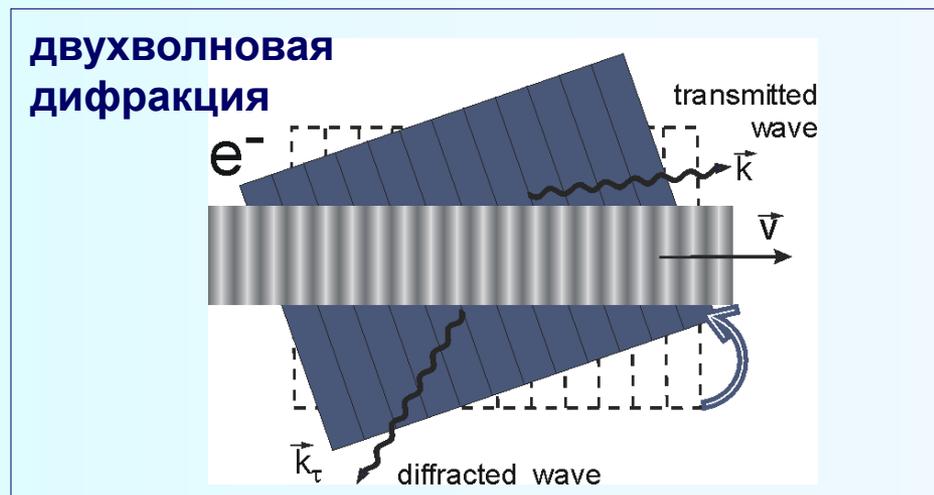
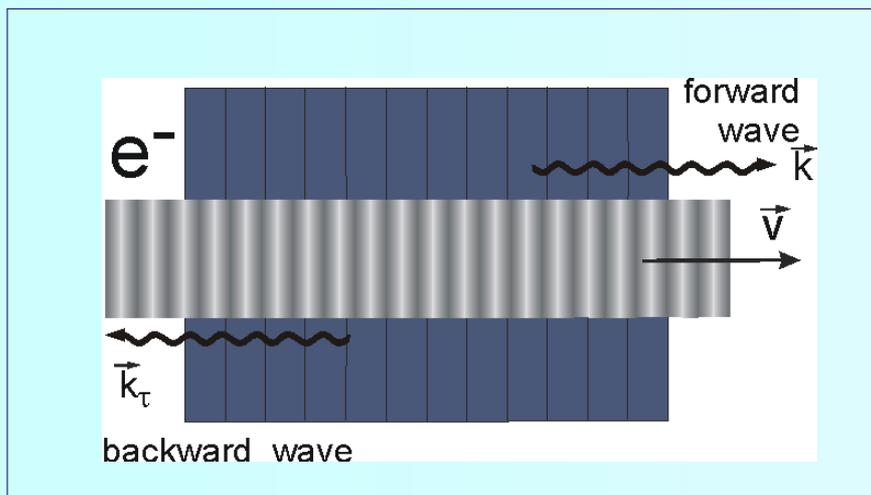
Объемная распределенная обратная связь



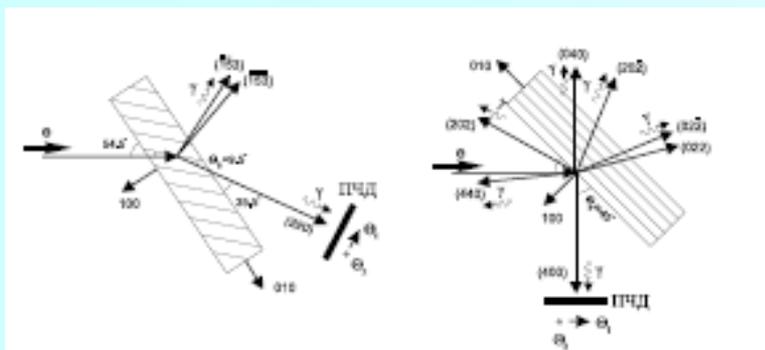
Объемная (неодномерная) многоволновая распределенная обратная связь является основной особенностью объемных лазеров на свободных электронах (ОЛСЭ)

одномерная распределенная обратная связь

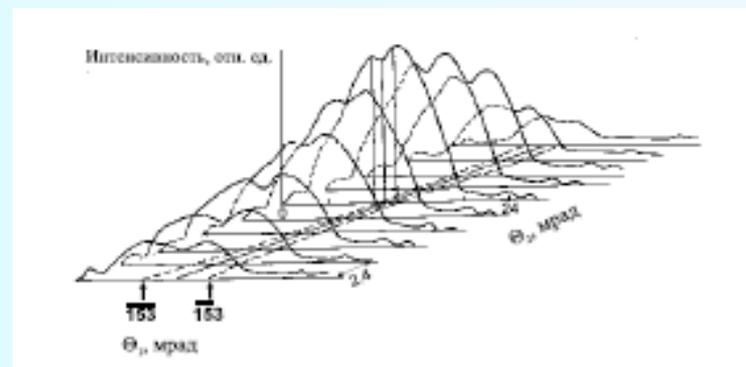
двумерная распределенная обратная связь



Эксперименты по многоволновой рентгеновской дифракции*



Схемы экспериментов
4-волновой 8-волновой



Экспериментальные результаты

*В. Афанасенко, В.Г.Барышевский и др. Письма ЖТФ 15 (1989) 33
V.Afanasenko, V.Baryshevsky et al. Phys. Lett. A141 (1989) 311
В. Афанасенко, В.Г.Барышевский и др. Письма ЖЭТФ 51 (1990) 213

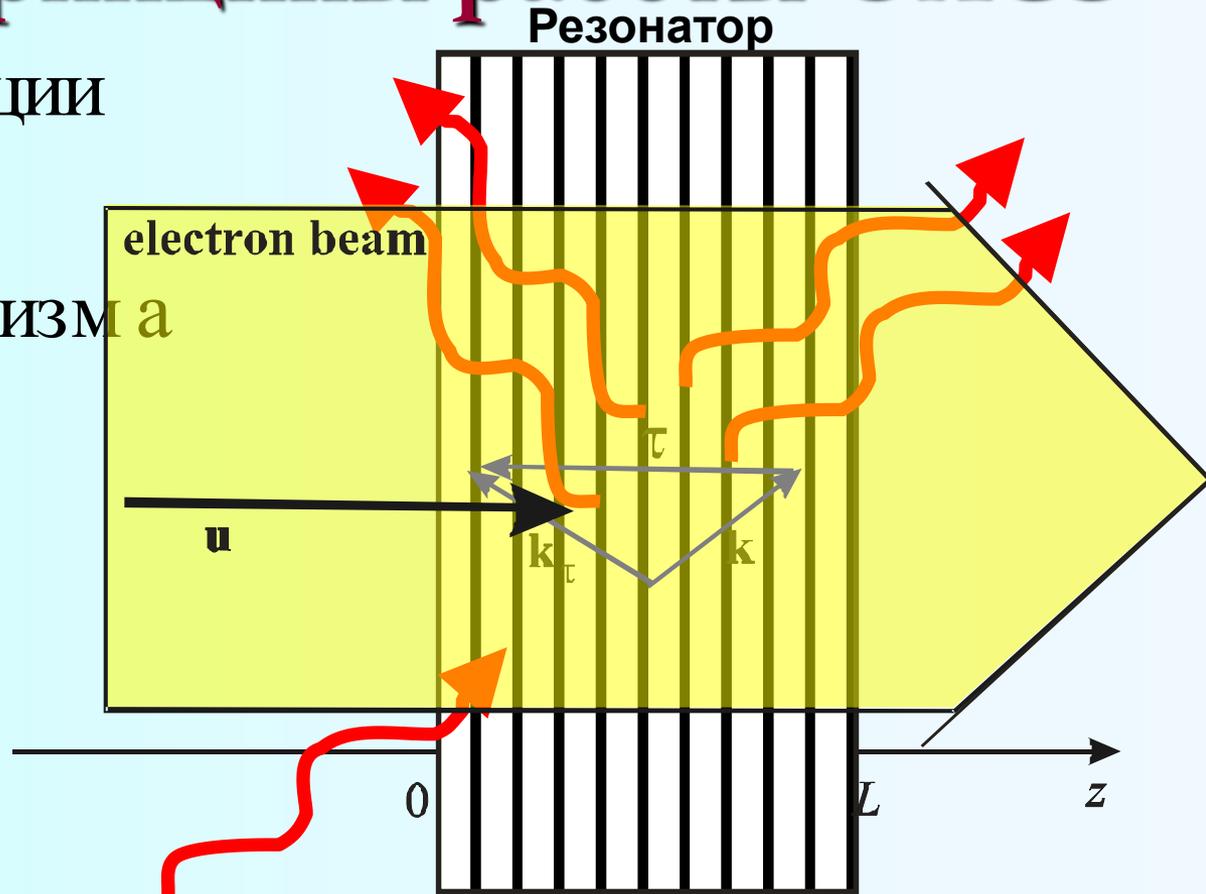
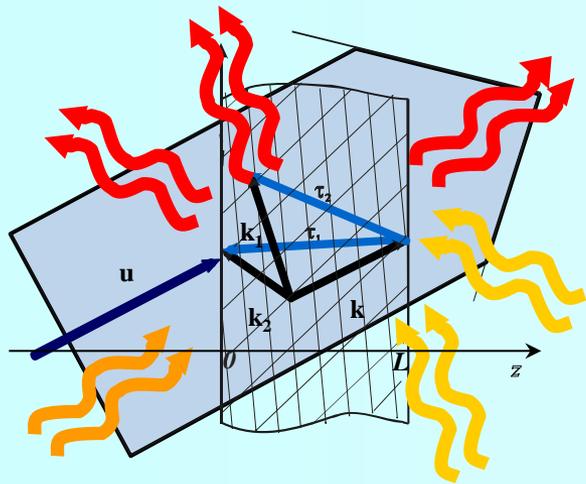
Основные принципы работы ОЛСЭ

Условия дифракции

$$2\mathbf{k}\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}^2 \approx 0$$

Условия синхронизма

$$|\omega - \mathbf{k}\mathbf{u}| = \delta\omega \approx 0$$



ОЛСЭ может использовать **различные механизмы** спонтанного излучения – дифракционное или черенковское, Смит-Парселл, ондуляторное, излучение в лазерной волне и т.д.

История экспериментального исследования ОЛСЭ



1996

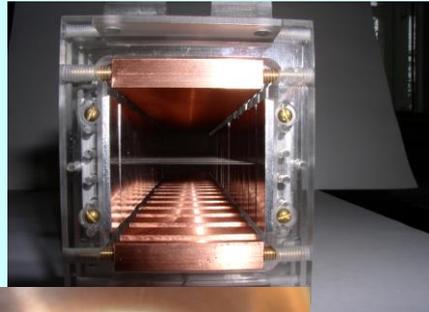
V.G.Baryshevsky et al., NIM 393A (1997) 71

Экспериментальное моделирование электродинамических процессов в объемной дифракционной решетке, сделанной из диэлектрических нитей

2001

V.G.Baryshevsky et al., NIM 483 A (2002) 21

Первая генерация ОЛСЭ в миллиметровом диапазоне. Экспериментальная проверка принципов ОЛСЭ. Демонстрация перестройки частоты при фиксированной энергии электронов



2004 *V.G. Baryshevsky et al., NIM. B 252 (2006) 86*

ОЛСЭ с объемным сеточным резонатором (фотонный кристалл на основе металлических нитей)

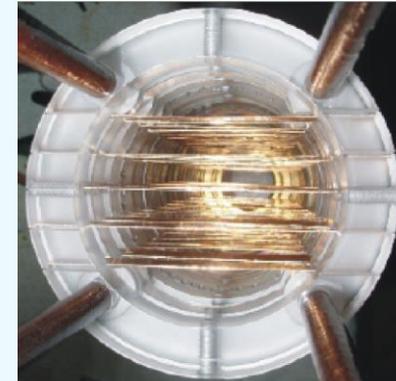
V. G. Baryshevsky et al.

Proc. IRMMW-THz 2010; Proc. FEL2010.

Nuovo Cimento 34 (2011), 199

2009

ОЛСЭ с объемными сеточными и фольговыми резонаторами



Система для двухволнового ОЛСЭ:

$$\frac{\partial E}{\partial t} \left(1 + \chi_0 + \frac{\omega}{2} \frac{\partial \chi_0}{\partial \omega} \right) + \frac{\partial E_\tau}{\partial t} \left(\chi_{-\tau} + \frac{\omega}{2} \frac{\partial \chi_{-\tau}}{\partial \omega} \right) + \gamma_0 c \frac{\partial E}{\partial z} + 0.5i \frac{\mathbf{k}^2 c^2 - \omega^2 \varepsilon_0}{\omega} E$$

$$- 0.5i \omega \chi_\tau E_\tau = 2\pi j \Phi \int_0^{2\pi} \frac{2\pi - p}{8\pi^2} \left(e^{-i\theta(t,z,p)} + e^{-i\theta(t,z,-)} \right) dp,$$

$$\frac{\partial E_\tau}{\partial t} \left(1 + \chi_0 + \frac{\omega}{2} \frac{\partial \chi_0}{\partial \omega} \right) + \frac{\partial E}{\partial t} \left(\chi_\tau + \frac{\omega}{2} \frac{\partial \chi_\tau}{\partial \omega} \right) + \gamma_1 c \frac{\partial E_\tau}{\partial z} -$$

$$- 0.5i \omega \chi_{-\tau} E + 0.5i \frac{\mathbf{k}_\tau^2 c^2 - \omega^2 \varepsilon_0}{\omega} E_\tau = 0,$$

$$E(t, 0) = E_0, \quad E_\tau(t, L) = E_{\tau 0}, \quad E(0, z) = 0, \quad E_\tau(0, z) = 0$$

$\gamma_{0,1}$ - направляющие косинусы, $\beta = \gamma_0 / \gamma_1$ - фактор асимметрии, $\mathbf{k}_\tau = \mathbf{k} + \boldsymbol{\tau}$
 $\chi_0, \chi_{\pm\tau}$ - Фурье-компоненты диэлектрической проницаемости среды *

$$\varepsilon_0 = n_{||}^2 = 1 + \chi_{||}, \quad \chi_{||} = \chi_0, \quad \varepsilon_\tau = \varepsilon_{-\tau} = \chi_{||}, \quad \chi_{||} = \frac{4\pi}{\Omega_2 k^2} \frac{J_0(kR)}{\pi N_0(kR) - 2CJ_0(kR)}$$

*V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich, NIM B 252 (2006) 92-101

Уравнения для электронного пучка

$$\frac{\partial^2 \theta(t, z, p)}{\partial z^2} = \frac{e\Phi}{m\gamma^3 \omega^2} \left(k - \frac{\partial \theta(t, z, p)}{\partial z} \right)^3 \operatorname{Re}(E(t - z/u, z)) \times \exp(i\theta(t, z, p)),$$

$$\frac{\partial \theta(t, 0, p)}{\partial z} = k - \omega/u, \quad \theta(t, 0, p) = p,$$

$$t > 0, \quad z \in [0, L], \quad p \in [-2\pi, 2\pi]$$

$\theta(t, z, p)$ - фаза электронов пучка по отношению к электромагнитной волне

Использован метод усреднения по фазам влета релятивистских электронов в область взаимодействия (по моменту и по поперечной координате влета электронов в область взаимодействия)

Основные результаты моделирования

- Численно получены все основные физические законы функционирования ОЛСЭ включая пороговые условия генерации
- Показано, что для эффективной генерации существует оптимальный набор параметров ОЛСЭ
- Получены пороги генерации для экспериментальных установок ОЛСЭ
- Показана необходимость учета дисперсии электромагнитных волн на нитях резонатора в системе

Исследование хаоса в ОЛСЭ

Сложная природа взаимодействия пучка электронов с электромагнитным полем в условиях объемной распределенной обратной связи, реализующейся в резонаторе при выполнении условий динамической дифракции, приводит к неоднородному распределению интенсивности электромагнитного поля, что в свою очередь ведет к значительным возмущениям в движении электронов и соответственно к многообразию динамики генерации в ОЛСЭ.

- Были изучены пространственно-временная и фазовая динамика ОЛСЭ.
- Получены следующие динамические режимы работы ОЛСЭ: периодический, квазипериодический, хаотический, перемежаемость, переходной хаос и др., дополненные соответствующими фазовыми портретами, аттракторами и картами Пуанкаре.
- Получены примеры сложной трансформации динамических режимов с наличием областей периодичности, квазипериодичности и хаоса.
- Исследована чувствительность различных режимов к изменению начальных условий.
- Построены различные параметрические карты перехода к хаосу

Стационарное решение стандартной задачи дифракции в резонаторе

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_0 c \frac{\partial E}{\partial z} + 0.5i\omega l E - 0.5i\omega \chi_\tau E_\tau = 0, \\ \gamma_1 c \frac{\partial E_\tau}{\partial z} - 0.5i\omega \chi_{-\tau} E + 0.5i\omega l_1 E_\tau = 0, \\ E(t,0) = E_0, \quad E_\tau(t,L) = 0 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} E = C_1 e^{ik\delta_1 z} + C_2 e^{ik\delta_2 z}, \\ E_\tau = s_1 C_1 e^{ik\delta_1 z} + s_2 C_2 e^{ik\delta_2 z} \end{array} \right.$$

$$\delta_n = (-(l_1\gamma_0 + l\gamma_1) \pm ((l_1\gamma_0 + l\gamma_1)^2 - 4\gamma_0\gamma_1(ll_1 - r))^{1/2}) / (4\gamma_0\gamma_1),$$

$$s_n = \frac{\chi_{-\tau}}{2\gamma_1\delta_n + l_1}, \quad n = 1, 2$$

$$C_1 = \frac{-E_0 s_2 e_2}{s_1 e_1 - s_2 e_2}, \quad C_2 = \frac{-E_0 s_1 e_1}{s_1 e_1 - s_2 e_2}, \quad e_n = e^{ik\delta_n L}, \quad r = \chi_\tau \chi_{-\tau}.$$

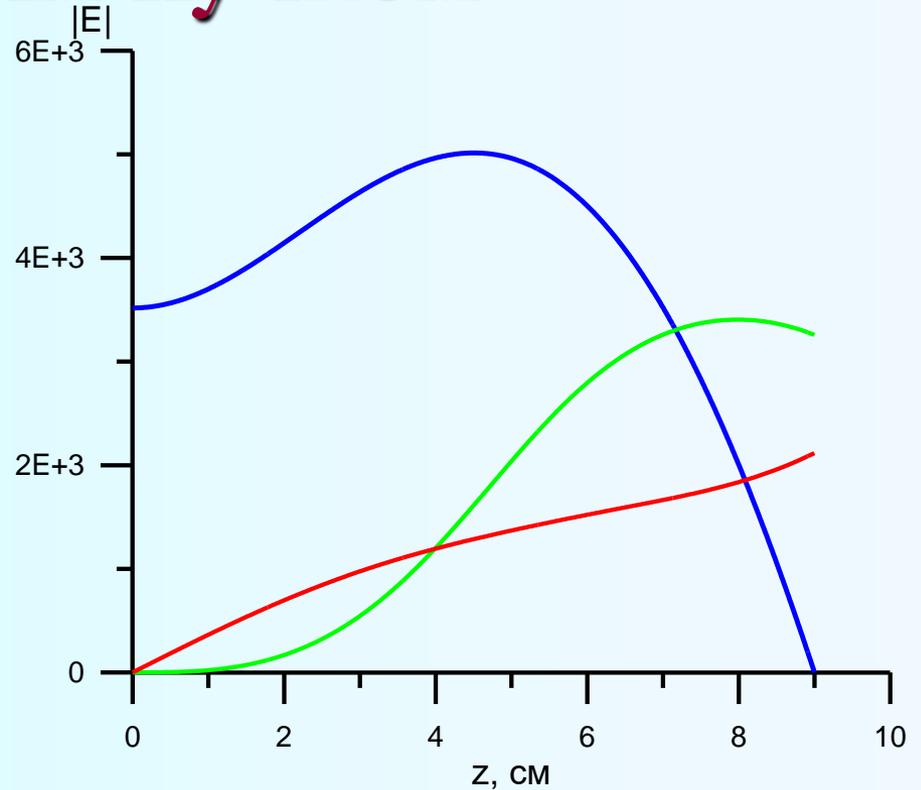
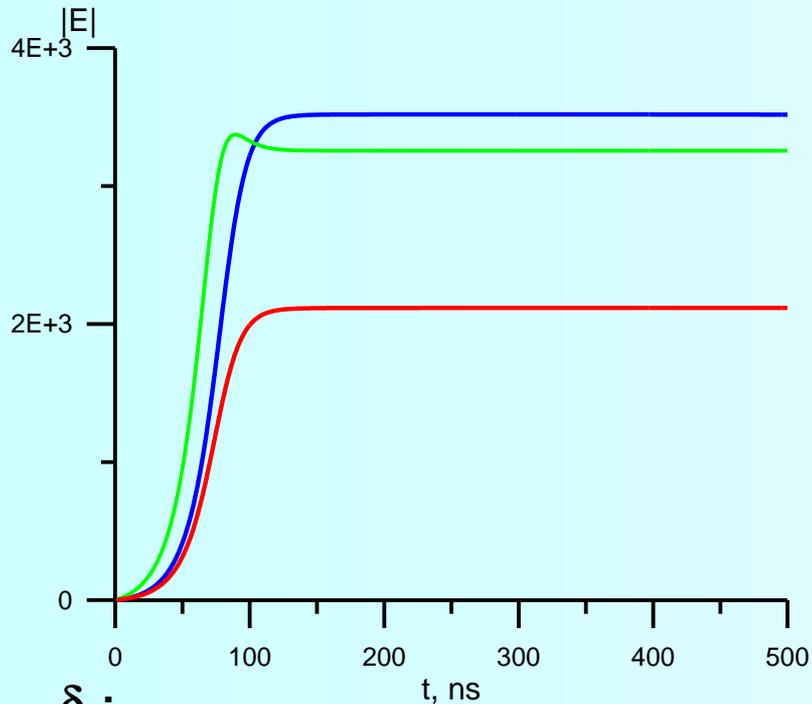
Стационарное решение с электронным пучком

$$\left\{ \begin{array}{l} E = \sum_{n=1}^4 C_n e^{ik\delta_n z}, \\ E_\tau = \sum_{n=1}^4 C_n s_n e^{ik\delta_n z}, \\ j = \sum_{n=1}^4 j_n e^{ik\delta_n z}. \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \gamma_0 c i k \delta_n C_n + 0.5 i \omega l C_n - 0.5 i \omega \chi_\tau s_n C_n = j_n, \\ \gamma_1 c i k \delta_n s_n C_n - 0.5 i \omega \chi_{-\tau} C_n + 0.5 i \omega l_1 s_n C_n = 0, \\ j_n = 2\pi j_0 \Phi \int_0^{2\pi} \frac{2\pi-p}{8\pi^2} \left(e^{-i\theta_n(p)} + e^{-i\theta_n(-p)} \right) dp, \\ \frac{d^2 \theta_n}{dz^2} = \frac{e\Phi}{m\gamma^3 \omega^2} \left(k - \frac{d\theta_n}{dz} \right)^3 \operatorname{Re} \left(C_n e^{ik\delta_n z} e^{i\theta_n} \right), \\ \frac{d\theta_n(0, p)}{dz} = k - \omega/u, \quad \theta_n(0, p) = p \end{array} \right.$$

$$\left(2\gamma_0 \gamma_1 \delta_n^2 + \gamma_0 l_1 \delta_n + \gamma_1 l \delta_n + 0.5(l l_1 - r) \right) \delta_n^2 = F(2\gamma_1 \delta_n + l_1)$$

$$\sum_{n=1}^4 C_n = E_0, \quad \sum_{n=1}^4 s_n e_n C_n = 0, \quad \sum_{n=1}^4 \frac{C_n}{\delta_n} = 0, \quad \sum_{n=1}^4 \frac{C_n}{\delta_n^2} = 0$$

Стационарное решение с электронным пучком



δ_n :

(0.4947387E-01, 0.4508134E-22)

0.1274029E+00, 0.4109615E+00)

(0.1274029E+00, -0.4109615E+00)

(-0.6292797E+00, 0.1387779E-14)

$$\left| e^{ik\delta_3 L} \right| = 2.3E+03$$

Решение для малых осцилляций по времени

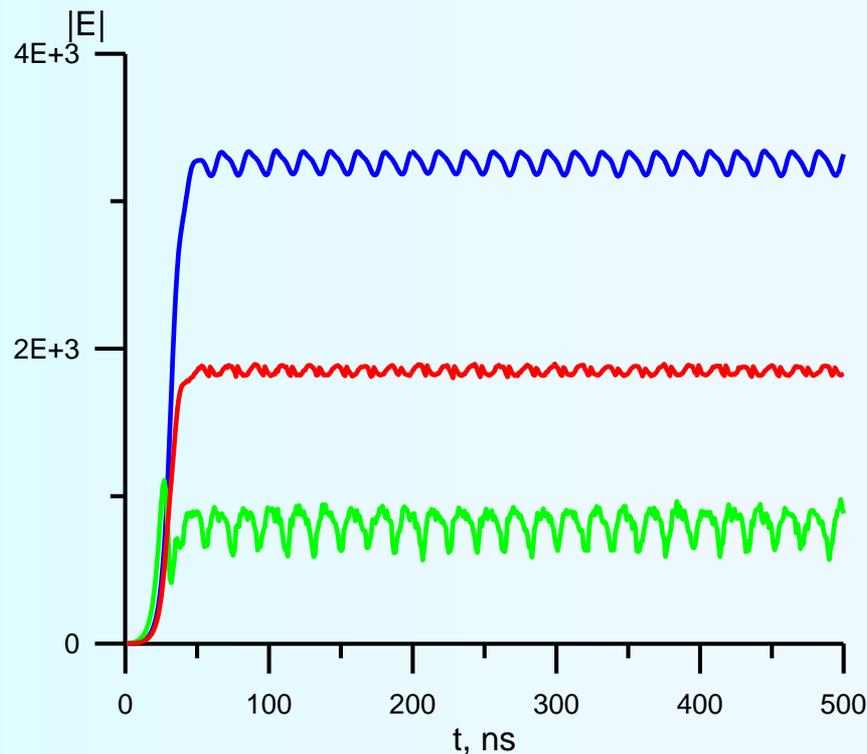
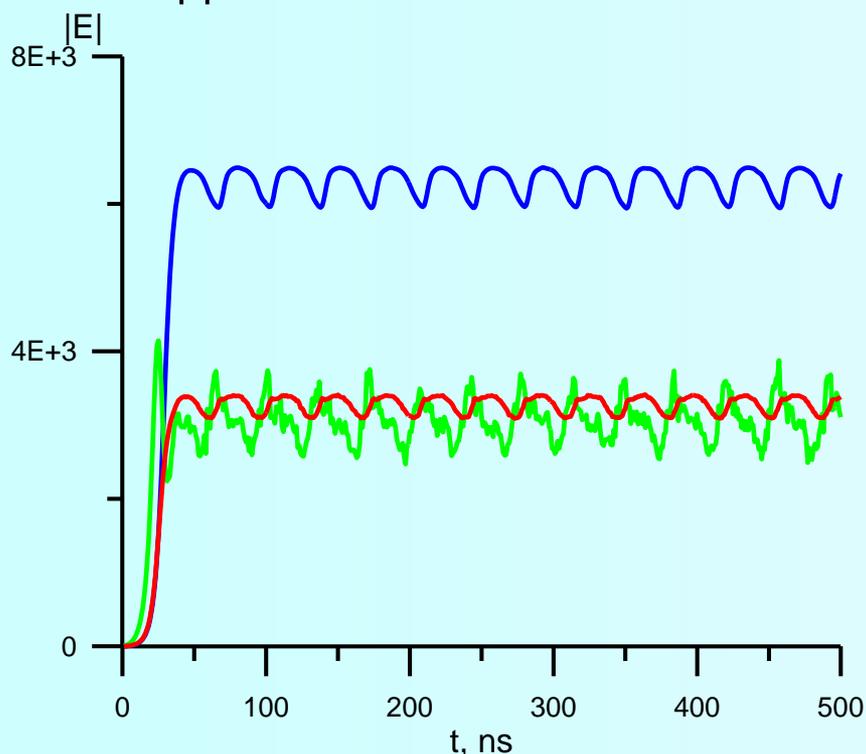
$$\begin{cases} E = \sum_{n=1}^4 C_n e^{ik\delta_n z} \left(1 + \sum_{m=1}^2 B_n^m e^{i\omega_n^m t} \right), \\ E_\tau = \sum_{n=1}^4 C_n s_n e^{ik\delta_n z} \left(1 + \sum_{m=1}^2 B_n^m S_n^m e^{i\omega_n^m t} \right), \end{cases}$$

$$\left(2\frac{\omega_n^m}{\omega} + 2\gamma_0\delta_n + l \right) \left(2\frac{\omega_n^m}{\omega} + 2\gamma_1\delta_n + l_1 \right) - r = \frac{F}{\delta_n^2} \left(2\frac{\omega_n^m}{\omega} + 2\gamma_1\delta_n + l_1 \right),$$

$$S_n^m = \frac{\chi_{-\tau}}{s_n \left(2\frac{\omega_n^m}{\omega} + 2\gamma_1\delta_n + l_1 \right)}, \quad n = 1, \dots, 4; m = 1, 2$$

Динамика генерации ОЛСЭ

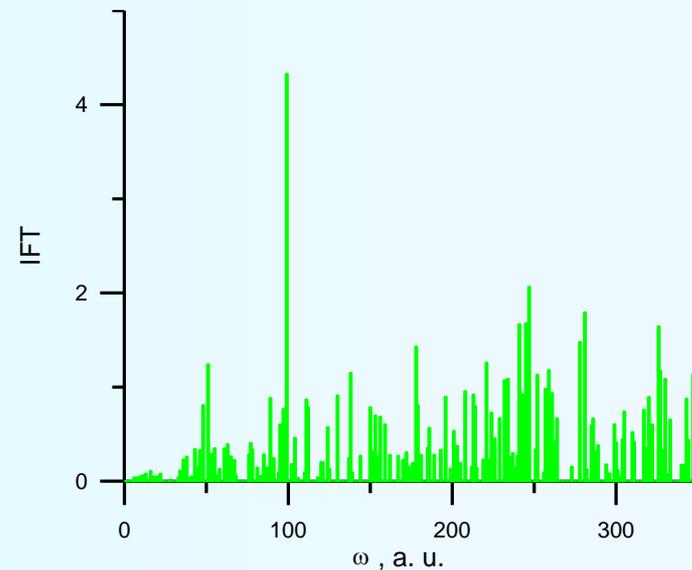
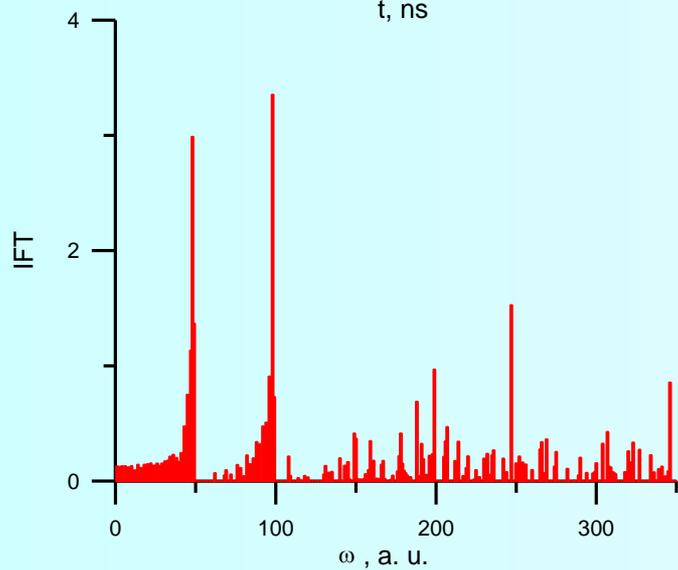
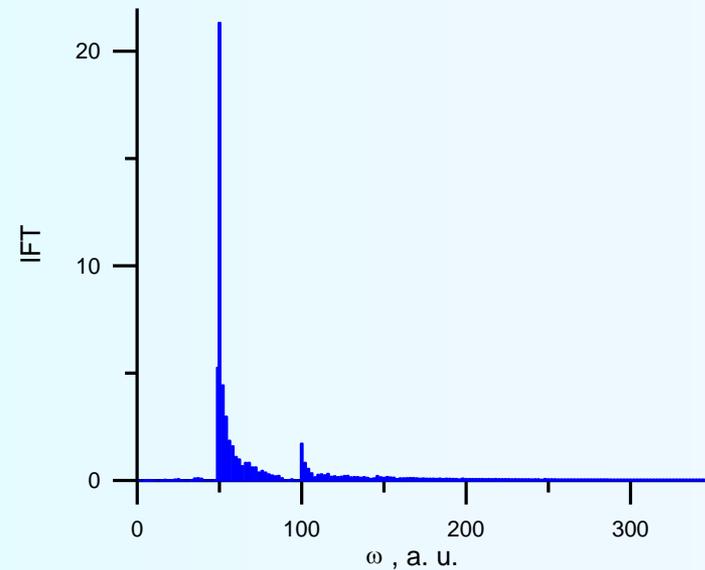
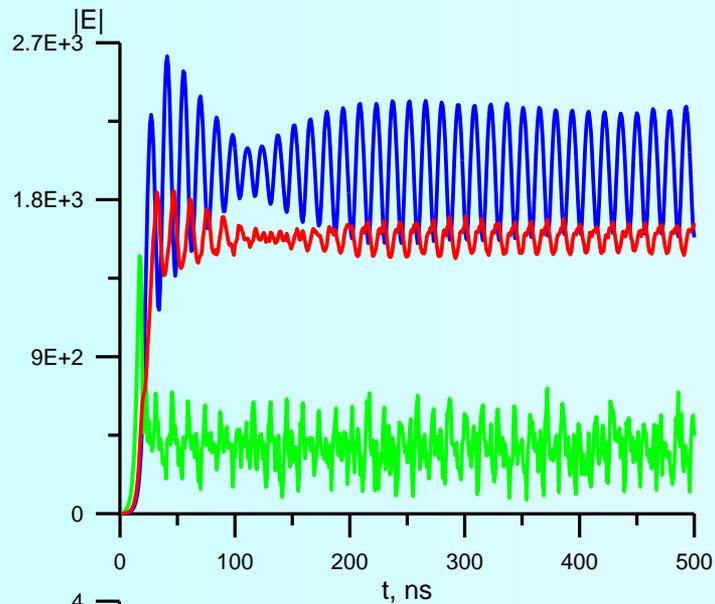
При генерации больших мощностей в сверхразмерной системе, которой является ОЛСЭ, возникает генерация большого количества нежелательных мод. В результате развивается деструктивная интерференция, и излучение становится некогерентным. ОРОС позволяет выделить требуемые моды и подавить нежелательные*



Сытова С. Известия вузов.

Прикладная нелинейная динамика. 19 (2011), № 2, 93-111.

Динамика генерации ОЛСЭ



Выводы

- Поскольку физические принципы работы ОЛСЭ отличаются от других вакуумных электронных приборов, то ОЛСЭ является новым объектом исследования.
- Полученные экспериментальные и теоретические результаты свидетельствуют о том, что ОЛСЭ является источником мощного излучения в различных диапазонах длин волн, включая миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны.
- В моделировании ОЛСЭ исследованы различные стороны нелинейной динамики ОЛСЭ, что пригодится в его экспериментальных исследованиях, в частности, показано подавление паразитных мод при прохождении пучка электронов через резонатор
- Получены аналитические решения системы в случае стационарных и некоторых периодических режимов работы ОЛСЭ.

Спасибо за внимание!

The background features a light blue gradient. In the lower right quadrant, there are several thick, wavy, light gray lines that create a sense of movement and depth, resembling stylized waves or a modern graphic design element.