

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНОГО ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ С СЕТОЧНЫМ РЕЗОНАТОРОМ

**В. Г. Барышевский, Н. А. Белоус, А. А. Гуринович, В. А. Евдокимов, А. С. Лобко, П. В. Молчанов, А. В. Оськин, В. И. Столярский**

Генерация объемного лазера на свободных электронах (ОЛСЭ) с сеточным фотонным кристаллом, созданным из натянутых металлических нитей, была исследована в режиме лампы обратной волны. Исследования порога генерации были проведены для различных сеточных фотонных кристаллов и получена зависимость порога генерации от длины фотонного кристалла.

### 1. Введение

В настоящее время широко распространены генераторы, использующие излучение электронного пучка в периодической замедляющей структуре (лампы бегущей волны, лампы обратной волны, лазеры на свободных электронах) [1]. Дифракционное излучение [2] в периодической структуре лежит в основе работы лампы бегущей волны [3, 4], лампы обратной волны и лазеров, использующих излучение Смит – Парсела [5–7], а также объемных лазеров на свободных электронах, использующих двух- или трехмерную распределенную обратную связь [8–11]. Использование смит-парселовских лазеров и подобных им устройств ограничено необходимостью точной проводки электронного пучка над замедляющей структурой (электронный пучок должен проходить на расстоянии  $\delta \leq \frac{\lambda\beta\gamma}{4\pi}$  над дифракционной структурой, здесь  $\lambda$  – длина волны излучения,  $\beta = v/c$ , где  $v$  – скорость электронного пучка,  $\gamma$  – Лоренц-фактор). Электрическая стойкость резонатора ограничивает мощность излучения и ток электронного пучка. Длина волны излучения обычных волноводных систем существенно ограничивается требованием на поперечные размеры резонатора, которые не могут существенно превосходить длину волны.

Большая часть указанных проблем может быть преодолена в ОЛСЭ [8–12]. В ОЛСЭ благодаря объемному характеру взаимодействия с электромагнитной волной взаимодействует большая часть электронного пучка. Поперечные размеры резонатора ОЛСЭ могут существенно превосходить длину волны  $D \gg \lambda$ . Кроме того, электронный пучок и мощность излучения распределены по всему объему, что улучшает электрическую прочность системы. Один из типов ОЛСЭ [11] может быть создан на основе объемного сеточного резонатора (сеточного фотонного кристалла), который образован периодически натянутыми диэлектрическими или металлическими нитями. Сеточная структура из диэлектрических

нитей была исследована в [13], где было продемонстрировано, что добротность такого фотонного кристалла может быть достаточно высокой ( $10^4$ – $10^6$ ).

Теоретический анализ [14, 16] показал, что в диапазоне длин волн, в котором толщина скин-слоя меньше радиуса металлической нити, периодическая металлическая сетка слабо поглощает электромагнитное излучение и сеточный фотонный кристалл из металлических нитей оказывается почти прозрачным для такого излучения. Выводы, сделанные в [14], позволили обосновать возможность создания ОЛСЭ с сеточным фотонным кристаллом из металлических нитей.

Первая генерация ОЛСЭ с сеточным фотонным кристаллом из металлических нитей была получена в эксперименте [15] в полном соответствии с выводами [14].

В настоящем сообщении исследуется зависимость интенсивности генерируемого излучения от длины фотонного кристалла в режиме лампы обратной волны.

## 2. Концепция

Распространение волн через фотонные кристаллы является предметом многочисленных исследований [17–20].

Существует ряд трудностей, возникающих при рассмотрении взаимодействия электромагнитной волны с фотонным кристаллом из металлических нитей. Хорошо известно, что металлическая сетка хорошо отражает электромагнитные волны, поэтому возникает вопрос, будет ли волна проникать в резонатор, внутри которого помещен набор металлических сеток (см. рис. 1). Теоретический анализ [14, 16] показал, что фотонный кристалл из металлических нитей не поглощает электромагнитные волны и почти прозрачен в диапазоне частот от гигагерц до терагерц. В этом диапазоне глубина скин-слоя  $\delta$  для большинства металлов составляет не больше нескольких микрон (например, для 10 ГГц  $\delta_{Cu} = 0.66$  мкм,  $\delta_{Al} = 0.8$  мкм,  $\delta_W = 1.16$  мкм и т. д.), поэтому металлические нити могут рассматриваться как идеально проводящие.

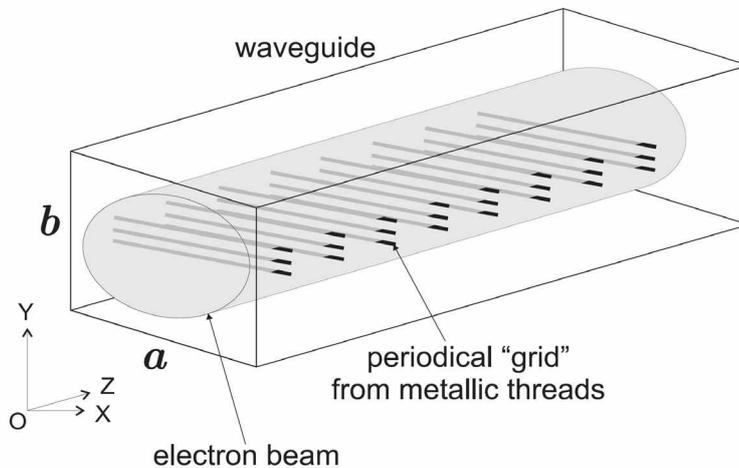


Рис. 1. Сеточный фотонный кристалл

В соответствии с работами [14, 16] показатель преломления фотонного кристалла можно записать в виде

$$n_{\parallel(\perp)}^2 = 1 + \frac{\eta_{\parallel(\perp)}}{k^2}, \quad (1)$$

где

$$\eta_{\parallel(\perp)} = \frac{4\pi}{\Omega_2} \frac{A_0}{1 + i\pi A_0 - 2CA_0}, \quad (2)$$

$n_{\parallel}$  и  $n_{\perp}$  – показатели преломления для волн с поляризацией, параллельной и перпендикулярной оси нити соответственно;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $R$  – радиус нити;  $\Omega_2 = d_y \cdot d_z$ , где  $d_y$  и  $d_z$  – период фотонного кристалла вдоль оси  $y$  и  $z$  соответственно,  $C = 0.5772$  константа Эйлера. Величины  $A_{0(\parallel)}$  и  $A_{0(\perp)}$  для идеально проводящего цилиндра определены в [15, 16]:

$$\begin{aligned} A_{0(\parallel)} &= \frac{1}{\pi} \frac{J_0(kR)N_0(kR)}{J_0^2(kR) + N_0^2(kR)} + \frac{i}{\pi} \frac{J_0^2(kR)}{J_0^2(kR) + N_0^2(kR)}, \\ A_{0(\perp)} &= \frac{1}{\pi} \frac{J_0'(kR)N_0'(kR)}{J_0'^2(kR) + N_0'^2(kR)} + \frac{i}{\pi} \frac{J_0'^2(kR)}{J_0'^2(kR) + N_0'^2(kR)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $J_0, N_0, J_0'$  и  $N_0'$  – функции Бесселя и Неймана и их производные соответственно.

Для описания нитей с конечной проводимостью следует пользоваться выражениями:

$$\begin{aligned} A_{0(\parallel)} &= \frac{i}{\pi} \frac{J_0(k_t R)J_0'(kR) - \sqrt{\varepsilon_t} J_0'(k_t R)J_0(kR)}{J_0(k_t R)H_0^{(1)'}(kR) - \sqrt{\varepsilon_t} J_0'(k_t R)H_0^{(1)}(kR)}, \\ A_{0(\perp)} &= \frac{i}{\pi} \frac{J_0(k_t R)J_0'(kR) - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_t}} J_0'(k_t R)J_0(kR)}{J_0(k_t R)H_0^{(1)'}(kR) - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_t}} J_0'(k_t R)H_0^{(1)}(kR)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\varepsilon_t$  – диэлектрическая проницаемость материала нити,  $k_t = \sqrt{\varepsilon_t} k$ ,  $H_0^{(1)}$  – функция Ханкеля нулевого порядка. Выражения (3) могут быть получены из (4) при  $\varepsilon_t \rightarrow \infty$ .

Разница в показателях преломления для волн с разной поляризацией ( $n_{\parallel} \neq n_{\perp}$ ) свидетельствует о том, что система обладает оптической анизотропией (т. е. двулучепреломлением и дихроизмом). Устранить эту анизотропию можно, чередуя положение нитей в фотонном кристалле, т. е. расположив нити в каждом слое ортогонально нитям в предыдущем и последующем слоях.

Излучение Смит – Парселла (дифракционное излучение) возникает при прохождении электронного пучка через фотонный кристалл при выполнении условия

$$\omega - \vec{k}n(k)\vec{v} = \vec{\tau}\vec{v}, \quad (5)$$

где  $\vec{v}$  – скорость электронного пучка,  $\vec{\tau}$  – вектор обратной решетки фотонного кристалла и  $n(k)$  – показатель преломления (см. выражение (1)). Пусть вектор скорости электронного пучка направлен вдоль оси  $OZ$ , тогда (5) можно записать в виде

$$k - \tau_z \beta = k n(k) \beta \cos \theta, \quad (6)$$

где  $\beta = \frac{v}{c}$ , угол между  $\vec{k}$  и скоростью электронного пучка  $\theta$ ,  $\tau_z = \frac{2\pi m_h}{d_z}$ , а  $m_h = 1, 2, \dots$  номер гармоники. Корни этого уравнения определяют спектр частот дифракционного излучения, возникающего при движении электрона в фотонном кристалле.

Согласно [14, 16], дифракционное излучение в металлическом волноводе прямоугольного сечения с сеточным фотонным кристаллом внутри описывается уравнением, подобным (6):

$$\left(\frac{\omega - \tau_z v}{v}\right)^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - (\kappa_{mn}^2 - \eta), \quad (7)$$

где  $\eta$  определяется выражением (2), а собственные значения  $\kappa_{mn}$  определяются поперечными размерами волновода (ширина  $a$  и высота  $b$ ):

$$\kappa_{mn}^2 = \left(\frac{\pi m}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi n}{b}\right)^2. \quad (8)$$

Корни уравнения (7) для  $\frac{\eta}{v_z^2 \beta^2} \ll 1$  можно записать в виде

$$\begin{aligned} \omega_1(m, n) &= \frac{\tau_z v}{1 - \beta^2} \left[ 1 - \beta \sqrt{1 - \frac{(\kappa_{mn}^2 - \eta) (1 - \beta^2)}{\tau_z^2 \beta^2}} \right], \\ \omega_2(m, n) &= \frac{\tau_z v}{1 - \beta^2} \left[ 1 + \beta \sqrt{1 - \frac{(\kappa_{mn}^2 - \eta) (1 - \beta^2)}{\tau_z^2 \beta^2}} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь уместно вспомнить, что  $\tau_z = \frac{2\pi m_h}{d_z}$ , где  $m_h = 1, 2, \dots$  номер гармоники. Из (9) следует, что чем выше номер гармоники, тем выше частота излучения. Например, для электронного пучка с энергией 200 кэВ при  $\theta \sim 20^\circ$  и  $d_z = 1.6$  см частоты излучения, соответствующие первой гармонике ( $m_h = 1$ ), определяются двумя корнями выражения (7) – это 10 ГГц и 40 ГГц соответственно, а для 30-й гармоники ( $m_h = 30$ ) эти частоты: 230 ГГц и 1 ТГц.

### 3. Экспериментальная установка

Сеточный фотонный кристалл был изготовлен из вольфрамовых нитей диаметром 100 мкм, натянутых в волноводе прямоугольного сечения с поперечными размерами  $a = 35$  мм,  $b = 35$  мм и длиной 300 мм (см. рис. 1).

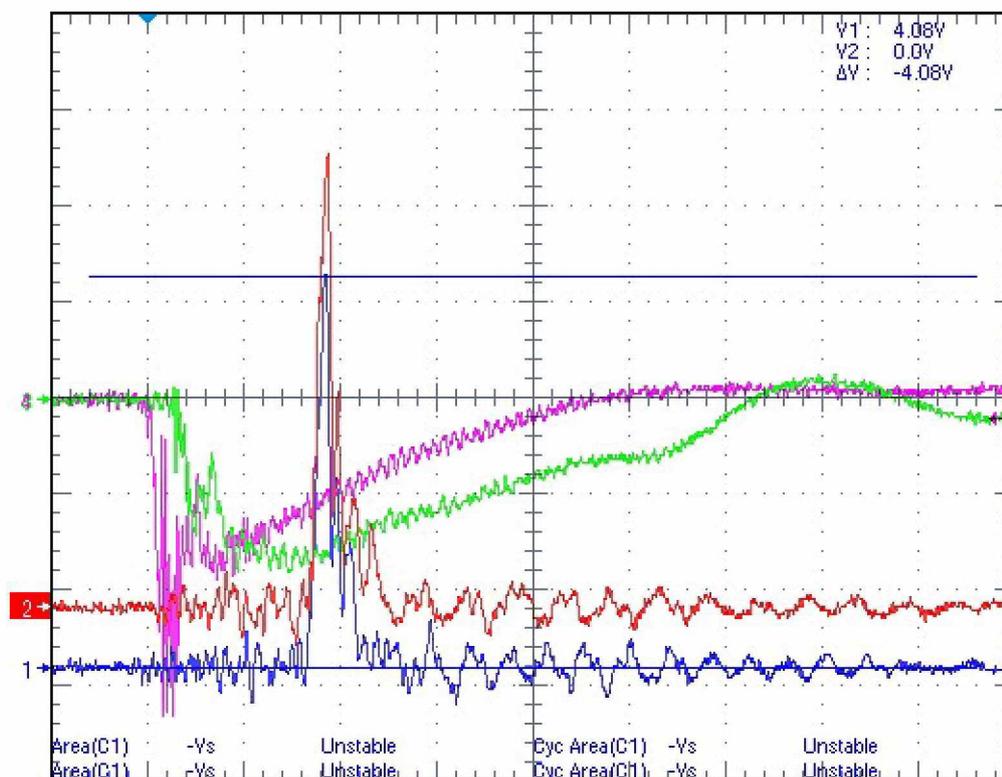


Рис. 2. Пример полученной осциллограммы

Расстояние между нитями в направлении  $OZ$  составляло  $d_z = 12.5$  мм, выбранный период обеспечивал излучение на частоте  $\sim 8.4$  ГГц. Электронный пучок диаметром 32 мм с энергией электронов  $\sim 200$  кэВ и током  $\sim 2$  кА проводился через сеточную структуру в магнитном поле  $\sim 1.55 - 1.6$  Тл.

Сеточная структура была изготовлена в виде отдельных рамок, содержащих 1, 3 или 5 параллельных нитей, отстоящих друг от друга на расстояние  $d_y = 6$  мм. Рамки были соединены таким образом, чтобы создать сеточную структуру с периодом  $d_z$ . Измерения частоты излучения проводились с использованием волноводных фильтров, перестраиваемых в диапазоне 7.8 – 12.4 ГГц с полосой пропускания 0.25 ГГц, 0.5 ГГц и 1 ГГц. Ослабление излучения в полосе непропускания фильтра  $\sim 25$  дБ.

#### 4. Результаты эксперимента

Целью эксперимента было изучение зависимости интенсивности генерируемого излучения от длины фотонного кристалла.

В этом эксперименте максимальная мощность излучения ОЛСЭ для 1 нити в рамке составляет 1.5 кВт, для 3 нитей – 5 кВт и 10 кВт для 5 нитей. Пример осциллограммы, полученной в эксперименте, приведен на рис. 2. Измери-

тельные каналы 1 и 2 использовались для регистрации формы СВЧ импульса в измерительном канале без фильтра (канал 1) и с частотным фильтром (канал 2), канал 3 для регистрации тока пучка и канал 4 напряжения на диоде. Шаг временной шкалы – 80 нс.

По экспериментальным осциллограммам был получен спектр излучения генератора ОЛСЭ, максимум спектра плотности мощности излучения находится в полосе 8.3–8.6 ГГц (рис. 3).

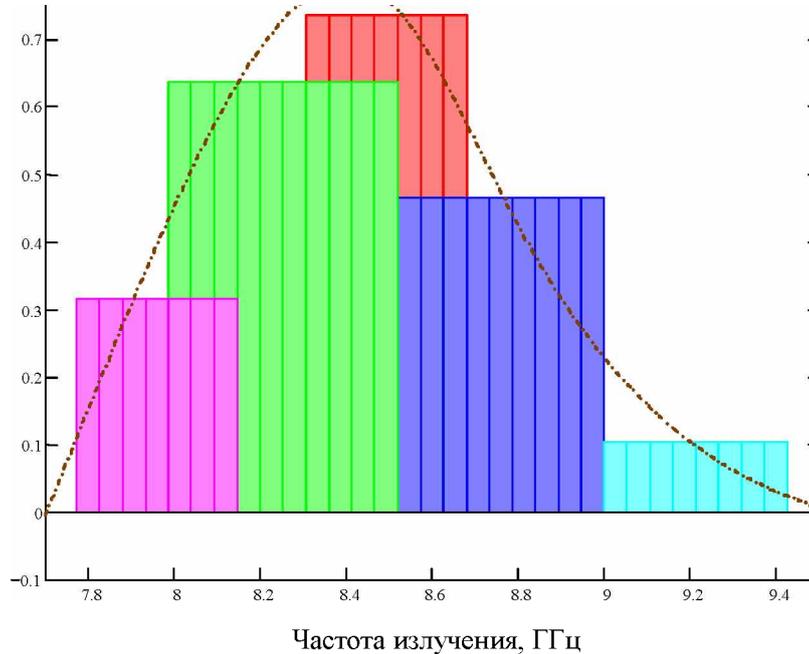


Рис. 3. Частотный спектр излучения ОЛСЭ

В ходе работ была получена зависимость частоты излучения от величины магнитного поля, магнитная перестройка частоты в полосе 8.0–8.9 ГГц. На рис. 4 представлены частотные кривые зависимости пиковой и средней мощности излучения импульса от величины ведущего магнитного поля для двух частотных диапазонов 8.0–8.45 ГГц и 8.45–8.9 ГГц. Максимальная мощность излучения была нормирована на единицу. Характерный минимум в области 1,7 Тл соответствует циклотронному поглощению обратной электромагнитной волны вращающимся электронным пучком.

Были проведены два типа экспериментов для исследования зависимости порога генерации от длины сеточного резонатора.

1. Была исследована зависимость мощности излучения от длины фотонного кристалла для структуры с одной нитью в рамке, равноотстоящей от верхней и нижней стенок волновода (рис. 5). Измерения были проведены для 4, 8, 10 и 24 рамок.

Результаты этих измерений приведены на рис. 6, где мощность излучения нормирована к максимальному значению мощности (1.5 кВт).

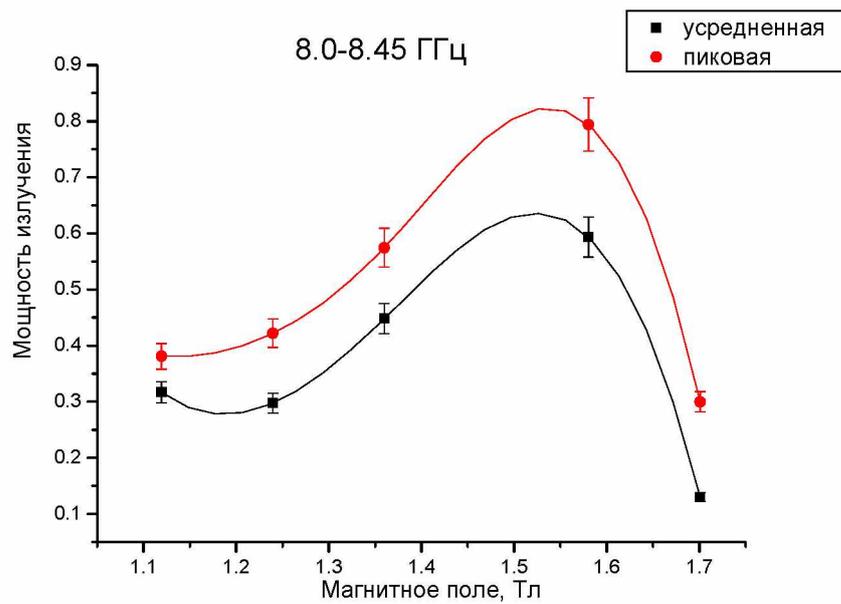
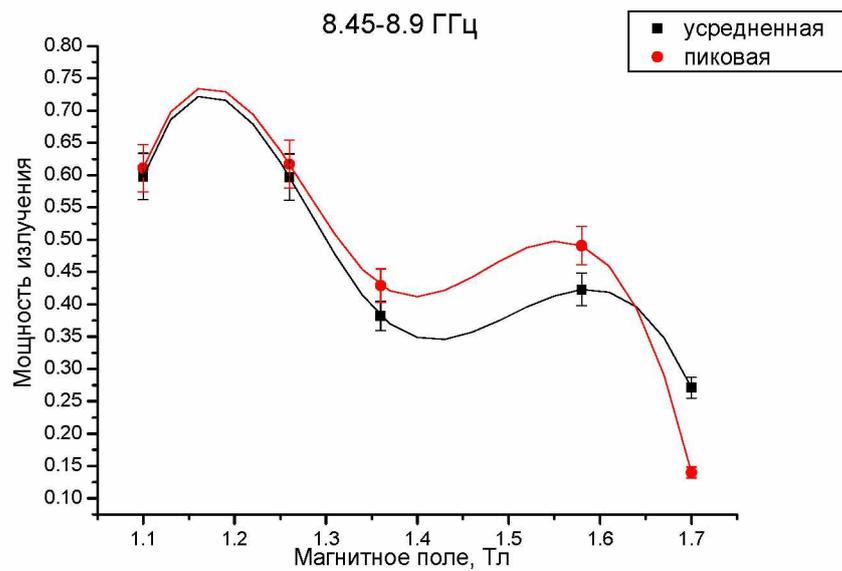


Рис. 4. Магнитная перестройка частоты излучения

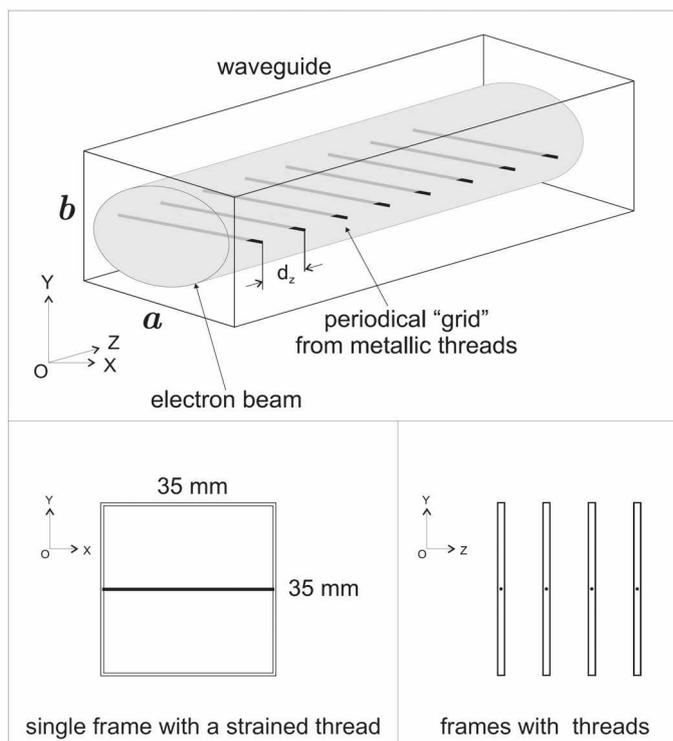


Рис. 5. Фотонный кристалл с одной нитью в рамке, равноотстоящей от верхней и нижней стенок волновода

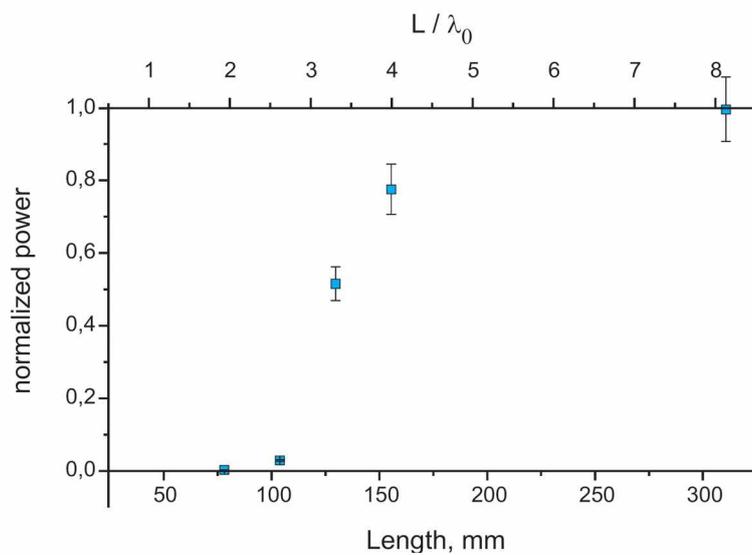


Рис. 6. Зависимость мощности излучения от длины фотонного кристалла с 1 нитью в рамке, верхняя шкала показывает длину кристалла в длинах волн  $L/\lambda_0$ , где  $\lambda_0 = 3.6$  см

2. Была исследована зависимость мощности излучения от длины фотонного кристалла для структуры с пятью нитями в рамке, отстоящими друг от друга на расстоянии  $d_y = 6$  мм (рис. 7). Измерения были проведены для 4, 6, 10, 12, 14 и 22 рамок.

Результаты этих измерений приведены на рис. 8, где мощность излучения нормирована к максимальному измеренному значению мощности (10 кВт). Сплошная кривая на этом рисунке – результат численного моделирования.

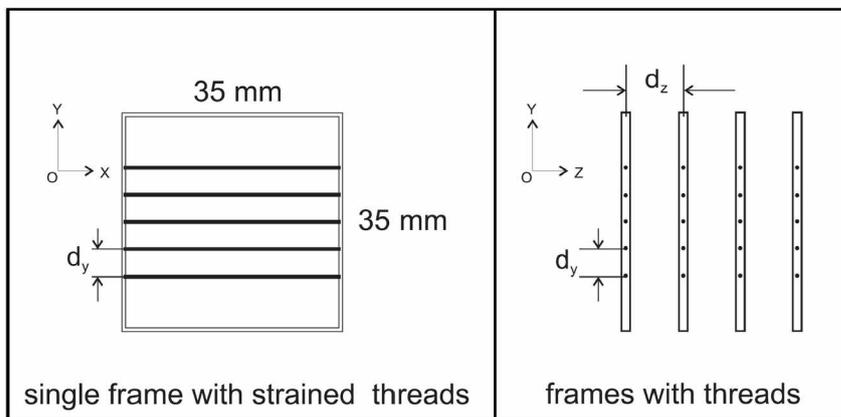


Рис. 7. Фотонный кристалл с пятью нитями в рамке, натянутыми на расстоянии  $d_y = 6$  мм друг от друга

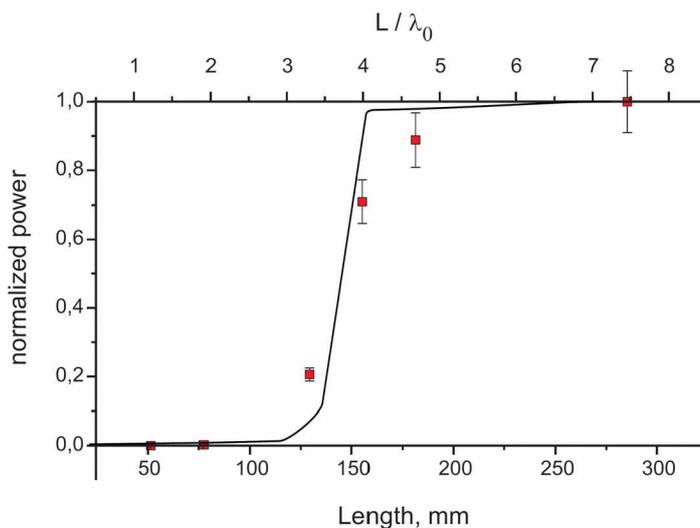


Рис. 8. Экспериментально измеренная зависимость мощности излучения от длины фотонного кристалла с 5 нитями в рамке показана точками и результат моделирования мощности излучения электронного пучка с энергией  $\sim 200$  кэВ и плотностью тока  $\sim 2$  кА/см<sup>2</sup> (сплошная кривая)

## 5. Заключение

Генерация объемного лазера на свободных электронах (ОЛСЭ) с сеточным фотонным кристаллом, созданным из натянутых металлических нитей, была исследована в режиме лампы обратной волны. Исследования порога генерации были проведены для различных сеточных фотонных кристаллов и получена зависимость порога генерации от длины фотонного кристалла. Использование объемных резонаторов описанного типа позволяет ослабить требования на форму электронного пучка и точность его проводки, поскольку в данной системе электронный пучок проходит непосредственно сквозь фотонный кристалл.

## Литература

1. *Granatstein V. L., Parker R. K., Armstrong C. M.* // Proc. IEEE. 1999. Vol. 87. P. 5.
2. *Болотовский Б. М., Воскресенский Г. В.* // УФН. 1966. Vol. 88. P. 209.
3. *Kompfner R.* // Wireless World. 1946. Vol. 52. P. 369.
4. *Pierce R.* // Proc. IRE. 1947. Vol. 35. P. 111.
5. *Smith S. J., Purcell E. M.* // Phys. Rev. 1953. Vol. 92. P. 1069.
6. *Salisbury W. W.* // US Patent. 1953. 2,634,372; J. Opt. Soc. Am. 1970. Vol. 60. P. 1279.
7. *Doucas G., Mulvey J. H. et al.* // Phys.Rev.Lett. 1992. Vol. 69. P. 1761; *Walsh J. E.* // US Patent 1996. 5,790,585.
8. *Baryshevsky V. G.* // NIM. A. 2000. Vol. 445. P. 281; LANL e-print archive physics/9806039.
9. *Baryshevsky V. G., Batrakov K. G. et al.* // NIM A. 2002. Vol. 483. P. 21.
10. *Baryshevsky V. G., Batrakov K. G. et al.* // NIM A. 2003. Vol. 507. P. 137.
11. *Baryshevsky V. G. et al.* // Eurasian Patent no. 004665.
12. *Baryshevsky V. G., Feranchuk I. D.* // Phys.Lett. A. 1984. 141.
13. *Baryshevsky V. G., Batrakov K. G. et al.* // NIM A. 1997. 71.
14. *Baryshevsky V. G., Gurinovich A. A.* // LANL e-print archive: physics/0409107.
15. *Baryshevsky V. G., Batrakov K. G. et al.* // LANL e-print archive physics/0409125.
16. *Baryshevsky V. G., Gurinovich A. A.* // NIM B. 2006. Vol. 252. P. 92.
17. *Pokrovsky A. L., Efros A. L.* // Phys. Rev. B. 2002. Vol. 65. P. 045110.
18. *Pokrovsky A. L.* // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 69. P. 195108.
19. *Smirnova E. I., Chen C. et al.* // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 91(3). P. 960.
20. *Smirnova E. I., Chen C.* // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 93(10). P. 5859.
21. *James R. W.* The Optical Principles of Diffraction of X-Rays. 1982.
22. *Chang Shih-Lin.* Multiple diffraction of x-rays in crystals. 1984.
23. *Nikolsky V. V.* Electrodynamics and propagation of radio-wave. 1978.

## EXPERIMENTAL STUDY OF A VOLUME FREE ELECTRON LASER WITH A "GRID" RESONATOR

**V. G. Baryshevsky, N. A. Belous, A. A. Gurinovich, V. A. Evdokimov,  
A. S. Lobko, P. V. Molchanov, A. V. Oskin, V. I. Stolyarsky**

Operation of Volume Free Electron Laser with a "grid" photonic crystal, built from periodically strained metallic threads, was studied in the backward wave regime. Generation threshold was observed for different "grid" photonic crystals. Dependence of the generation threshold on the resonator length was investigated.