

ПЕРВОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ГЕНЕРАЦИИ В ОБЪЕМНОМ ЛАЗЕРЕ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

**В. Г. Барышевский, К. Г. Батраков, А. А. Гуринович,
И. И. Ильенко, А. С. Лобко, В. И. Мороз,
П. Ф. Софронов, В. И. Столярский**

Одним из известных элементов лазеров на свободных электронах (ЛСЭ), а также других типов генераторов является обратная связь, которая создается системой зеркал, или распределенная обратная связь, образуемая дифракцией волн в пространственно-периодической среде, при которых прямая и отраженная волны направлены вдоль одной прямой. Отличительной чертой объемного ЛСЭ (ОЛСЭ) является наличие неоднородной многоволновой объемной распределенной обратной связи (ОРОС). ОРОС одновременно выполняет две функции:

- обеспечивает более эффективную связь электромагнитной волны с электронным пучком за счет изменения закона дисперсии;
- является объемным распределенным зеркалом, удерживающим излучение в пространстве взаимодействия.

Впервые на возможность существенного изменения характера развития неустойчивости при движении электронного пучка в пространственно-периодической среде было указано в работах [1, 2]. В них получены и исследованы дисперсионные уравнения в условиях многоволновой дифракции и показано, что в области вырождения дифракционных корней возникает новый закон развития пучковой неустойчивости, резко изменяющий законы усиления и генерации электромагнитного излучения. В [1, 2] этот вывод был сделан на основании того, что инкремент неустойчивости в точке s -кратного вырождения корней пропорционален $\rho^{1/(3+s)}$, где ρ – плотность электронного пучка, и отличается от соответствующего инкремента для одноволновой системы $\rho^{1/3}$ (в данном случае считается, что точка, в которой совпадают n корней, является $n-1$ вырожденной). В работе [3] было показано, что этот вывод справедлив и при движении пучка в вакууме, вблизи периодической среды (или в вакуумной щели, созданной внутри периодической среды). В дальнейшем были найдены явные выражения для зависимости стартового тока от длины области взаимодействия в этих точках, эти результаты были впервые опубликованы в [4, 5]. Действие ОРОС универсально, и ее преимущества проявляются в широком диапазоне длин волн, от сантиметровых до рентгеновских [4–7]. В работе [7] для миллиметрового диапазона приведены данные по «холодному» моделированию электродинамических процессов в объемной дифракционной решетке. Было экспериментально подтверждено существование области, соответствующей чрезвычайно большой добротности системы в условиях возникновения двух сильных волн.

В настоящей работе представлены первые результаты генерации излучения ОЛСЭ в миллиметровом диапазоне. В исследуемом ОЛСЭ нерелятивистский

пучок движется в структуре, включающей в себя две плоские дифракционные решетки с разными пространственными периодами. Одна из решеток служит для генерации излучения за счет смит-парселловского механизма [8]. Вторая решетка создает распределенную обратную связь за счет брэгговской дифракции. Отметим, что генерация в стандартной нерелятивистской лампе бегущей волны с брэгговской связью на основной гармонике невозможна, так как длина излучаемой волны значительно превосходит период спирали (или гофрировки). Генерация в ОЛСЭ рассматриваемого типа впервые предложена в [9], где представлена теоретическая модель ее работы.

Основным функциональным элементом исследуемого ОЛСЭ является резонатор, образованный двумя латунными плоскими гофрированными дифракционными решетками и боковыми стенками. Поперечное сечение резонатора прямоугольное, постоянное по всей его длине. Размеры поперечного сечения могли изменяться в ходе экспериментов. Вывод излучения производился с выходных кромок элементов резонатора. Со стороны входа электронного пучка на решетках выполнены элементы отсечки волны в виде гладких плоских, прямоугольных в плане брусков.

Как было указано выше, дифракционные решетки, установленные в резонаторе, выполняли различные функции и имели различное исполнение. Взаимодействие одной из решеток (возбуждающей) с пучком приводило к генерации излучения Смит – Парселла. Другая решетка (резонансная) обеспечивала положительную распределенную обратную связь генерируемого излучения с пучком. Для обеспечения эффективной связи возбуждающей решетки с пучком расстояние между поверхностью возбуждающей решетки и пучком могло изменяться в процессе эксперимента вплоть до ввода возбуждающей решетки в пучок. Резонансные дифракционные решетки изготовлены таким образом, что они позволяют изменять частоту излучения за счет изменения ориентации штриха решетки относительно направления скорости пучка.

Исследования процессов генерации излучения выполнялись на экспериментальном стенде, функциональная схема которого изображена на рис. 1.

Ленточный электронный пучок, эмитируемый термоэлектронным катодом (вольфрам, активированный иридами бария, кальция), формируемый в цилиндрической пушке Пирса, распространяется в резонаторе лазера в ведущем магнитном поле напряженностью ~ 3 кГс. Режим эмиссии пучка – импульсный, однополярный, форма импульса – синусоида с периодом 10 мс. Могла создаваться последовательность из двух или трех импульсов напряжения. Амплитуда импульсов напряжения могла изменяться в диапазоне от одного до 10 кэВ.

Генерируемое излучение выводится через вакуумноплотное радиопрозрачное окно (оргстекло) на детектор излучения (термисторный детектор М5-50 или измеритель мощности М3-22А) с шириной полосы детектируемого излучения 54–78 ГГц.

Системой измерения обеспечивались синхронная регистрация и последующий вывод осциллограммы на дисплей персонального компьютера и запись на диск следующих параметров: напряжение на катоде пушки, полный ток в цепи пушки, ток в обмотках магнита ведущего магнитного поля, ток осаждения электронов пучка на решетку возбуждения, сигнал с детектора СВЧ-излучения.

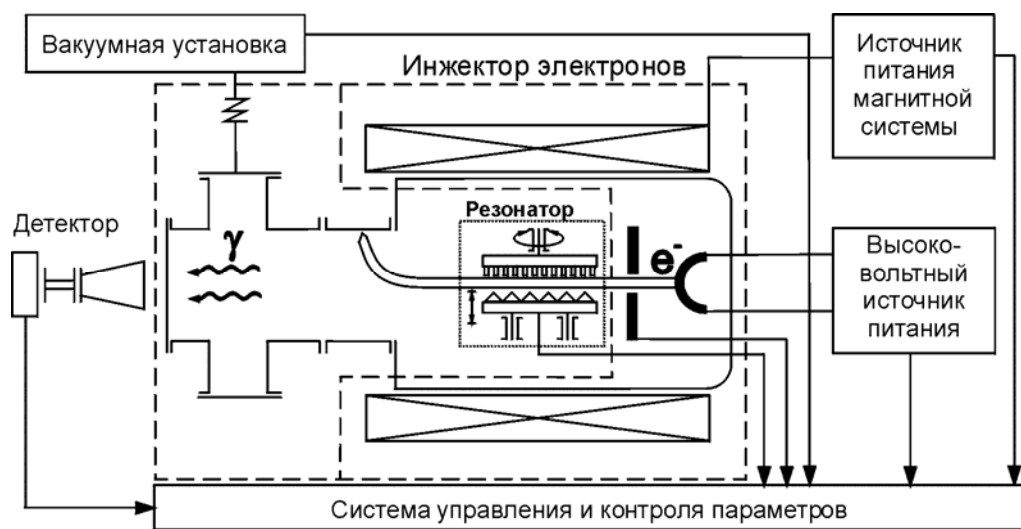


Рис. 1. Блок-схема экспериментального стенда по изучению процессов генерации в ОЛСЭ

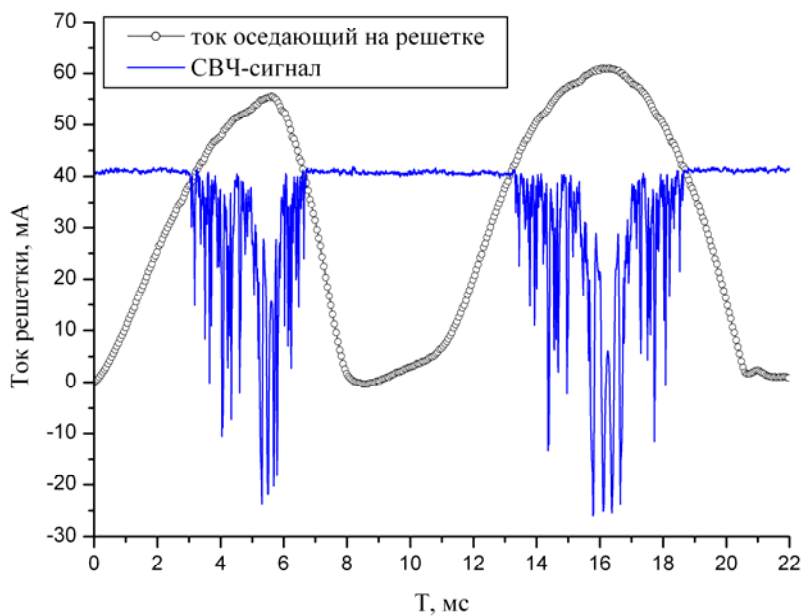


Рис. 2. Осциллограмма экспериментального наблюдения генерации ОЛСЭ. Плавная кривая характеризует изменения тока, кривая с мелкомасштабными изменениями характеризует наблюдаемый СВЧ-импульс

В результате проведенных исследований была зарегистрирована генерация СВЧ-излучения при энергии пучка ≥ 5 кВ и следующих параметрах резонатора: длина резонатора – 100 мм; шаг дифракционной решетки возбуждения – 0,67 мм; шаг резонансной магнитной системы проводки электронного пучка дифракционной решетки – 3 мм; осциллограмма процесса приведена на рис. 2.

Непрерывная генерация излучения наблюдалась в диапазоне токов в цепи пушки начиная от ~ 35 мА. Для определения пороговых условий и характера генерации при заданной форме импульса напряжения уменьшался ток пучка путем уменьшения тока накала катода. Осциллограмма порогового режима генерации приведена на рис. 3. В таком режиме пики излучения соответствовали минимальному значению тока на решетке ~ 35 мА при напряжении $U \sim 5$ кВ.

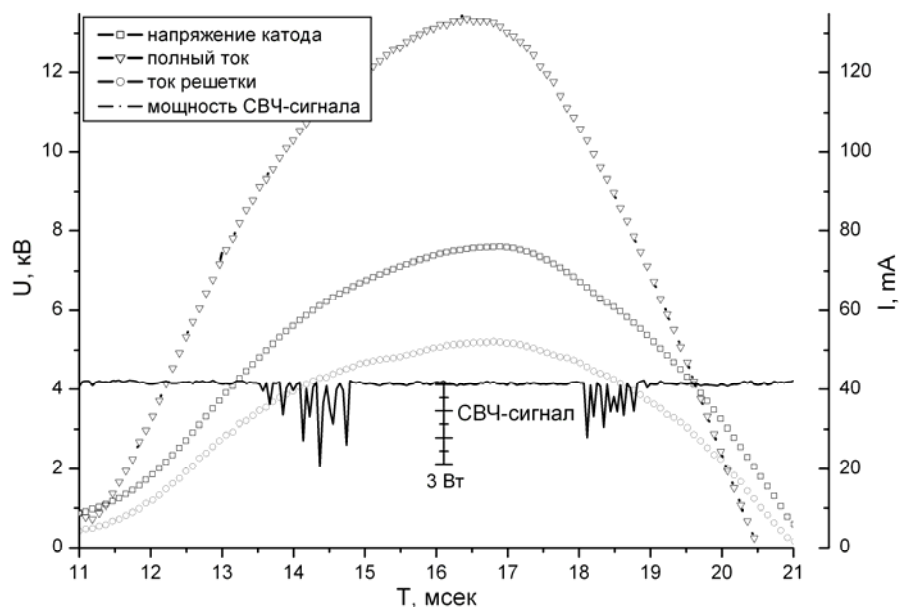


Рис. 3. Осциллограмма порогового режима генерации

Начало процесса генерации с энергии электронного пучка ~ 5 кВ объясняется выбором шага дифракционных решеток. В результате при этих энергиях электронного пучка возбуждается наиболее высокодобротная мода. Именно поэтому при приближении тока к пороговым значениям область генерации сдвигается в узкую полосу вблизи 5 кВ. При больших значениях тока процесс развивается в области энергий 5–7,5 кВ, что может свидетельствовать о возбуждении следующих мод с меньшей добротностью, для которых рабочий ток превышает стартовый. В ряде экспериментов наблюдался световой импульс из зоны генерации.

Мощность импульса генерируемого излучения составляет 3–4 Вт. Учитывая тот факт, что электронный пучок имеет поперечный размер ~ 1 мм и в

процессе с электромагнитной волной эффективно участвует меньше его десятой части ($\delta \sim \frac{\lambda u}{4\pi c} < 0,1$ мм), КПД «работающей» части пучка составляет $\sim 10\%$.

Литература

1. Барышевский В. Г., Феранчук И. Д. // Вести АН БССР. Сер. физ.-мат. 1985, № 2. С. 79.
2. Baryshevsky, Feranchuk I. D. // Phys. Lett. 1984. Vol. A102. P. 141.
3. Барышевский В. Г. // Докл. АН СССР. 1988. Т. 299, № 6. С. 19.
4. Baryshevsky V. G., Batrakov K. G., Dubovskaya I. Ya. // J. Phys. D. 1991. Vol. 24. P. 1250.
5. Барышевский В. Г., Батраков К. Г., Дубовская И. Я. // Вести АН БССР. Сер. физ.-тех. 1992, № 3. С. 99.
6. Baryshevsky V. G. // Nucl. Instrum. Meth. 2000. Vol. A445. P. 281.
7. Baryshevsky V. G., Batrakov K. G., Dubovskaya I. Ya. et al. // Nucl. Instrum. Meth. 1997. Vol. A393. P. 71.
8. Smith S. L., Purcell E. M. // Phys. Rev. 1953. Vol. 91. P. 1069.
9. Baryshevsky V. G., Batrakov K. G., Stolyarsky V. I. // Proc. of the 21th Intern. FEL Conf. 1999. P. II-37.

THE FIRST LASING OF VOLUME FREE ELECTRON LASER

**V. G. Baryshevsky, K. G. Batrakov, A. A. Gurinovich, I. I. Pienko,
A. S. Lobko, V. I. Moroz, P. F. Sofronov, V. I. Stolyarsky**

First lasing of volume free electron laser (VFEL) is observed. The generating system consists of two metal diffraction grating with different spatial periods. The first grating creates the conditions for Smith Purcell emission mechanism. The second grating provides the distributed feedback for emitted wave. The length of diffraction grating is 10 cm. Voltage impulse with a time duration ~ 10 ns had a sinusoidal form with the amplitude varied from 1 to ~ 10 kV. The measured microwave power reached the value of about 3–4 Wt in wavelength range $\lambda \sim 4$ mm. The peak current varied from 100 to 35 mA. The generation stopped at current value < 35 mA. When the current value was near the threshold current the generation was observed in narrow region of voltage $V \sim 5$ kV that coincided with theoretical prediction. At greater currents the generation took place in continuous range of voltage from 5 to 7.5 kV.