

ЛАЗЕРЫ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

ОБЪЕМНЫЕ ЛАЗЕРЫ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

В. Г. Барышевский

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ – устройства, в которых релятивистские пучки электронов генерируют когерентное электромагнитное излучение) представляют собой чрезвычайно важное и активно развивающееся направление науки и техники. В настоящее время осуществлена генерация излучения в самых различных диапазонах длин волн: начиная от сантиметровых и кончая оптическими. Осуществляется проект рентгеновского ЛСЭ.

Независимо от типа ЛСЭ в основе его работы лежат два важнейших физических явления – явление индуцированного излучения и явление возникновения под влиянием излучения периодической модуляции (бунчировки) плотности электронного пучка (явление пучковой неустойчивости). Генерация в ЛСЭ возбуждается различными механизмами спонтанного излучения: магнитотормозным излучением в ондуляторе, излучением Смит – Парсела и Черенкова, излучением в лазерной волне. Но независимо от того, какой именно вид спонтанного излучения применяется в конкретном ЛСЭ, все приборы этого типа используют обратную связь, создаваемую или двумя параллельными зеркалами, расположенными на краях рабочей области, или одномерной дифракционной решеткой, в которой испускаемая и дифрагированная (отраженная) волны распространяются вдоль электронного пучка (одномерная распределенная обратная связь).

Хорошо известно, что любая излучающая система характеризуется ее спектром собственных колебаний и так называемым дисперсионным уравнением, описывающим в случае малых возмущений (линейный режим) возможные типы волн в системе и связь между частотой и волновым числом собственных колебаний системы. В случае ЛСЭ такое дисперсионное уравнение показывает, что в системе существуют связанные между собой электромагнитные волны и так называемые продольные волны электронной плотности. Тщательный анализ свойств этого дисперсионного уравнения показал [1], что дисперсионное уравнение для ЛСЭ в коллективном режиме совпадает с дисперсионным уравнением обычного усилителя бегущей волны [2] и коэффициент усиления ЛСЭ (инкремент неустойчивости электронного пучка) в условиях синхронизма волн пропорционален $\rho_0^{1/3}$, где ρ_0 – плотность электронного пучка.

В работе [3] было показано, что при движении релятивистского пучка электронов через кристалл (среду, обладающую пространственно-периодической диэлектрической проницаемостью) возможно выполнение условий, при которых появляется новая физическая закономерность, а именно: инкремент неустойчивости электронного пучка оказывается пропорциональным не $\rho_0^{1/3}$, а $\rho_0^{1/S+3}$, где

S – число возникающих в результате брэгговской дифракции в решетке излучаемых электромагнитных волн, а ρ_0 – плотность электронного пучка.

Указанная новая физическая закономерность позволила резко снизить плотности тока электронных пучков, необходимые для достижения порога генерации в рентгеновском лазере, что ранее представлялось совершенно невозможным. Следующий принципиально важный шаг был сделан в работе [4], в которой было показано, что эта новая физическая закономерность имеет место и при движении пучка в щели (в вакууме), созданной в дифракционной решетке на пути движения электронного пучка. Это обстоятельство сразу сняло все проблемы, связанные с многократным рассеянием электронов в веществе решетки, и перевело проблему создания генераторов когерентного электромагнитного излучения от сантиметрового до рентгеновского на основе новой физической закономерности (названных нами объемными лазерами на свободных электронах) в практическую плоскость.

В настоящее время объемные лазеры на свободных электронах (ОЛСЭ) являются чрезвычайно перспективной разновидностью ЛСЭ, способной обеспечить излучение в широкой области спектра, от сантиметрового до рентгеновского (см. [5–7]). Отличительной особенностью ОЛСЭ является использование в качестве объемных резонаторов одно-, двух- и трехмерных дифракционных решеток, обеспечивающих объемную распределенную обратную связь и, как следствие, возможность плавной перестройки частоты. Важно подчеркнуть, что даже одномерная дифракционная решетка может обеспечивать объемную (не одномерную) обратную связь, если угол брэгговской дифракции $\neq \frac{\pi}{2}$. Это приводит

к значительному изменению пороговых условий, и, при определенных условиях, ОЛСЭ обеспечивает более эффективный процесс излучения, чем обычный ЛСЭ, использующий одномерную распределенную обратную связь. Более того, благодаря возможности использования широких электронных пучков и дифракционных решеток больших объемов ОЛСЭ позволяет получать на многие порядки большие мощности излучения при существенно меньших размерах, чем обычные ЛСЭ.

Фактически на основе идеи создания ОЛСЭ возникает в настоящее время новая ветвь СВЧ, оптической и рентгеновской лазерной техники, позволяющая создавать генераторы, обеспечивающие плавную перестройку частоты в широкой области спектра и высокую мощность излучения. Первый ОЛСЭ начал работать в НИИ ЯП 20 апреля 2001 г. (см. статьи в данном сборнике).

Литература

1. Gover A., Livni Z. // Opt. Commun. 1978. Vol. 26. P. 375.
2. Pierci J. R. Travelling wave tubes. Princeton: Van Nostrand, 1950.
3. Baryshevsky V. G., Feranchuk I. D. // Phys. Lett. A. 1984. Vol. 102. P. 141.
4. Барышевский В. Г. // Докл. АН СССР. 1988. Т. 299, № 6. С. 1363.
5. Baryshevsky V. G., Batrakov K. G., Dubovskaya I. Ya. // J. Phys. D. 1991. Vol. 24. P. 1250.
6. Baryshevsky V. G., Batrakov K. G., Dubovskaya I. Ya. // Nucl. Instr. Meth. 1995. Vol. 358. P. 493.
7. Baryshevsky V. G. // LANL e-print archive physics/9806039.

VOLUME FREE ELECTRON LASERS

V. G. Baryshevsky

Free electron lasers (devices in which relativistic electron beam generates coherent electromagnetic radiation) take on special significance and are being developed actively worldwide. By now lasing is obtained in different wavelength ranges: from centimeter to visible. X-ray FEL is being developed.

Irrespective of the FEL type its work is based on two major physical phenomena: phenomenon of stimulated radiation and phenomenon of beam instability (i.e. appearance of periodic modulation of electron beam density under the action of radiation). FEL lasing is aroused by different types of spontaneous radiation, viz: magnetic bremsstrahlung in undulator, Smith-Purcell or Cherenkov radiation and so on. But regardless of type of spontaneous radiation applied for certain FEL lasing, all these devices use feedback, which is formed either by two parallel mirrors placed on the both sides of working area or by one-dimensional diffraction grating, in which incident and diffracted (reflected) waves move along electron beam (one-dimensional distributed feedback).

It is well known that each radiative system is defined by its natural oscillations spectrum and by the so-called dispersion equation, which in the case of small perturbations (linear regime) describes possible types of waves in system and relation between frequency and wave number of natural oscillations of system. In case of FEL this dispersion equation shows that tied electromagnetic waves and the so-called longitudinal waves of electron density exist in system. Thorough analysis of properties of this dispersion equation was done in [1]. It was shown there that:

- dispersion equation for FEL in collective regime coincides with that for conventional travelling wave tube amplifier (TWT) [2];
- FEL gain (increment of electron beam instability) in conditions of waves synchronism is proportional to $\rho_0^{1/3}$, where ρ_0 is the electron beam density.

When an electron beam moves through a crystal (medium possessing spatially periodic permittivity) specific conditions can be fulfilled and new physical law appears [3]. According to this new law increment of electron beam instability is proportional to $\rho_0^{1/(S+3)}$ instead of $\rho_0^{1/3}$, where ρ_0 is the electron beam density and S is the number of waves ensuing from Bragg diffraction in grating.

This new physical law allows significant reducing of current density of electron beam necessary for achievement of generation threshold in X-ray FEL that have been seemed to be absolutely impossible before. The next fundamentally important step was done in [4]. It was shown there that the mentioned new physical law also exists when electron beam moves in a slit (in a vacuum) made in diffraction grating along the electron beam path. Thus all the problems evoked by multiple scattering of electrons in the grating matter were right off removed. So generators of coherent electromagnetic radiation on the basis of this new law become realizable. We call them volume free electron lasers (VFEL).

At present time volume free electron laser is an extremely perspective type of FEL capable to provide lasing in wide spectral range from centimeter to X-ray (see [5–7]). Using of one-, two- or three-dimensional diffraction grating as a volume resonator is a distinctive feature of VFEL. Volume resonators provide volume distributed feedback and, hence, possibility of smooth frequency tuning.

It is important to emphasize that even one-dimensional diffraction grating can produce volume (non one-dimensional) feedback if Bragg diffraction angle $\neq \frac{\pi}{2}$. Availability of volume distributed feedback results in significant change of threshold conditions and in certain case VFEL provides more effective lasing than conventional FEL using one-dimensional distributed feedback. Moreover, due to possibility of use of wide electron beams and large diffraction gratings VFEL allows obtaining of much higher radiation power at significantly less size.

Actually, new branch of microwave, optic and X-ray laser technics appears now on the base of VFEL idea. It allows to develop generators providing smooth frequency tuning and high power of radiation in wide spectral range. First lasing of volume free electron laser was obtained on the 20th of April 2001 in INP.