

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПРОСТРАНСТВЕННО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ – I

История исследований



Светлана Сытова
Институт ядерных проблем
Белгосуниверситета
sytova@inp.bsu.by

Содержание

1. Что такое вакуумные электронные приборы
2. Лампы бегущей волны и лампы обратной волны
3. Замедляющие системы – пространственно-периодические среды
4. Черенковские генераторы и многоволновые черенковские генераторы
5. Приложения вакуумных электронных приборов
6. Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ)
7. Фотонные кристаллы и фотонные ЛСЭ
8. Многопучковые ЛСЭ
9. Мазеры на свободных электронах
10. Основные уравнения
11. Динамические системы и хаос
12. Динамическая дифракция
13. Новый закон неустойчивости электронного пучка, движущегося в пространственно-периодической среде
14. Объемный лазер на свободных электронах (ОЛСЭ)
15. История экспериментов ОЛСЭ
16. Многопучковые ОЛСЭ
17. Основные публикации

Цель – сделать обзор истории исследования процессов излучения пучков заряженных частиц при прохождении пространственно-периодических структур в рамках различных вакуумных электронных приборах, а также основных принципов их функционирования.

Что такое вакуумные электронные приборы

Limiting Stable Current in Electron Beams in the Presence of Ions*

J. R. PIERCE

Bell Telephone Laboratories, Inc., New York, New York

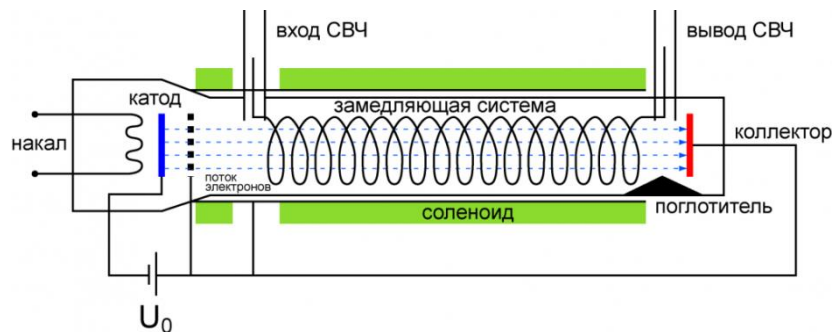
(Received July 11, 1944)

***Journal of Applied Physics 15, 721 (1944)**

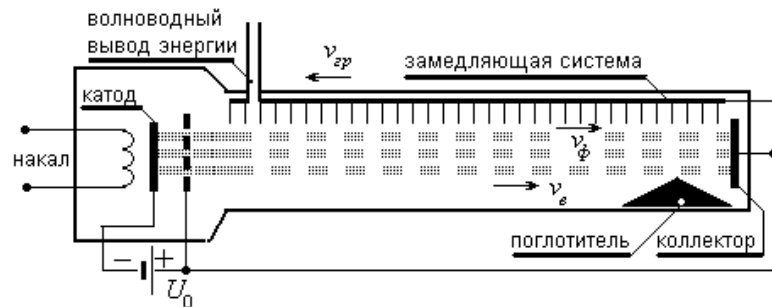
In electron flow, the net electronic charge may be neutralized by positive ions. In this case, for a given geometry there is a limiting current beyond which homogeneous flow is unstable. This limiting current is evaluated for flow normal to parallel plane equipotentials and for flow filling a conducting tube and constrained to motion parallel to the axis. For parallel planes at a potential V_0 volts and spaced a distance L cm apart, the limiting current density in amperes/cm² is $i_0 = 104 \times 10^{-8} V_0^{3/2} / L^2$. For a long conducting tube the limiting current is $I_0 = 160 \times 10^{-8} V_0^{3/2}$. These limiting currents are roughly 6 times as great as in the absence of ions.

Начиная с сороковых годов двадцатого века исследования в области нелинейных процессов излучения заряженных частиц при их прохождении пространственно-периодических структур (резонаторов) и взаимодействии там с электромагнитным полем ведутся в различных типах электронных вакуумных приборов (усилителей и генераторов). Такие приборы функционируют в широком диапазоне спектра от микроволнового до рентгеновского. Их производительность и надежность в настоящее время обеспечивается использованием сложных электромагнитных структур на основе новых материалов и передовых технологий. Широкое применение таких приборов в военных и коммерческих приложениях требует их надежной работы при высокой мощности, высокой эффективности и низкой стоимости.

Лампы бегущей волны и лампы обратной волны



R. Kompfner. The traveling wave tube. Wireless World LII. 1946. P. 369–372.

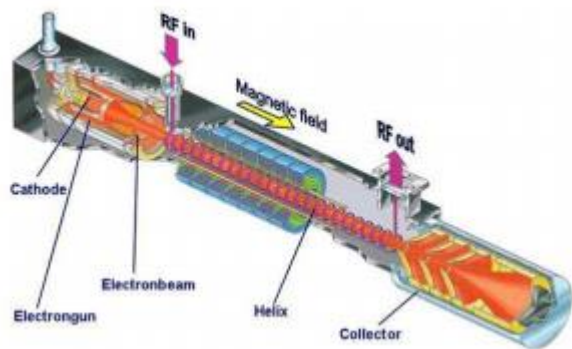


Patent FR1035379 (A) : B. Epsztein, "Backward flow travelling wave devices", 1959-03-31

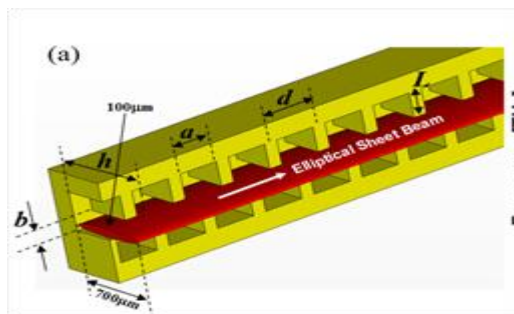
Основа функционирования таких приборов заключается в излучении электронов, сгруппированных в сгустки и взаимодействующих в резонаторе (замедляющей системе) с медленными электромагнитными волнами.

Отличие лампы бегущей волны (ЛБВ) от лампы обратной волны (ЛОВ) состоит в том, что в первом случае электроны пучка взаимодействуют с «прямой» электромагнитной волной, распространяющейся в направлении движения электронов.

Лампы бегущей волны – современные примеры



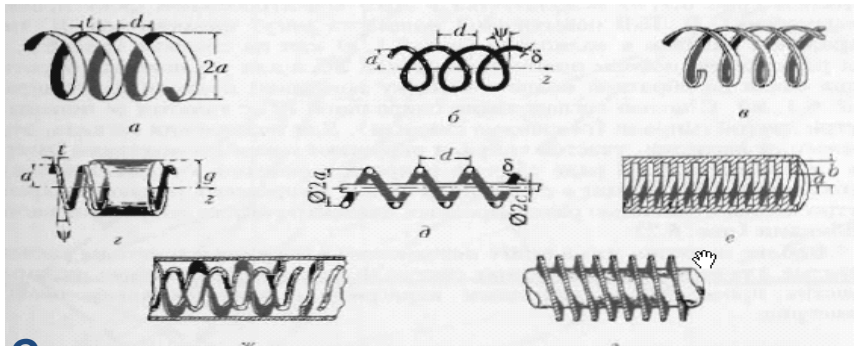
A. Aïssi, F. André, F. Doveil. New model of a travelling-wave tube. Proc. 35th EPS Conf. on Plasma Physics, 9–13 June, 2008. P. 5.090.



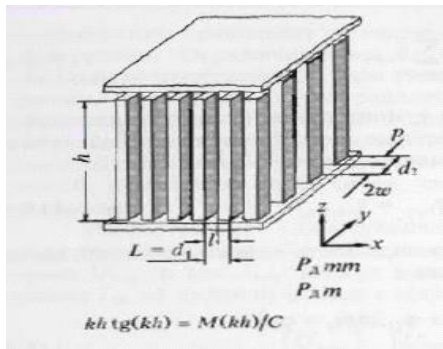
Концептуальный чертеж ЛБВ - TWTA 220 ГГц, включая секцию электронной пушки, ответвители ввода / вывода, узел фокусировки и коллектор

Young-Min, S., et al., Modeling Investigation of an Ultrawideband Terahertz Sheet Beam Traveling-Wave Tube Amplifier Circuit. Electron Devices, IEEE Transactions on, 2011. 58(9): p. 3213-3218.

Замедляющие системы – пространственно-периодические среды*

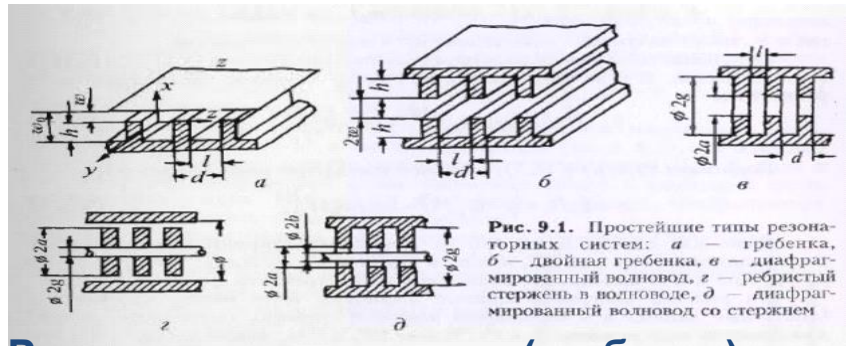


Спиральные замедляющие системы



Штыревые и щелевые системы

* Р. А. Силин. Периодические волноводы. 2002



Резонаторные системы (гребенки)

В.А. Солнцев. Карсинотрод: Патент на изобретение СССР №2121194RU2121194С1.Б.И. №30. Оpubл. 27.10.1998г.

(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, 04.09.1996
(45) Опубликовано: 10.08.2007 Бюл. № 22

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

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

(72) Автор(ы):
Тагер Александр Семенович (RU),
Зелина Елена Аристарховна (RU),
Победоносцев 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 электротехники



S U 1 8 4 0 6 4

Черенковские генераторы

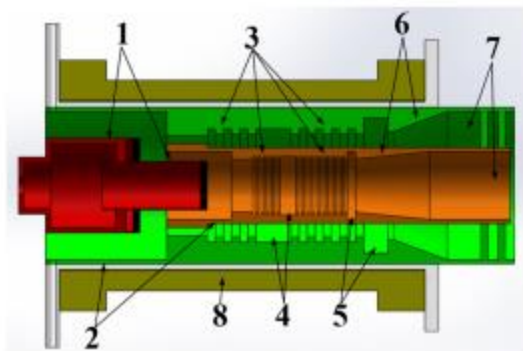
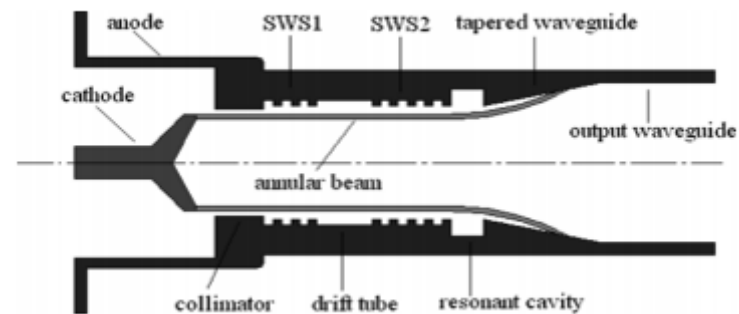


FIG. 1. Schematic diagram: 1-coaxial double-annular cathode, 2-anode, 3-SWSs, 4-drift cavity, 5-resonant cavity, 6-taper, 7-output waveguide, 8-guiding magnetic field.

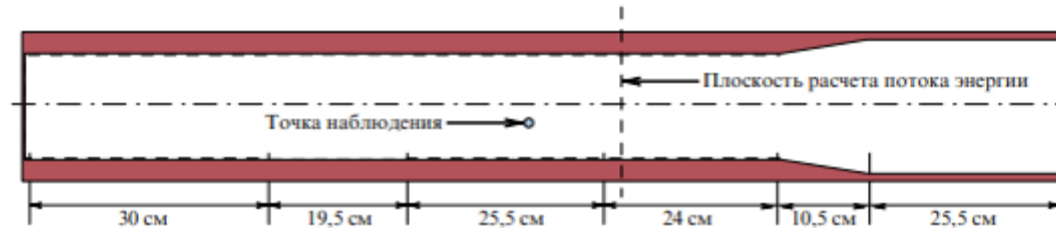
Zhang, P., Ge, X., Dang, F., Huang, C., Zhao, C., Cheng, X., ... Ling, J. (2019). *Investigation of a cross-band relativistic Cherenkov oscillator based on the cathode adjustment*. *AIP Advances*, 9(3), 035110.
doi:10.1063/1.5086190



J. Zhang, H.-H. Zhong, L. Luo. A Novel Overmoded Slow-Wave High-Power Microwave (HPM) Generator. IEEE Transactions on Plasma Science. 2004. Vol. 32. P. 2236–2242.

В указанных выше приборах обычно используются тонкие ленточные или трубчатые электронные пучки, и только поверхностная часть такого пучка взаимодействует с резонатором.

Многоволновые черенковские генераторы*



Кольцевой пучок возбуждает поверхностные волны в сверхразмерном цилиндрическом диафрагмированном волноводе. В системе распространяются прямая и обратная связанные электромагнитные волны вблизи границы полосы прозрачности. Они в результате взаимодействия с пучком возбуждают несколько мод.

Напряжение на диоде - 1,5-2МВ. Ток - 10-20 кА. Напряженность ведущего магнитного поля - 15-30 кЭ. Выходная мощность - 15 ГВт, длина волны 3 см. Электронный КПД - до 50%.

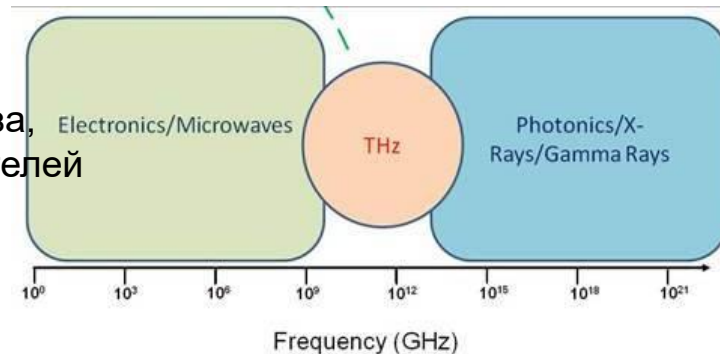
*С. П. Бугаев и др. Релятивистский многоволновой черенковский генератор. Письма в ЖТФ. 1983. Т.9, 1385–1389.

С. П. Бугаев и др. Релятивистские многоволновые СВЧ-генераторы. 1991. 296 с.

S. Ting, Y. Liu. Particle simulation of a millimeter wave multiwave Cherenkov generator producing GigaWatt power levels. Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1998. Vol. 19. P. 385–397.

Приложения вакуумных электронных приборов*:

- ускорители частиц высоких энергий,
- нагрев плазмы для управляемого термоядерного синтеза,
- в медицинских системах в качестве компактных ускорителей ядерного магнитного резонанса
- медицинская визуализация / диагностика рака,
- индустриальный контроль качества,
- обнаружение предметов с контрабандой,
- всепогодные системы видимости для обеспечения безопасности полетов,
- современные телекоммуникационные системы, радар с высокой скоростью беспроводной передачи данных для LPI (низкая вероятность перехвата),
- коммерческое применение, включая различные микроволновые нагревательные устройства для промышленного и бытового использования



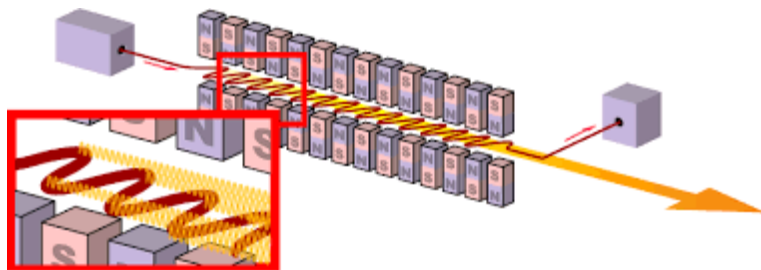
J. Benford, J.A.Swedge, E. Schamiloglu. High Power Microwave. CRC Press, 2016.

Л.А. Вайнштейн, В.А. Солнцев Лекции по сверхвысокочастотной электронике СВЧ. 1973.

Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков: в 2 т. 2003, 2004.

*<https://sites.google.com/view/mmwave/research/%C2%B5-wave-vacuum-electronics>

Что такое лазеры на свободных электронах (ЛСЭ)



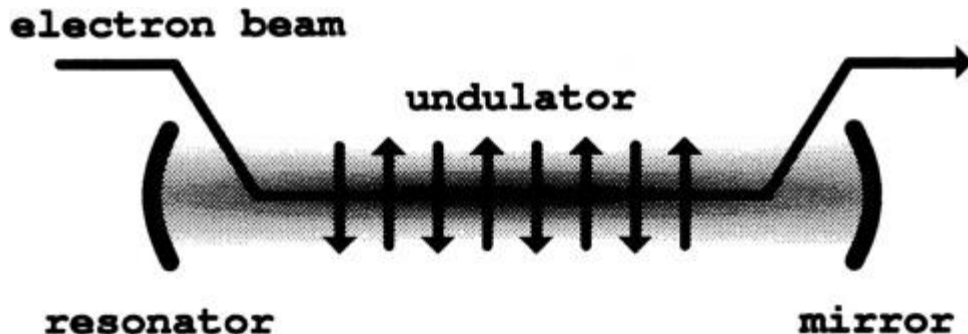
Основной принцип работы заключается в излучении электронов, движущихся, колеблющихся и излучающих под действием внешнего электромагнитного поля*.

Первые экспериментальные исследования ЛСЭ** подтвердили эффективность использования релятивистского электронного пучка в качестве активной среды в отличие от обычных лазеров со связанными атомными или молекулярными состояниями. ЛСЭ может генерировать перестраиваемое когерентное излучение высокой мощности в диапазонах от рентгеновского до миллиметрового.

* Madey J. M. J. Stimulated Emission of Bremsstrahlung in a Periodic Magnetic Field. J. Appl. Physics. 1971. Vol. 42. P. 1906–1913. Colson W.B. Theory of a Free Electron Laser. Physics Letters. 1976. Vol. 59A. P. 187–190.

** Deacon D. A. et al. First operation of a Free-Electron Laser. Phys. Rev. Lett. 1977. Vol. 38. P. 892–894.

Лазеры на свободных электронах



JOURNAL OF APPLIED PHYSICS

VOLUME 42, NUMBER 5

APRIL 1971

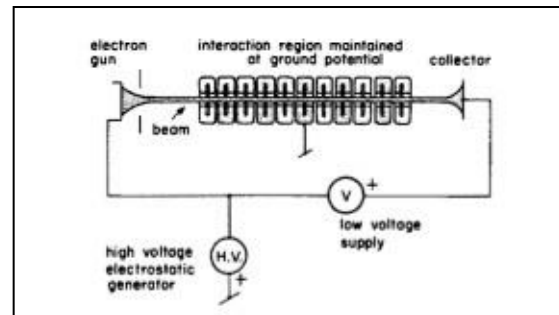
Stimulated Emission of Bremsstrahlung in a Periodic Magnetic Field

JOHN M. J. MADEY

Physics Department, Stanford University, Stanford, California 94305

(Received 20 February 1970; in final form 21 August 1970)

The Weizsäcker-Williams method is used to calculate the gain due to the induced emission of radiation into a single electromagnetic mode parallel to the motion of a relativistic electron through a periodic transverse dc magnetic field. Finite gain is available from the far-infrared through the visible region raising the possibility of continuously tunable amplifiers and oscillators at these frequencies with the further possibility of partially coherent radiation sources in the ultraviolet and x-ray regions to beyond 10 keV. Several numerical examples are considered.



*J. Madey, J. Appl. Phys. 42 (1971), 1906

Лазеры на свободных электронах

First Operation of a Free-Electron Laser*

D. A. G. Deacon,[†] L. R. Elias, J. M. J. Madey, G. J. Ramian, H. A. Schwettman, and T. I. Smith
High Energy Physics Laboratory, Stanford University, Stanford, California 94305
(Received 17 February 1977)

A free-electron laser oscillator has been operated above threshold at a wavelength of $3.4 \mu\text{m}$.

Ever since the first maser experiment in 1954, physicists have sought to develop a broadly tunable source of coherent radiation. Several ingenious techniques have been developed, of which the best example is the dye laser. Most of these devices have relied upon an atomic or a molecular active medium, and the wavelength and tuning range has therefore been limited by the details of atomic structure.

Several authors have realized that the constraints associated with atomic structure would not apply to a laser based on stimulated radiation by free

electrons.¹⁻⁵ Our research has focused on the interaction between radiation and an electron beam in a spatially periodic transverse magnetic field. Of the schemes which have been proposed, this approach appears the best suited to the generation of coherent radiation in the infrared, the visible, and the ultraviolet, and also has the potential for yielding very high average power. We have previously described the results of a measurement of the gain at $10.6 \mu\text{m}$.⁶ In this Letter we report the first operation of a free-electron laser oscillator.

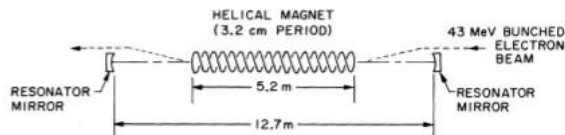


FIG. 1. Schematic diagram of the free-electron laser oscillator. (For more details see Ref.

VOLUME 51, NUMBER 18

PHYSICAL REVIEW LETTERS

31 OCTOBER 1983

First Operation of a Storage-Ring Free-Electron Laser

M. Billardon,^(a) P. Elleaume,^(b) J. M. Ortega,^(a) C. Bazin, M. Bergher, M. Velghe,^(c) and Y. Petroff
*Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Electromagnetique,
Universite de Paris-Sud, F-91405 Orsay, France*

and

D. A. G. Deacon,^(d) K. E. Robinson, and J. M. J. Madey
High Energy Physics Laboratory, Stanford University, Stanford, California 94305
(Received 1 August 1983)

A storage-ring free-electron laser oscillator has been operated above threshold at a visible wavelength $\lambda \approx 6500 \text{ \AA}$.

PACS numbers: 42.60.-v

Invited Comment

The free electron laser: conceptual history

John Madey¹, Marlan O Scully^{2,3} and Phillip Sprangle^{4,5}

¹ University of Hawai'i at Mānoa, Honolulu, HI 96822, USA

² Texas A&M University, College Station, TX 77843, USA

³ Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA

⁴ University of Maryland, College Park, MD 20742, USA

⁵ Naval Research Lab, SW Washington, DC 20375, USA

E-mail: madey@hawaii.edu, scully@tamu.edu and phillip.sprangle@nrl.navy.mil

Received 20 January 2016, revised 29 April 2016

Accepted for publication 10 May 2016

Published 12 July 2016

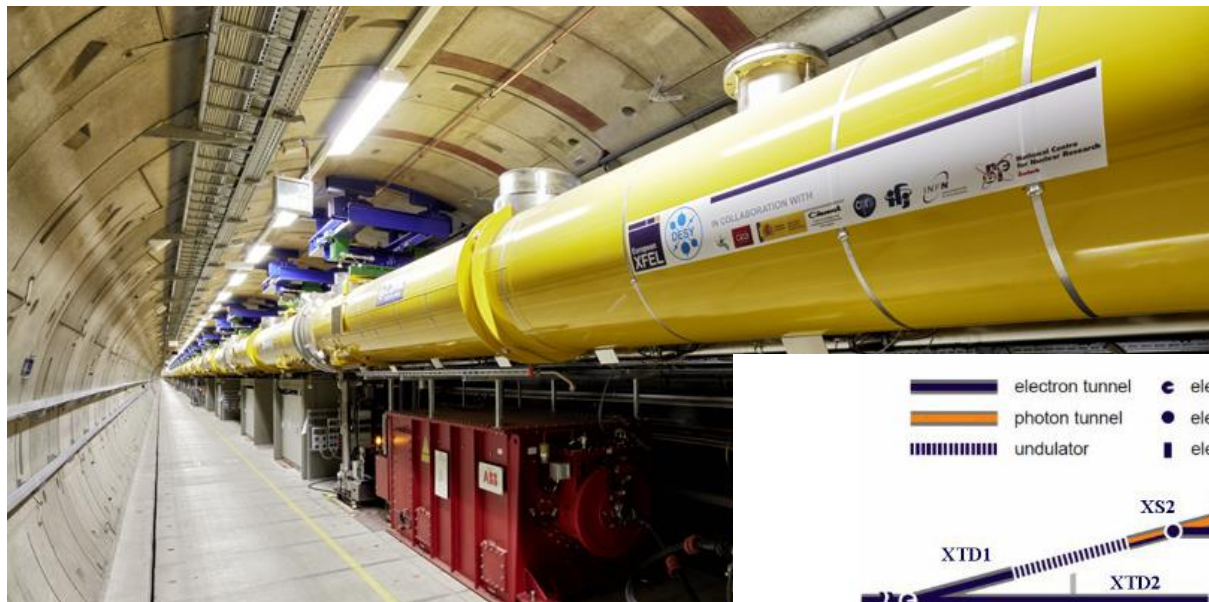


CrossMark

Abstract

The free electron laser (FEL) has lived up to its promise as given in (Madey 1971 *J. Appl. Phys.* **42** 1906) to wit: 'As shall be seen, finite gain is available ...from the far-infrared through the visible region ...with the further possibility of partially coherent radiation sources in the x-ray region'. In the present paper we review the history of the FEL drawing liberally (and where possible literally) from the original sources. Coauthors, Madey, Scully and Sprangle were

European XFEL* (DESY) – работает с 4 мая 2017 г.



XFEL длиной 3,4 км использует 768 резонаторов на длине 1,7 км и в может возбуждать электроны с энергией до 17,5 ГэВ. Электроны ускоряются импульсами со скоростью 10 импульсов в секунду. Каждый импульс может содержать до 2700 электронных сгустков, что в сумме дает до 27000 рентгеновских вспышек в секунду.

*<http://www.xfel.eu/>

H. Weise, W. Decking. Commissioning and First Lasing of the European XFEL Proc. FEL2017. P. 9–13.

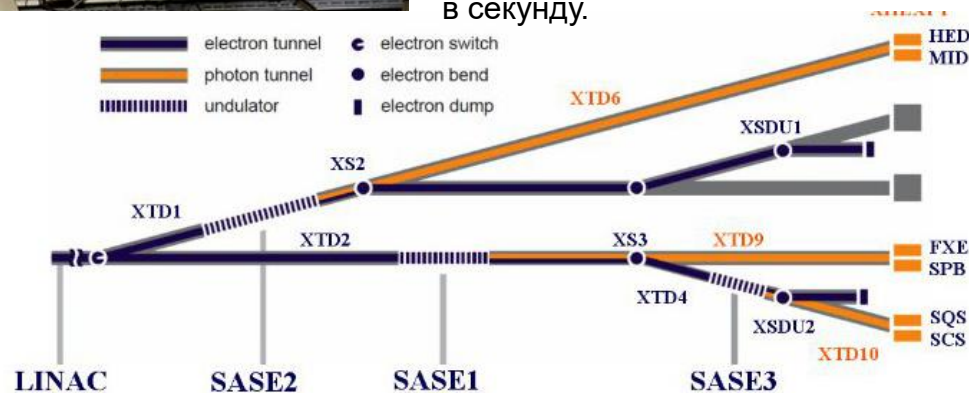


Figure 1: Schematic layout of the European XFEL facility showing the SASE undulators and corresponding experimental end stations.

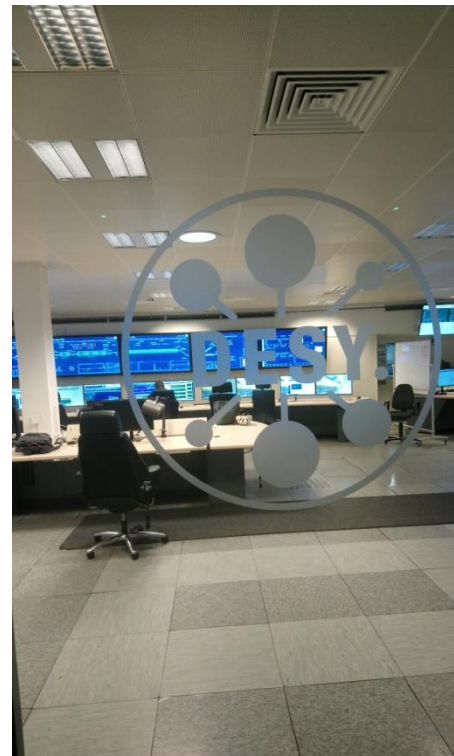
European XFEL



Booster



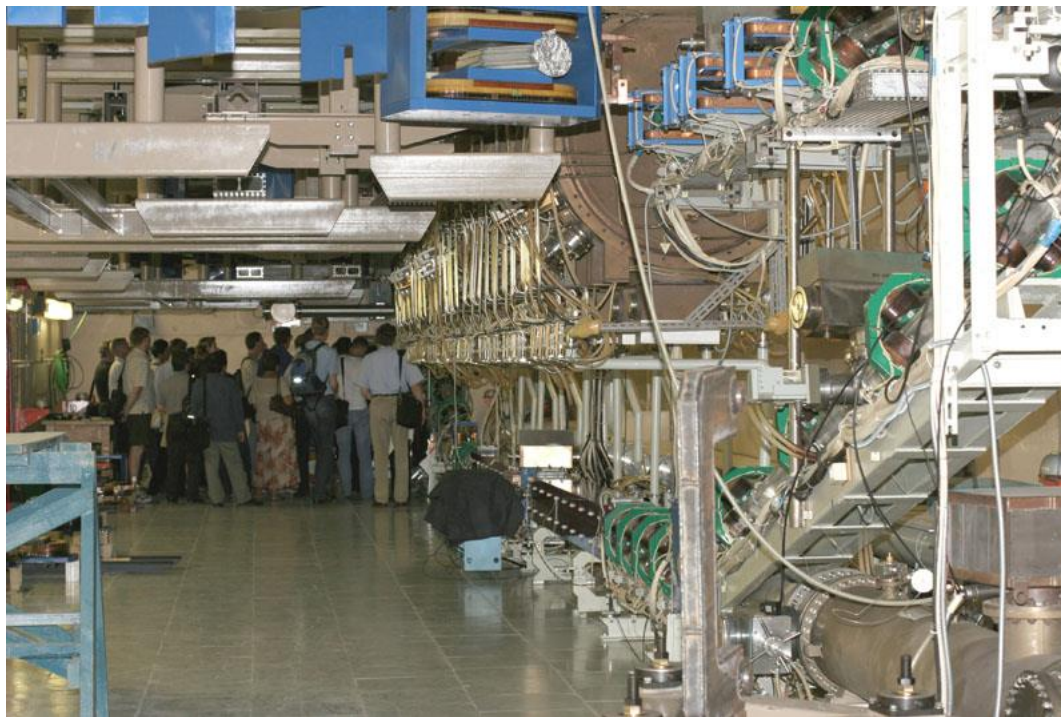
Linear accelerator+XFEL



Control room

Длина 3,4 км, генерирует чрезвычайно интенсивные рентгеновские импульсы для определения атомной структуры вирусов, исследования химических реакций, изучения процессов внутри планет.

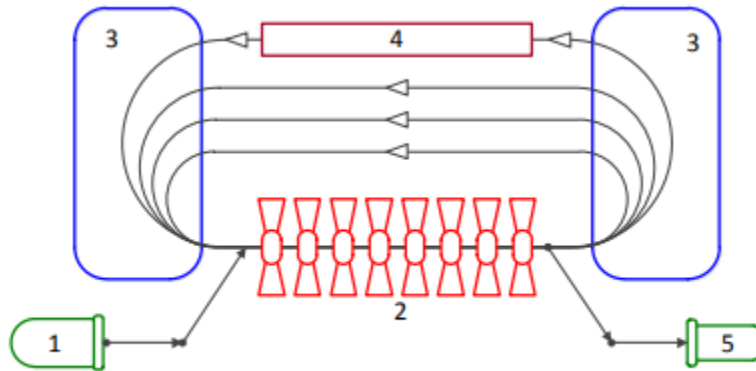
Новосибирский ЛСЭ*



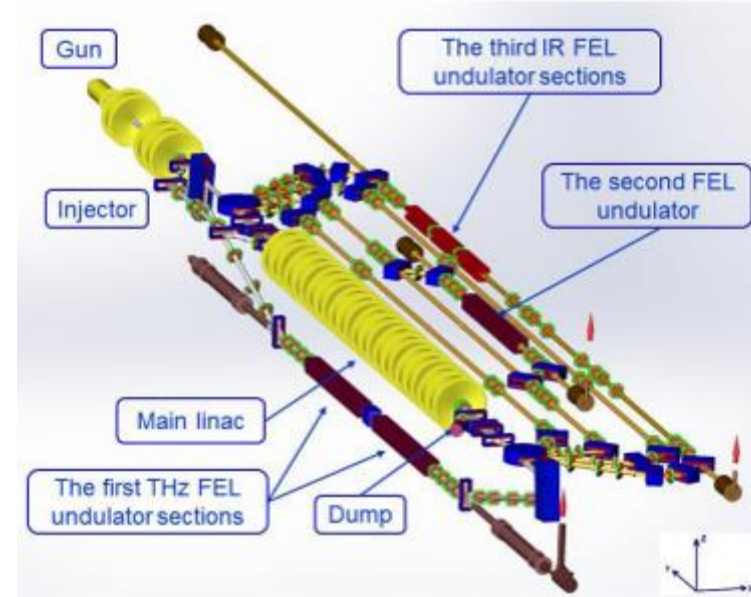
***Kulipanov et al.
Novosibirsk Free
Electron Laser
Facility Description
and Recent
Experiments IEEE
Trans. on
Therahertz Science
and Technology.
2015. Vol. 5, No. 5. P.
798–809.**

Находится в эксплуатации с 2003 года. Он обеспечивает узкополосное (менее 1%) ТГц излучение в диапазоне длин волн 80 - 240 мкм при средней мощности до 0,5 кВт и пиковой мощности до 1 МВт. За последние годы на объекте было выполнено около 30 пользовательских исследовательских проектов в различных областях науки.

Новосибирский ЛСЭ*



Simplest multi-turn ERL scheme: 1 – injector, 2 – linac, 3 – bending magnets, 4 – undulator, 5 – dump.



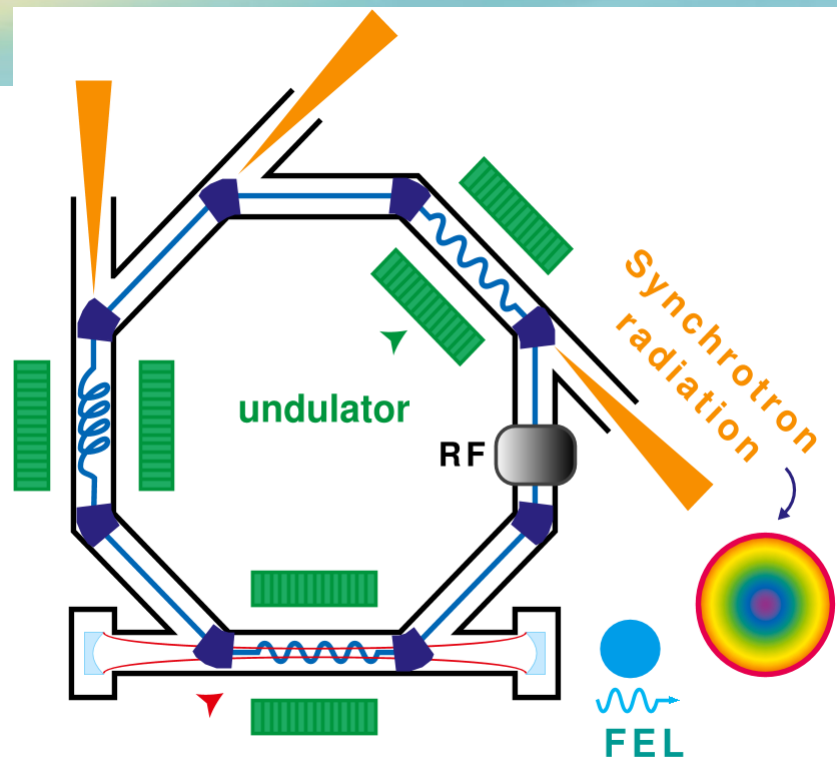
*N.A. Vinokurov et al. Novosibirsk Free Electron Laser: Terahertz and Infrared Coherent Radiation Source. Proc. RUPAC2016. DOI:10.18429/JACoW-RuPAC2016-TUXMH02

Super-ACO FEL

Super-ACO (Orsay, Франция) - это накопительное кольцо на 800 МэВ, предназначенное для приложений синхротронного излучения, которое эксплуатировалось с марта 1987 по 2003 год.

Источник Super-ACO FEL (SRFEL) был первым накопительным кольцевым FEL, обеспечивающим когерентное излучение для пользователей в УФ-диапазоне с 1993 года.

<i>The Super-ACO FEL</i>	
Beam energy (MeV)	800
Laser-off bunch length $\sigma_{\tau,0}$ (rms, ps)	85
Laser-off beam energy spread σ_0 (rms)	$5.4 \cdot 10^{-4}$
Synchrotron damping time τ_s (ms)	8.5
Laser width at perfect tuning (rms, ps)	20
Laser width at the maximum detuning (rms, ps)	40
Laser wavelength (nm)	350
Pulse period (two bunches operation) ΔT (ns)	120
Laser-off peak gain g_i (%)	~ 2.5
Cavity losses P (%)	~ 0.5



FEL section

M. E. Couprie. Chaos studies on the super-ACO free electron laser. NIM A. 2003. Vol. A507. P. 1–7.

C. Bruni et al. Chaotic nature of the super-ACO FEL. NIM. A. 2004. Vol. A528. P. 273–277.

Некоторые действующие ЛСЭ*

LOCATION	NAME	WAVELENGTHS	TYPE	STATUS
RIKEN (Japan)	SACLA FEL	0.63 - 3 Å	Linac	Operating, user facility
SLAC-SSRL (USA)	LCLS FEL	1.2 - 15 Å	Linac	Operating, user facility
DESY (Germany)	FLASH FEL	4.1 - 45 nm	SC Linac	Operating, user facility
ELETTRA, Trieste, Italy	FERMI	4 - 100 nm	Linac	Operating, user facility
SDL(NSLS) Brookhaven (USA)	HGHG FEL	193 nm	Linac	Operating, experiment
Duke Univ. , NC (USA)	OK-4	193 - 400 nm	storage ring	Operating, user facility
iFEL (Japan)	3 2 1 4 5	230 nm - 1.2 μm 1 - 6 μm 5 - 22 μm 20 - 60 μm 50 - 100 μm	linac	Operating, user facility
Univ. of Hawaii , (USA)	MK-V	1.7 - 9.1 μm	linac	Operating, experiment
FOM (Netherlands)	FELIX1 FELIX2	3.1 - 35 μm 25 - 250 μm	linac	Operating, user facility
LURE – Orsay (France)	CLIO	3 - 150 μm	linac	Operating, user facility
Jefferson Lab , VA (USA)		3.2 - 4.8 μm 363 - 438 nm	SC-linac	Operating, user facility
Science Univ. of Tokyo (Japan)	FEL-SUT	5 - 16 μm	linac	Operating, user facility
FZ Rossendorf, (Germany)	FELBE	4-22 μm 18-250 μm	SC-linac	Operating, user facility
UCSB CA (USA)	FIR-FEL MM-FEL 30 μ-FEL	63 - 340 μm 340 μm - 2.5 mm 30 - 63 μm	electrostatic	Operating, user facility

*http://sbfel3.ucsb.edu/www/fel_table.html

Photonic Band Structure: The Face-Centered-Cubic Case

E. Yablonovitch and T. J. Gmitter

Bell Communications Research, Navesink Research Center, Red Bank, New Jersey 07701-7040

(Received 25 July 1989)

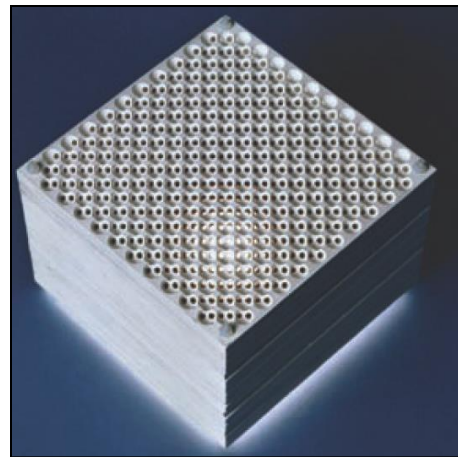
We employ the concepts of band theory to describe the behavior of electromagnetic waves in three dimensionally periodic face-centered-cubic (fcc) dielectric structures. This can produce a “photonic band gap” in which optical modes, spontaneous emission, and zero-point fluctuations are all absent. In the course of a broad experimental survey, we have found that most fcc dielectric structures have “semimetallic” band structure. Nevertheless, we have identified one particular dielectric “crystal” which actually has a “photonic band gap.” This dielectric structure requires a refractive-index contrast greater than 3 to 1, which happens to be readily obtainable in semiconductor materials.

PACS numbers: 42.50.-p, 41.10.Hv, 71.25.Cx, 84.90.+a

By analogy to electron waves in a crystal, light waves in a three dimensionally periodic dielectric structure should be described by band theory. Recently, the idea of photonic band structure^{1,2} has been introduced. This

Furthermore, this has enabled us to use sophisticated microwave homodyne detection techniques to measure the phase and amplitude of the electromagnetic Bloch wave functions propagating through the “photonic crystal.”

***Prof. Yablonovitch's Light Touch Column
from the March 2007 Issue of Optics & Photonics News.**



Defining photonic crystals

The new requirement for a complex 2D or 3D crystallographic structure led to the name “photonic crystal,” but such a structure also demanded substantial index contrast. Therefore, the definition of a “photonic crystal” has two requirements: high index contrast and a 2D or 3D periodic structure.

Фотонные кристаллы и фотонные ЛСЭ*

IEEE Photonics Journal

Photonic Free-Electron Lasers

Photonic Free-Electron Lasers

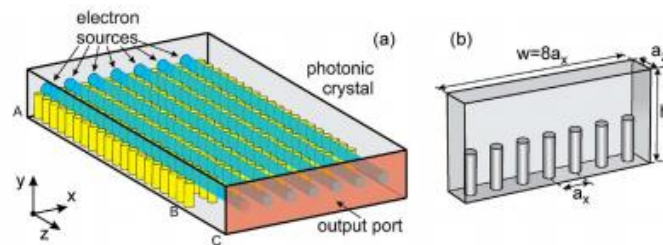
P. J. M. van der Slot, T. Denis, J. H. H. Lee, M. W. van Dijk, and K. J. Boller

(Invited Paper)

Laser Physics and Nonlinear Optics, MESA⁺ Institute for Nanotechnology, Department of Science and Technology, University of Twente, 7500 Enschede, The Netherlands

DOI: 10.1109/JPHOT.2012.2190724
1943-0655/\$31.00 © 2012 IEEE

Manuscript received February 16, 2012; revised March 7, 2012; accepted March 7, 2012. Date of current version April 20, 2012. This work was supported by the Dutch Technology Foundation STW, applied science division of NWO, and the technology program of the Dutch Ministry of Economic Affairs. Corresponding author: P. J. M. van der Slot (e-mail: p.j.m.vanderslot@utwente.nl).



Abstract: A photonic free-electron laser (pFEL) produces coherent Cerenkov radiation from a set of parallel electron beams streaming through a photonic crystal. The function of the crystal is to slow down the phase velocity of a copropagating electromagnetic wave, such that also mildly relativistic electrons (of about 10-keV energy) can emit coherent Cerenkov radiation. Starting from spontaneous emission, the feedback of the radiation on the electrons results in bunching of the electrons on the scale of the radiation wavelength, and consequently, coherent radiation can build up. The frequency of the coherent mode is set by the electron velocity and wave dispersion of the photonic crystal and can, *a priori*, be continuously varied by varying the electron energy. The scale invariance of Maxwell's equation allows operation from Gigahertz to Terahertz and possible infrared (IR) frequencies without the need to increase the electron beam energy. Therefore, the pFEL is a very attractive, compact, and coherent radiation source that has the potential to significantly enhance the power available in the THz domain.

Многопучковые лазеры на свободных электронах

Multiple beam free-electron lasers and optical klystrons *Appl. Phys. Lett.*, 39 (1981), 696-698

M. A. Pistrup

Department of Electrical Engineering, Stanford University, Stanford, California 94305

(Received 11 May 1981; accepted for publication 19 August 1981)

A method for the generation and amplification of infrared and optical radiation is presented based on space-charge interaction of electron streams of different momentum. The use of relativistic electrons with low-energy dispersion is found to allow gain to occur at infrared and optical wavelengths.

Two-stream, free-electron lasers

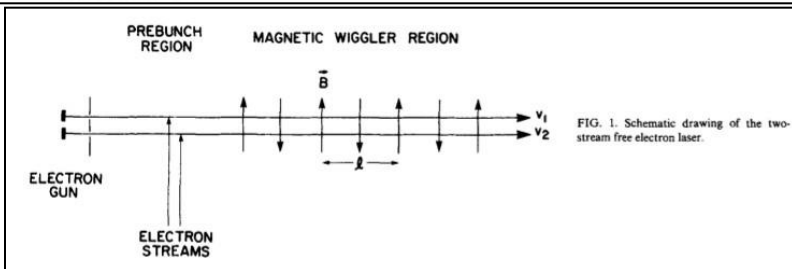
J. Appl. Phys., 53 (1982), 4113

G. Bekefi and K. D. Jacobs

Department of Physics and Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139

(Received 2 October 1981; accepted for publication 9 March 1982)

Two parallel, relativistic electron streams with different velocities support unstable, exponentially growing space-charge waves, and efficient electron bunching may be achieved in the submillimeter wavelength range. Injection of the prebunched streams into a static, periodic (wiggler) magnetic field enhances the intensity of the parametrically excited, backscattered electromagnetic wave. Calculations are presented of the amplitude enhancement and of the linear growth rate of the wave in the Raman regime, for the case of two cold, perfectly intermingled electron streams.



INT. J. ELECTRONICS, 1984, VOL. 57, NO. 6, 1191-1204

Double-stream electron cyclotron maser

WANG CHUNYI† and LIU SHENGANG‡

A new mechanism for stimulated radiation combining the cyclotron instability with the plasma double-stream instability is presented. It can be regarded as a new type of electron cyclotron resonance maser (ECRM) (Hirshfield 1979, Liu 1979) as well as a two-stream free-electron laser (FEL) (Pistrup 1981, Bekefi and Jacobs 1982) in a broader sense. One can say that this device combines ECRM and the two-stream FEL into one. The linear theory of the double-stream ECRM is given. Numerical calculations show that it offers the attractive advantages of high gain and broadband as compared with the conventional ECRM.



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 507 (2003) 373–377

NUCLEAR
INSTRUMENTS
& METHODS
IN PHYSICS
RESEARCH
Section A

www.elsevier.com/locate/nima

Multiple-beam free-electron lasers

H.P. Freund^{a,*}, D. Douglas^b, P.G. O'Shea^c

^a Science Applications International Corporation, 1710 Goodridge Drive, McLean, VA 22102, USA

^b Thomas Jefferson National Accelerator Facility, Newport News, VA 23606, USA

^c Institute for Research in Electronics and Applied Physics, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA

Abstract

Free-electron Lasers (FELs) have operated over virtually the entire electromagnetic spectrum from microwaves through the ultraviolet and up to average power levels of 2 kW. Advances in injector technology are needed to operate at shorter wavelengths, such as X-rays, or higher average powers. This can be achieved using multiple injectors and combining the beams. Initial simulations of this concept have been applied to the proposed design of the 1.5 Å Linac Coherent Light Source. Further studies will be conducted on the limitations of the effects of space-charge and coherent synchrotron radiation on the physics of combining beams.

© 2003 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

PACS: 41.60.Cr; 52.75.Ms

Keywords: Free-electron Laser; Multiple-beams

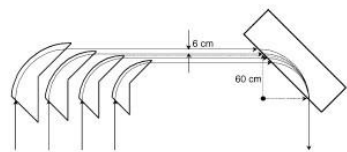


Fig. 1. Concept for energy stack at low energy—following combination, beams overlap in transverse phase space, but are separated by ~10% in energy. This example shows order 1 MeV spreads at 10 MeV, with a ~500 G field bending through a nominal radius of 60 cm.

THPD54

Proceedings of FEL2012, Nara, Japan

DYNAMICS OF A MULTI-BEAM PHOTONIC FREE ELECTRON LASER^{*}

J.H.H. Lee[#], M. W. van Dijk, T. Denis, P.J.M. van der Slot, K.-J. Boller,
Laser Physics and Nonlinear Optics, Mesa⁺ Institute for Nanotechnology,
University of Twente, Enschede, The Netherlands

Abstract

A photonic free-electron laser (pFEL) uses free electrons streaming through a photonic crystal (PhC) to generate tunable coherent radiation. Here, we consider a pFEL driven by a set of three low energy (~10 keV), low perveance (< 0.1 μP) electron beams. Using a particle-in-cell code, we numerically study the dynamics and calculate the small-signal growth rate and output power of the various modes. We show that for an appropriate design of the PhC and selective placement of the electron beams, single mode operation is possible. We will also present results on the scaling with the number of electron beams.

INTRODUCTION

In a photonic free-electron laser (pFEL) electrons can stream through the many channels that are available in a photonic crystal (PhC) and produce Cerenkov radiation [1]. The function of the PhC is to slow down the phase velocity of the electromagnetic wave to match the velocity of the co-propagating electrons. More precisely, one of the spatial harmonics that is part of a Bloch mode of the PhC will be phase matched with the co-propagating electrons. For a strong interaction, the field amplitude of the phase-matched spatial harmonic should be as high as possible, and therefore interaction with a low spatial harmonic is desirable [2]. If the Bloch mode possesses an electric field component in the propagation direction of the electrons, then the phase-matched spatial harmonic will bunch the electrons and coherent Cerenkov radiation will be emitted. The many channels that are naturally

the starting current and investigate whether mode competition is present or not and how the mode competition is affected by the design of the PhC or placement of the electron beams.

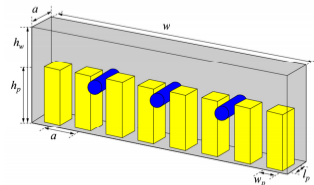


Figure 1: Schematic view of the unit cell of the photonic crystal used for the 3-beam pFEL. See Table 1 for dimensions. The location of the three electron beams used in the PIC simulations are shown as blue cylinders.

PHOTONIC CRYSTAL

The unit cell of the PhC used in this study is schematically shown in Fig. 1, and its dimensions are summarized in Table 1. It consists of a metal waveguide containing a periodic array of metal posts. The PhC is designed to produce microwave radiation around when low energy (~10 keV) electrons are metal waveguide is required to guide/co microwave radiation.

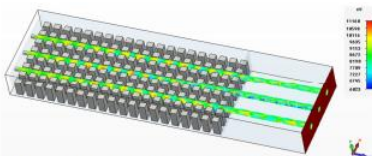


Figure 3: PIC model of the 3-beam pFEL. The active region of the laser consists of 20 PhC unit cells. Also shown are the three electron beams. The colour represents the electron energy, for the case shown at a time when the laser is in near saturation.

Мазеры на свободных электронах (МСЭ)*

Maser is a microwave amplification by stimulated emission of radiation.

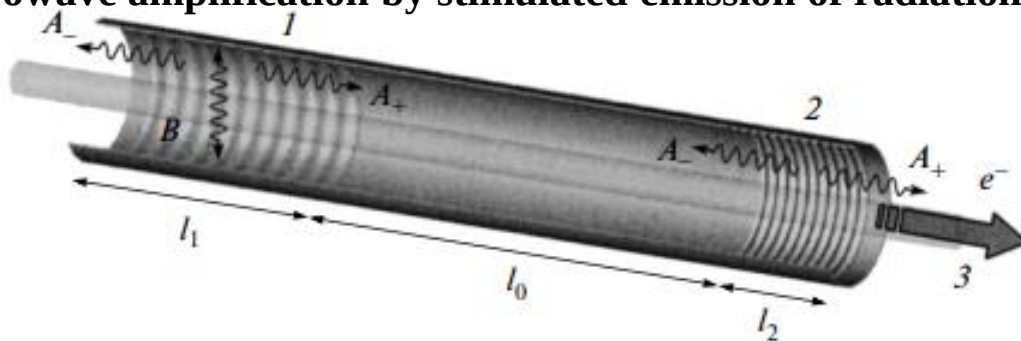
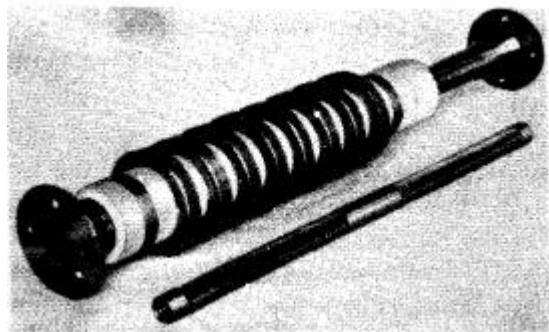
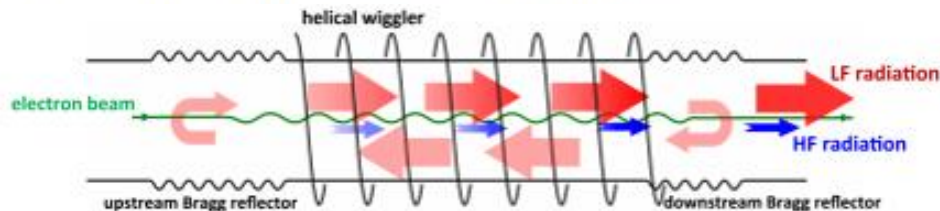


Fig. 1. Schematic diagram of a FEM with a combined double-mirror resonator: (1) modified Bragg reflector (2) traditional 1D Bragg reflector; (3) electron beam. Wavy lines show the directions of propagation of the electromagnetic flows $A_{\pm}$ and B . The corrugation period of the modified Bragg structure (1) is about twice that of the traditional structure (2).

*И. Е. Ботвиник и др. Мазер на свободных электронах. Письма ЖЭТФ. 35, 418 (1982)
N. S. Ginzburg et al. Free Electron Maser with High Selectivity Bragg Resonator Using Coupled Propagating and Trapped Modes. Technical Physics Letters, 2010, Vol. 36. P. 952–956
N. Yu. Peskov et al. High-power free-electron maser operated in a two-mode frequency-multiplying regime. Phys. Rev. Accel. Beams. 19, 060704 (2016)



Scheme of the FEM multiplier with a helical wiggler and a two-mirror Bragg resonator.

Основные уравнения

$$\frac{\partial^2 \theta_\alpha}{\partial \zeta^2} = - \left(1 + v \frac{\partial \theta_\alpha}{\partial \zeta} \right)^{3/2} \operatorname{Re} (F e^{i \theta_\alpha});$$

$$\frac{\partial F}{\partial \tau} - \frac{\partial F}{\partial \zeta} = - \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i \theta_\alpha} d \alpha;$$

$$\theta|_{\zeta=0} = \alpha, \quad \left. \frac{\partial \theta}{\partial \zeta} \right|_{\zeta=0} = 0, \quad F|_{\zeta=l} = 0, \quad F|_{\zeta=0} = F^0(\zeta)$$

Гинзбург Н.С., Кузнецов С. П., Федосеева Т. Н.
Теория переходных процессов в
релятивистской ЛОВ. Известия вузов.
Радиофизика. 1978. Т. 21, №7. С. 1037–1052.

$$\frac{\partial \hat{A}_+}{\partial Z} + \frac{\partial \hat{A}_+}{\partial \tau} + i \alpha_1 \hat{B} = J, \quad J = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i \theta} d \theta_0, \quad (2a)$$

$$-\frac{\partial \hat{A}_-}{\partial Z} + \frac{\partial \hat{A}_-}{\partial \tau} + i \alpha_1 \hat{B} = 0, \quad \frac{iC}{2} \frac{\partial^2 \hat{B}}{\partial Z^2} + \frac{\partial \hat{B}}{\partial \tau} + \sigma \hat{B} + i \alpha_1 (\hat{A}_+ + \hat{A}_-) = 0. \quad (2б, в)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial Z} + \beta_{\parallel}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right)^2 \theta = \operatorname{Re}(\hat{A}_+ e^{i \theta}), \quad \theta|_{Z=0} = \theta_0 \in [0, 2\pi],$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial Z} + \beta_{\parallel}^{-1} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \theta \Big|_{Z=0} = \Delta.$$

Гинзбург Н.С. и др. Мазер на свободных электронах с высокоселективным брэгговским резонатором, основанным на связи бегущих и квазикритических волн. Письма ЖТФ. 2010. Т. 36. С. 952–956

Основные уравнения

REVIEWS OF MODERN PHYSICS, VOLUME 88, JANUARY–MARCH 2016

The physics of x-ray free-electron lasers

C. Pellegrini

*Department of Physics and Astronomy, University of California at Los Angeles,
Los Angeles, California 90095, USA
and SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, California 94025, USA*

A. Marinelli

SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, California 94025, USA

S. Reiche

Paul Scherrer Institute, 5232 Villigen PSI, Switzerland

(published 9 March 2016)

X-ray free-electron lasers (x-ray FELs) give us for the first time the possibility to explore structures and dynamical processes of atomic and molecular systems at the angstrom-femtosecond space and time scales. They generate coherent photon pulses with time duration of a few to 100 fs, peak power of 10 to 100 GW, over a wavelength range extending from about 100 nm to less than 1 Å. Using these novel and unique capabilities new scientific results are being obtained in atomic and molecular sciences, in areas of physics, chemistry, and biology. This paper reviews the physical principles, the theoretical models, and the numerical codes on which x-ray FELs are based, starting from a single electron spontaneous undulator radiation to the FEL collective instability of a high density electron beam, strongly enhancing the electromagnetic radiation field intensity and its coherence properties. A short review is presented of the main experimental properties of x-ray FELs, and the results are discussed of the most recent research to improve their longitudinal coherence properties, increase the peak power, and generate multicolor spectra.

DOI: 10.1103/RevModPhys.88.015006

We now use the vectors $\vec{x}_B$ and $\vec{p}_B$ with components (ξ, ζ) and $(\beta_B d\xi/c dt, \beta_B d\zeta/c dt)$ and Eqs. (2.33) and (2.34) to write the betatron oscillation equations. Using also Eqs. (3.11), (3.18), and (3.34) we have the complete set of FEL equations

$$\frac{d}{cdt} \vec{x}_{B,n} = \frac{\vec{p}_{B,n}}{\beta_{B,F}}, \quad (3.36)$$

$$\frac{d}{cdt} \vec{p}_{B,n} = -\frac{\vec{x}_{B,n}}{\beta_{B,F}}, \quad (3.37)$$

$$\frac{d\Phi_n}{cdt} = k_U \beta_{e0} \left[1 - \frac{\gamma_R^2}{\gamma_n^2} - \frac{k_r}{2k_U \beta_{B,F}} \left(\frac{\vec{x}_{B,n}^2}{\beta_{B,F}} + \beta_{B,F} \vec{p}_{B,n}^2 \right) \right], \quad (3.38)$$

$$\frac{d\gamma_n}{cdt} = \frac{eK}{2mc^2 \gamma_n} (ae^{i\Phi_n} + \text{c.c.}), \quad (3.39)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right) \alpha - \nabla_T^2 \frac{i\alpha}{2k_r} = 2\pi e n_e(x, y, z - \beta_0 ct) \times \left[K \left\langle \frac{e^{-i\Phi}}{\gamma} \right\rangle - \frac{ie\alpha}{mc^2 k_r} \left\langle \frac{1}{\gamma} \right\rangle \right], \quad (3.40)$$

for $n = 1, \dots, N_e$.

This is a system of $6N_e + 1$ nonlinear equations with no simple analytical solution. It includes radiation diffraction, longitudinal and transverse electron dynamics, betatron oscillations for equal and constant focusing in the horizontal and vertical planes, and electron beam distribution in its six-dimensional phase space. It does not include quantum effects nor the effect of the radiation field on the electron velocities. In the remainder of this paper we will solve these equations in a

Динамические системы и хаос*

Хаотическая динамика означает тенденцию широкого круга систем переходить в состояния с детерминированным поведением и непредсказуемым поведением. Нелинейность - необходимое, но недостаточное условие хаоса в системе. Основная причина хаоса - экспоненциальное расхождение изначально близких траекторий в нелинейных системах. Это так называемый «эффект бабочки» ** (чувствительность к начальным условиям).



Хаос в электронных устройствах, таких как ЛОВ, ЛБВ, ЛСЭ и т. д. происходит из-за запаздывающего характера распределенной обратной связи.

*Н.-Г. Шустер, "Deterministic Chaos" An Introduction, Physik Verlag, (1984)

** E.N. Lorenz, J. Atmos. Sci. 20 (1963), 130

Hur M. S. et al. Phys. Rev. E58 (1998), 936-941

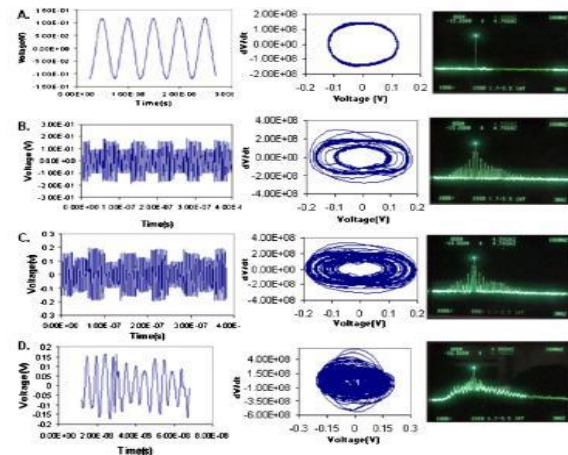
Ninno G., Fanelli. D. Phys. Rev. Let. 92 (2004), 094801

Bruni C. et al. Nucl. Instr. Meth. A528 (2004), 273-277

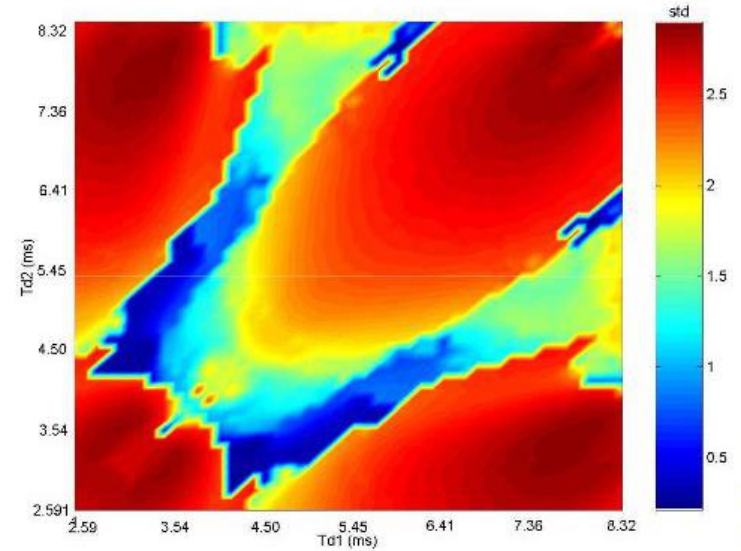
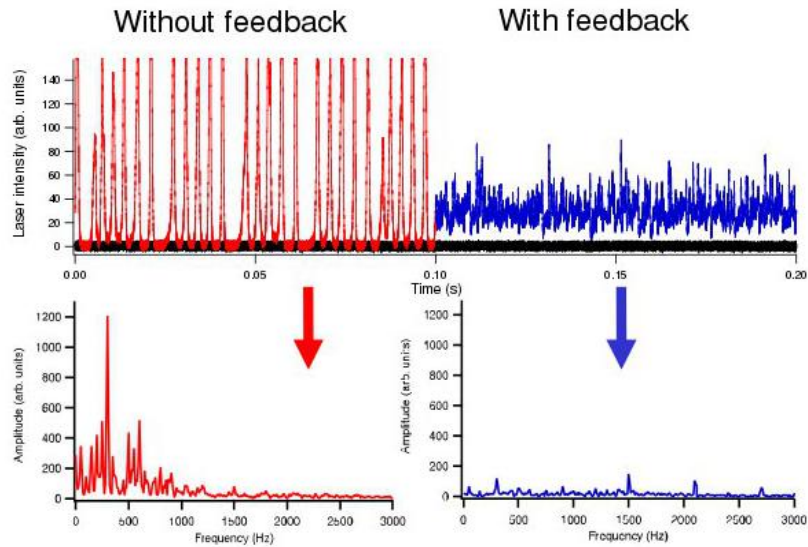
Thomas C.A. et al. Eur. Phys. J. D32 (2005), 83-93

Marchewka C. et al. Phys. Plasma (2006), 13, 013104

Kuznetsov S.P. Izvestija VUZov - Applied Nonlinear Dynamics, 14 (2006), 3-35



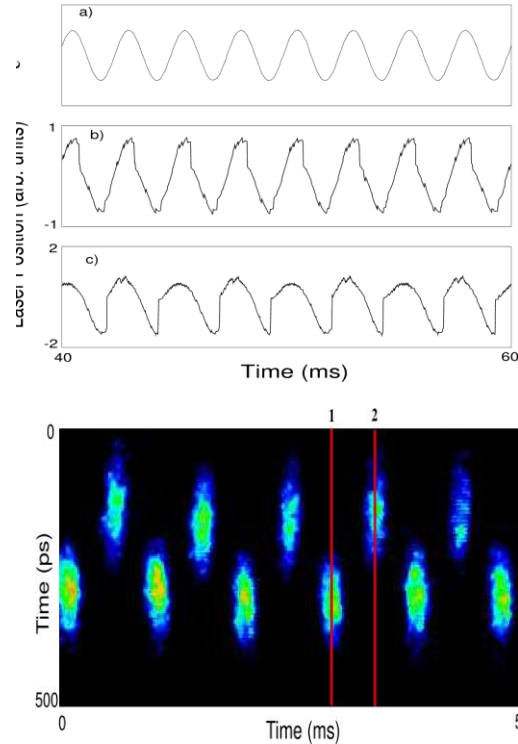
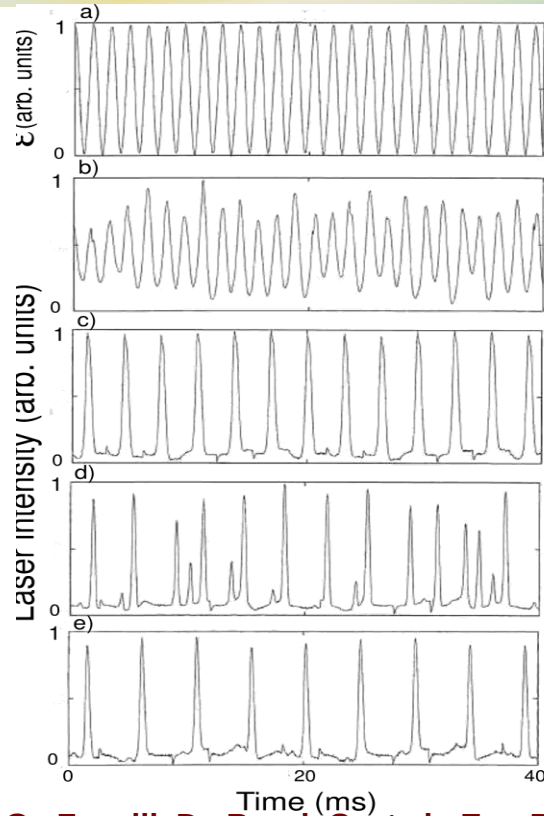
Хаос в ЛСЭ



M. Billardon. Storage ring free-electron laser and chaos. Phys. Rev. Lett. 65 (1990), 713

S.J. Hahn, J.K. Lee. Bifurcations in a short-pulse free-electron laser oscillator. Phys. Let. A 175 (1993), 339-343

Хаос в ЛСЭ (Super-ACO FEL)



De Ninno, G., Fanelli, D., Bruni, C. et al.. Eur. Phys. J. D (2003) 22: 269.
C. Bruni et al. Eur. Phys. J. D 55, 669-677 (2009)

Динамическая дифракция

The Reflection of X-rays by Crystals.

By W. H. BRAGG, M.A., F.R.S., Cavendish Professor of Physics in the University of Leeds; and W. L. BRAGG, B.A., Trinity College, Cambridge.

(Received April 7,—Read April 17, 1913.)

In a discussion of the Laue photographs it has been shown* that they may conveniently be interpreted as due to the reflection of X-rays in such planes within the crystal as are rich in atoms. This leads at once to the attempt to use cleavage planes as mirrors, and it has been found that mica gives a reflected pencil from its cleavage plane strong enough to make a visible impression on a photographic plate in a few minutes' exposure. It has also been observed that the reflected pencil can be detected by the ionisation method.†

For the purpose of examining more closely the reflection of X-rays in this manner we have used an apparatus resembling a spectrometer in form, an ionisation chamber taking the place of the telescope. The collimator is replaced by a lead block pierced by a hole which can be stopped down to slits of various widths. The revolving table in the centre carries the crystal. The ionisation chamber is tubular, 15 cm. long and 5 cm. in diameter. It can be rotated about the axis of the instrument, to which its own axis is perpendicular. It is filled with sulphur dioxide in order to increase the ionisation current: both air and methyl iodide have also been used occasionally to make sure that no special characteristics of the gas in

* W. L. Bragg, 'Proc. Camb. Phil. Soc.,' vol. 17, Part I, p. 43.

† W. H. Bragg, 'Nature,' Jan. 23, 1913.

В соответствии с Ландау (том VIII) выражение для диэлектрической проницаемости кристалла может быть использовано для описания дифракции рентгеновских квантов в кристалле, которая не зависит от поляризации фотона:

$$\varepsilon(\mathbf{r}, \omega) = \sum_{\tau} \varepsilon(\tau, \omega) \exp(-i\tau\mathbf{r})$$

$$\varepsilon(0, \omega) = 1 + \chi_0,$$

$$\varepsilon(\pm\tau, \omega) = \chi_{\pm\tau}$$

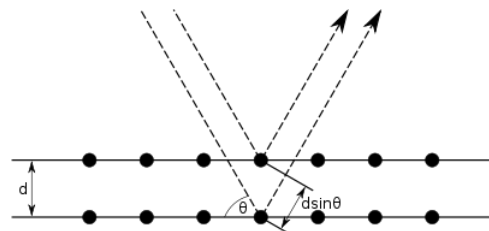
Электрическая индукция имеет вид:

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) \approx \varepsilon(\mathbf{r}, \omega) \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$$

Известное уравнение Вульфа-Брэгга определяет угол дифракции Брэгга:

$$2k \sin \Theta = \tau$$

Амплитуды рассеяния резко возрастают при $\mathbf{k}_{\tau} = \mathbf{k} + \tau$



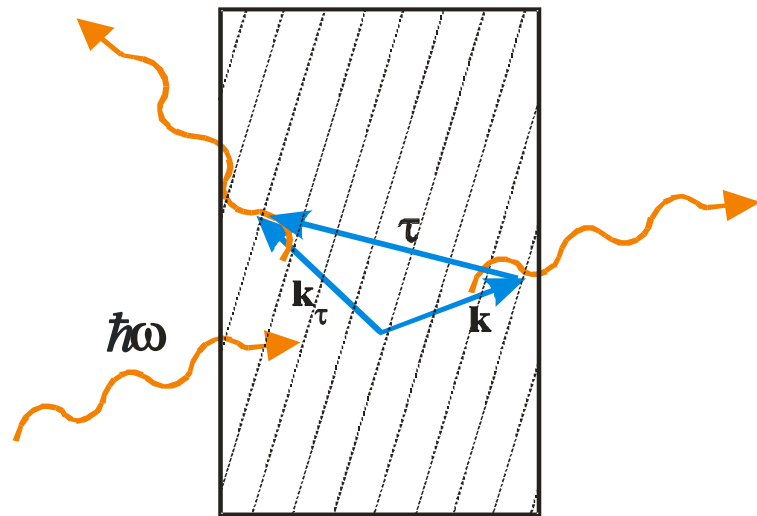
$$\tau = \left(\frac{2\pi}{d_1}, \frac{2\pi}{d_2}, \frac{2\pi}{d_3} \right)$$

τ - вектор обратной решетки.

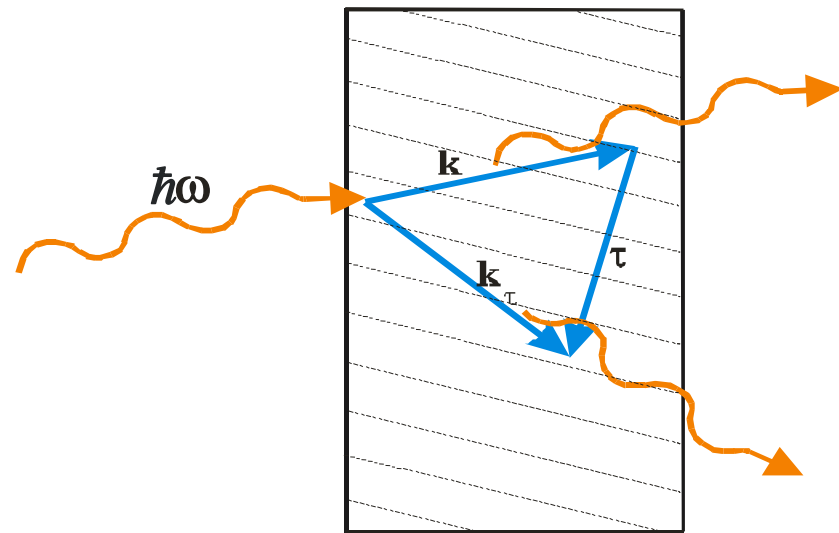
*Bragg, W.H.; Bragg, W.L. (1913). Proc R. Soc. Lond. A. 88 (605): 428–38.

Различные геометрии динамической дифракции*

Геометрия Брэгга



Геометрия Лауэ



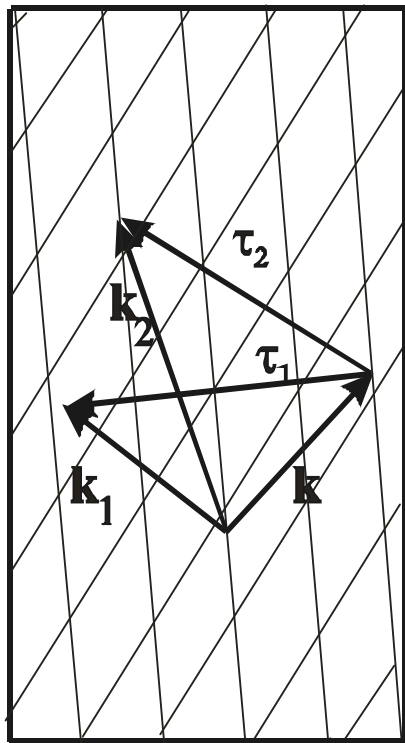
$\boldsymbol{\tau}$ – вектор обратной решетки.

Принципы динамической дифракции справедливы в диапазонах от рентгеновского до терагерцового.

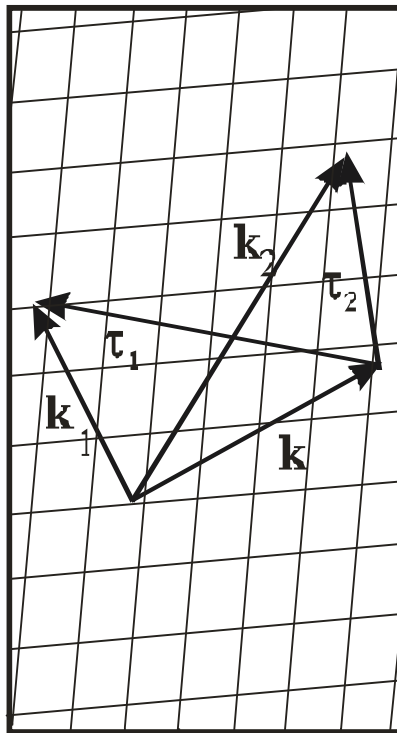
*Bragg, W.H.; Bragg, W.L. (1913). Proc R. Soc. Lond. A. 88 (605): 428–38.

Различные геометрии динамической дифракции

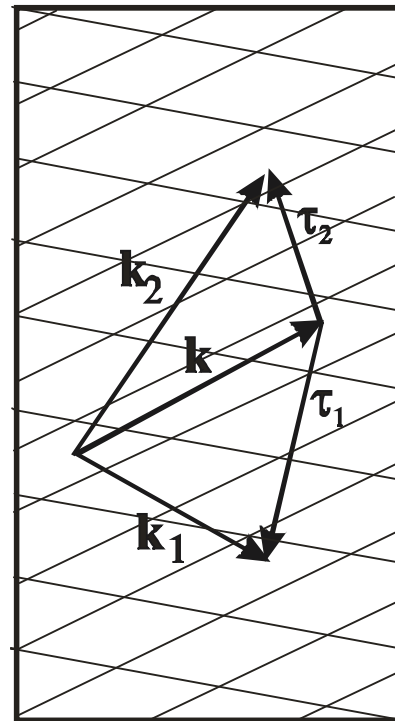
Геометрия Брэгг-Брэгг



Геометрия Брэгг-Лауэ

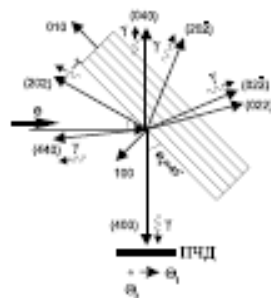
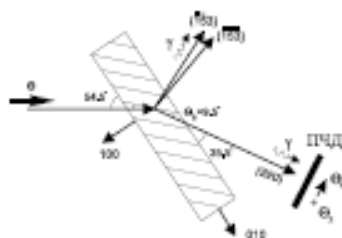


Геометрия Лауэ-Лауэ

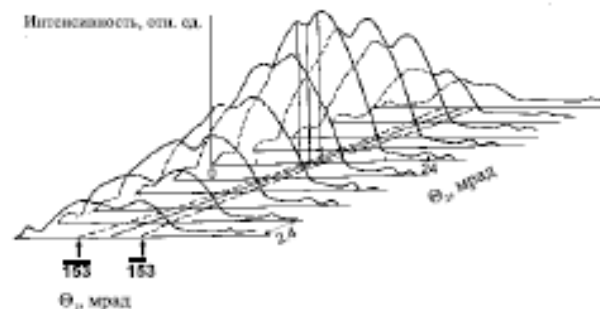


Эксперименты по многоволновой рентгеновской дифракции*

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

Новый закон неустойчивости* электронного пучка, движущегося в пространственно-периодической среде

Инкремент неустойчивости в точках вырождения корней дисперсионного уравнения:

$$G \sim \sqrt[3+s]{\rho}$$

вместо $\sim \sqrt[3]{\rho}$ для других систем (ЛОВ, ЛБВ, ЛСЭ и др.)

Пороговый ток в точках вырождения корней дисперсионного уравнения:

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

вместо $\sim (kL)^{-3}$ для других систем.

s – число дополнительных волн, возникающих в системе вследствие дифракции.

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

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

Новый закон неустойчивости электронного пучка, движущегося в пространственно-периодической среде

В одномерном случае из неявных выражений* для процессов генерации в ЛСЭ с распределенной обратной связью и гофрированным волноводом, можно получить следующее выражение** для порогового тока, которое совпадает с пороговым током для случая ОЛСЭ:

$$-\frac{\pi^2 n^2}{4} (CL')^3 f(y) = \frac{2\pi^2 n^2}{(\sigma L')^2}$$

где $L' = \frac{\omega}{c} L$, $C \sim I^{1/3}$ - обобщенный параметр Пирса.

*В.Л.Братман, Н.С.Гинзбург, Г.Г.Денисов, Письма ЖТФ 7, вып. 21 (1981), 1320–1324.

**V.G.Baryshevsky "High Power Microwave and Optical Volume Free Electron Lasers (VFELs)", 2012, arXiv:1211.4769

Объемный лазер на свободных электронах (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.

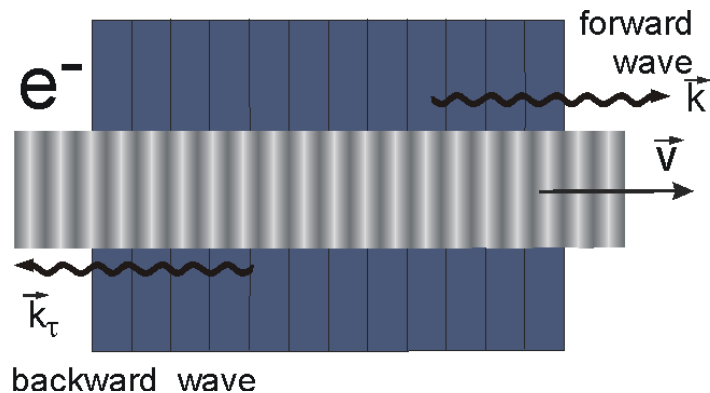
***V.G.Baryshevsky, I.D.Feranchuk, Phys.Lett. 102A (1984) 141,
В.Г.Барышевский, ДАН СССР, 299(1988), 1363**

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

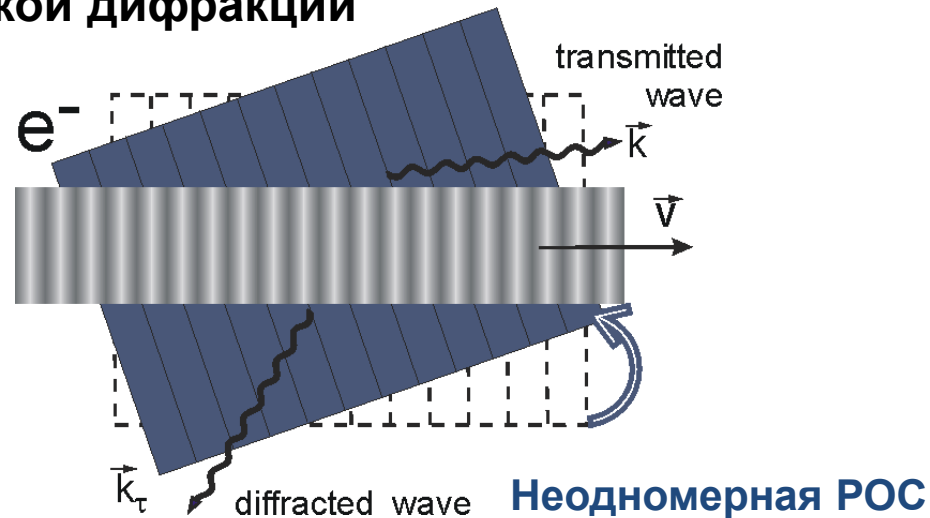


Основная особенность ОЛСЭ –

объемная (неодномерная) многоволновая распределенная обратная связь (ОРОС) в условиях динамической дифракции



Одномерная РОС



Неодномерная РОС

Основные принципы ОЛСЭ, справедливые для всех частотных диапазонов:

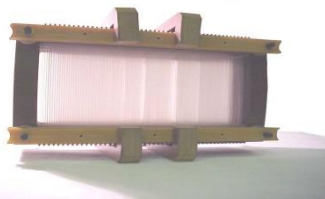
Условия синхронизма

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

Условия дифракции

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

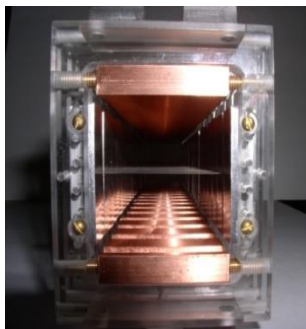
История экспериментов ОЛСЭ



1996 Экспериментальное моделирование электродинамических процессов в объемной дифракционной решетке из диэлектрических нитей

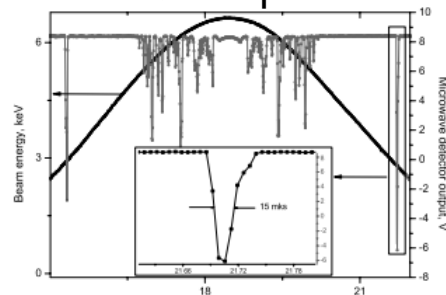
V.G.Baryshevsky et al., NIM 393A (1997) 71

2004 ОЛСЭ с прямоугольными сеточными резонаторами



2001 Первая генерация ОЛСЭ в миллиметровом диапазоне.

Экспериментальная проверка принципов ОЛСЭ. Демонстрация перестройки частоты при фиксированной энергии электронов.



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

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

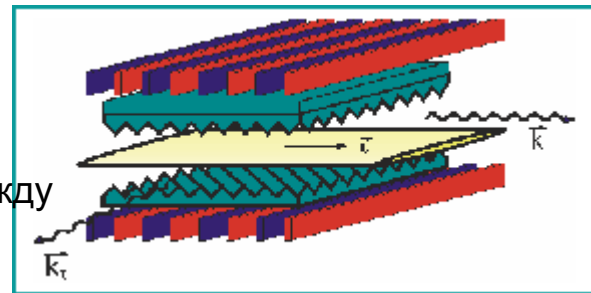
История экспериментов ОЛСЭ

Установка ОЛСЭ-10

Резонатор установки сформирован двумя дифракционными решетками с различными периодами и двумя гладкими боковыми стенками. Взаимодействие первой дифракционной решетки (возбуждающей) с электронным пучком генерирует излучение Смита–Парсела.

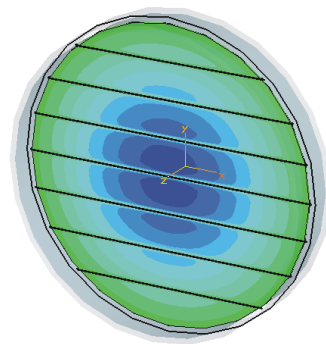
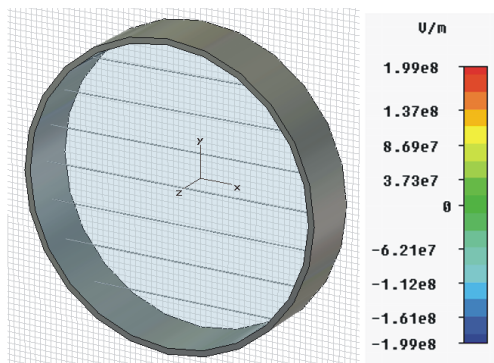
Вторая (резонансная) решетка обеспечивает распределенную обратную связь между полем и электронным пучком посредством динамической дифракции Брэгга. Конструкция резонатора позволяет изменять его параметры в течение эксперимента (вращать и изменять расстояние между дифракционными решетками и электронным пучком). Это обеспечивает возможность настройки условий двухволновой дифракции.

Основные параметры установки ОЛСЭ-10: ленточный пучок сечением $1 \times 10 \text{ см}^2$ с энергией электронов 110 кэВ, длина волны – $4 \div 8 \text{ нм}$.



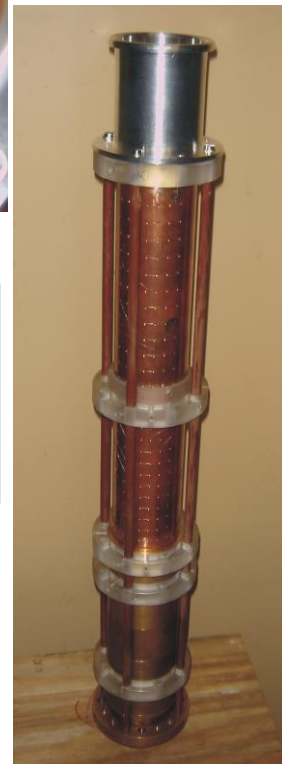
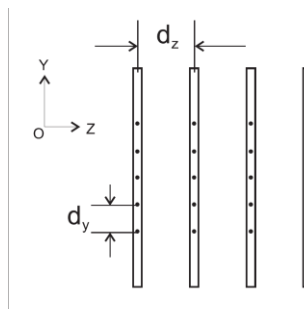
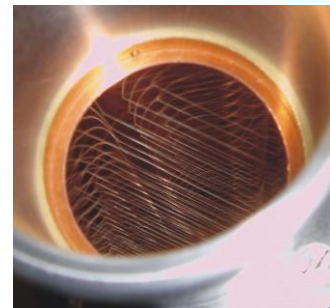
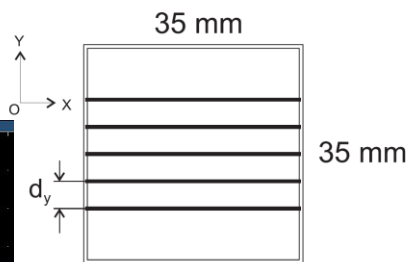
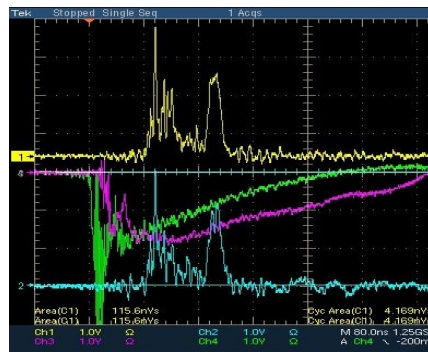
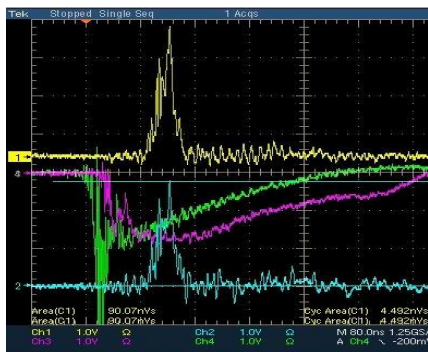
V.G.Baryshevsky et al., NIM 483 A (2002) 21

История экспериментов ОЛСЭ-250 – сеточные резонаторы*



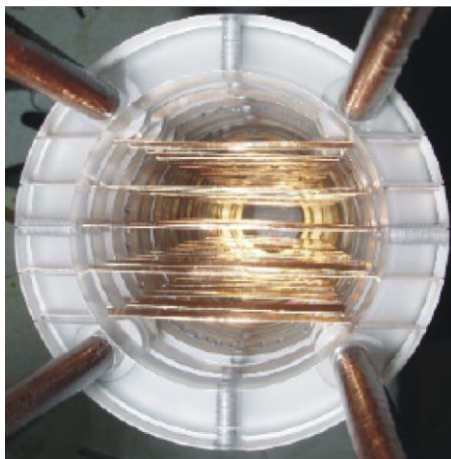
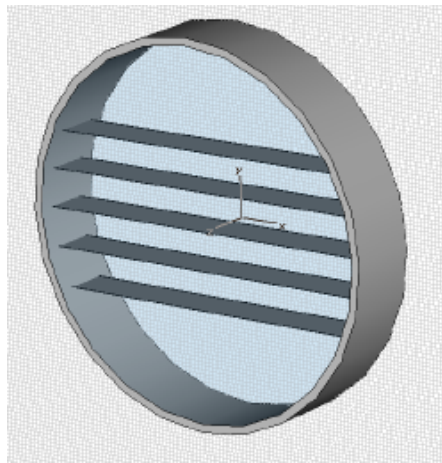
constant period

variable period



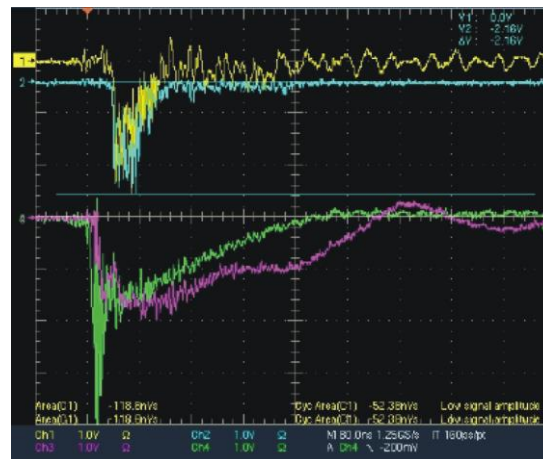
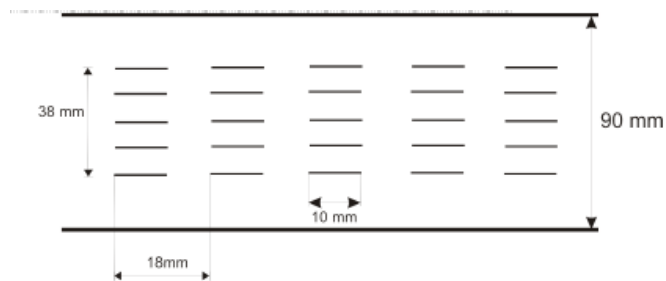
*V.G.Baryshevsky et al. Proc. IRMMW-THz 2010; Proc FEL2010.

История экспериментов ОЛСЭ-250 – фольговые резонаторы*



*V.G.Baryshevsky et al. Proc. IRMMW-THz 2010; Proc FEL2010.

Основные параметры установки **ОЛСЭ-250**: пучок с энергией электронов 250 кэВ, длина волны – 3 см.



Многопучковые ОЛСЭ

Могут быть рассмотрены как лазерные системы с фазовой синхронизацией - laser-self-phase-locking system*.

*Baryshevsky V.G. NIM B355 (2015), 17; V.G. Baryshevsky, A.A.Gurinovich, arXiv:1301.4330.

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 355 (2015) 17–23

Contents lists available at ScienceDirect



ELSEVIER

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B

journal homepage: www.elsevier.com/locate/nimb



Spontaneous and induced radiation by electrons/positrons in natural and photonic crystals. Volume free electron lasers (VFELs): From microwave and optical to X-ray range

V.G. Baryshevsky

Research Institute for Nuclear Problems, Babruiskaya str., 11, 220030 Minsk, Belarus

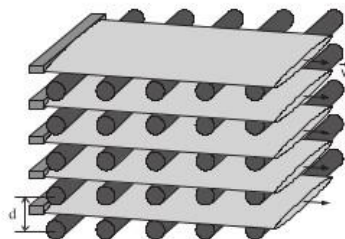
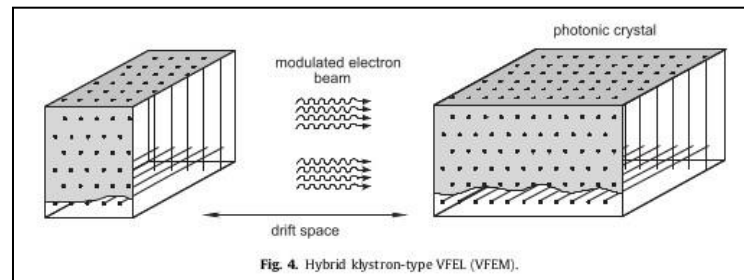


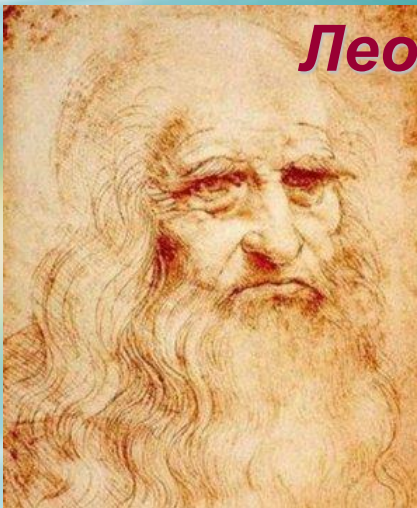
Fig. 3. VFEL (VFEM) with several beams.



Основные публикации

1. J. Benford, J.A.Swegle, E. Schamiloglu. High Power Microwave. 2016. 446 p.
2. Т. Маршалл. Лазеры на свободных электронах. 1987. 240 с.
3. Н. Р. Freund, Т. М. Antonsen, Jr. Principles of Free Electron Lasers. 2018. 716 p.
4. Л.А. Вайнштейн, В.А. Солнцев. Лекции по сверхвысокочастотной электронике СВЧ. 1973. 399 с.
5. А.Ф.Александров, М.В. Кузелев. Физика электронных пучков и основы высокочастотной электроники. 2007. 300 с.
6. V.G. Baryshevsky. High-energy nuclear optics of polarized particles. World Scientific Publishing Company, 2012. 640 p.
7. V.G. Baryshevsky, I.D. Feranchuk, A. P. Ulyanenko. Parametric X-ray Radiation in Crystals. Theory, Experiments and Applications. 2003. 179 p.
8. B. Steinar, B. The physics of HPM sources. Preprint Norwegian Defence Research Establishment 2008/00014, 2008-01-04. 64 p.
9. Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков: в 2 т. 2003. Т.1. 496 с.
10. Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков: в 2 т. 2004. Т.2. 648 с.
11. Р. А. Силин, В. П. Сазонов. Замедляющие системы. 1966. 104 с.
12. Р. А. Силин. Периодические волноводы. 2002. 438 с.
13. Г. Шустер. Детерминированный хаос: Введение. 1988. 240 с.
14. С. П. Кузнецов. Динамический хаос. 2001. 296 с.
15. З. Г. Пинскер. Рентгеновская кристаллооптика. 1982. 391 с.
16. Ш. Чжан. Многоволновая дифракция рентгеновских лучей в кристаллах. 1987. 336 с.
17. Р. Джеймс. Оптические принципы дифракции рентгеновских лучей. 1950. 572 с.
18. С. Н. Сытова. Нелинейная динамика излучения сильноточных пучков заряженных частиц в пространственно-периодических структурах. Журнал БГУ. 2021, №1. С. 62–72.
19. С. Н. Сытова. Нелинейная динамика излучения сильноточных пучков заряженных частиц в пространственно-периодических структурах. Белорусский научный архив. 2021. 21 с. <https://belnet.bsu.by/article/1454>.

***Знания, не рожденные опытом, матерью
всякой достоверности, бесплодны и
полны ошибок.***



Леонардо да Винчи