Микроондуляторы для компактных ЛСЭ В.Л. Братман ИПФ РАН, Нижний Новгород, РФ Ариэльский университет, Ариэль, Израиль





Школа молодых ученых «Мощные источники электромагнитного излучения терагерцового, оптического и рентгеновского диапазонов на основе фотоинжекторных комплексов», 22-23 сентября 2021, Нижний Новгород, ИПФ РАН

Гибридный фотоинжектор в Ариэльском университете (разработан в UCLA, USA)



(0.1-1) ps / (0.3-1) nC / (3-6.5) MeV

С 1990-х: фс лазеры для освещения фотокатодов и получения пс сгустков с большими зарядами

Длительность 1 пс– длина 0.3 мм f=1 ТГц, λ= 0.3 мм

Привлекательно для прямой генерации Когерентного Спонтанного Излучения и Сверхизлучения ТГц импульсов

КСИ: I < **λ**

СИ (вариант SASE): I >> λ

Излучаемый ТГц импульс

Электронный сгусток

-Сразу когерентное излучение Самогруппировка электронов, вызванная первоначально некогерентным спонтанным излучением

Универсальный метод генерации коротких волн



Из-за эффекта Доплера частота излучения вперед во много раз больше частоты колебаний электрона.

$$\omega(\theta) = \frac{\Omega}{1 - \beta_{\parallel} \cos \theta} \quad \mathcal{O}_{\text{max}} \sim \gamma^2 \Omega \quad \gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2} >> 1$$

Ондулятор (Гинзбург, 1947; Моц, 1951)

Доплеровское преобразование частоты колебаний

Лоренц-фактор

$$\omega(\theta) = \frac{\Omega}{1 - \beta_{\parallel} \cos \theta}, \ \omega_{\max} \sim \gamma^2 \Omega, \ \gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2} >> 1$$

Ускоряющее напряжение (МВ)	Лоренц-фактор ү	Частотный выигрыш ${\gamma}^2$	
0.1	1.2	1.4	
1	3	9	
100	200	40.000	
10.000	20.000	400.000.000	

Сравнение электрического и магнитного ондуляторов



Движение электрона в планарном ондуляторе



 $|k_u x| \ll 1, |k_u y| \ll 1$

 $\gamma = const$

$$\begin{split} \vec{H}_{u} &= H_{u} \hat{y} \sin k_{u} z, \frac{dp_{x}}{dt} = \frac{e}{c} v_{z} H_{u} \sin k_{u} z \; *) \\ t \to z, \, dz = v_{z} dt, \, \frac{dp_{x}}{dz} = \frac{e}{c} H_{u} \sin k_{u} z, \, m\gamma v_{x} = -\frac{e}{c} \frac{H_{u}}{k_{z}} \cos k_{u} z \\ \beta_{x} &= -\beta_{u} \cos k_{u} z, \, \beta_{u} = \frac{K}{\gamma} \\ \beta_{x}^{2} + \beta_{z}^{2} = 1 - \frac{1}{\gamma^{2}}, \, \beta_{z} = \beta_{\parallel} \sqrt{1 - \frac{\beta_{u}^{2}}{2\beta_{\parallel}^{2}}} \cos 2k_{u} z, \\ \beta_{\parallel} &= \sqrt{1 - \gamma^{-2} - \frac{\beta_{u}^{2}}{2}} \approx 1 - \frac{\gamma^{-2} + \frac{\beta_{u}^{2}}{2}}{2} \end{split}$$

Undulator parameter

 $K = \frac{eH_u d_u}{2\pi mc^2} \approx \frac{eH_u}{m\Omega c}$

Движение электрона в винтовом ондуляторе

Melical undulator (currents or magnets) At the axis $\hat{H}_{\mu} = H_{\mu} \left(\hat{x} \cos k_{\mu} z + \hat{y} \sin k_{\mu} z \right)$ $|k_u x| \ll 1, |k_u y| \ll 1$ $\gamma = const$ $\frac{dp_x}{dz} = \frac{e}{c}H_u \sin k_u z, \ \frac{dp_y}{dz} = -\frac{e}{c}H_u \cos k_u z$ $\beta_u = \frac{K}{\gamma}$ $\vec{\beta}_{u} = \vec{v}_{u} / c, \quad \vec{\beta} = -\beta_{u} \left(\hat{x} \cos k_{u} z + \hat{y} \sin k_{u} z \right) \uparrow \downarrow \vec{H}_{u},$ Undulator $\beta_{\perp} = \beta_u = const, \beta_z = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2} - \beta_{\perp}^2} = const$ parameter $K = \frac{eH_u d_u}{2\pi mc^2}$ Helical stationary trajectory

Идеи и эксперименты Моца (1951)





Магнетронные магниты и стальные

полюсные наконечники между полюсами

- Доплеровское преобразование частоты
- магнитный ондулятор
- эксперимент на Стэнфордском ускорителе: излучение сгустками мм и ИК волн
- встречная волна как ондулятор (вч накачка)

Р. Филипс (1957-1965): Стимулированное излучение. **Ubitron (Undulated Beam Interaction)** мазер на свободных электронах (МСЭ)



Пучок колеблющихся и быстро перемещающихся электронов взаимодействует с быстрой волноводной модой

 $\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} \approx \Omega, \qquad \Omega =$



REGION Fig. 3 Schematic of first four experimental ubitrons. These used FEL-like wiggled pencil beam configuration.

45° MATCHING

RAMP

INTERACTION

45° MATCHING RAMP

Усилитель: 0.15 МэВ/5.5 mm (1960)

INTERACTION CIRCUIT

 $2\pi v$

¹ CM

Сильноточный убитрон НИРФИ-ФИАН (1973-1976)

С.И. Кременцов, М.Д. Райзер, А.В. Сморгонский, Убитрон – генератор с релятивистским электронным пучком, ПЖТФ, 3, 453, 1976

М.И. Петелин, Н.Ф. Ковалев



А.В. Сморгонский (1946-2021)

Дж. Мэйди и др. (1973-1977). Новые идеи и новое название: Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ)



$$\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} pprox \Omega, \qquad \Omega = rac{2\pi v_{\parallel}}{d}$$
Стэнфорд, США

Усилитель на 10 мкм и генератор на 3 мкм

Сверхпроводящий винтовой магнит



Преобразование частоты в 10 000 раз

Участие ИПФ в реализации мощных МСЭ

1-й сильноточный убитрон, Альтернативные варианты: Москва, 1973-1975 МЦАР

Общая теория и методы расчета, эффективные схемы, методы селекции мод.



Утрехт, 1992-2000



Дубна



Екатеринбург







Новосибирск

В ЛСЭ наиболее часто используются планарные ондуляторы Хальбаха из намагниченных блоков NdFeB





M = 2







Клаус Хальбах 1925-2000

М число магнитов на периоде

$$B = 2B_r \frac{\sin(\pi / M)}{(\pi / M)} (e^{-\xi_1} - e^{-\xi_2}), \quad \xi_{1,2} = 2\pi y_{1,2} / d$$

$$M = 2, B = \frac{4}{\pi} B_r \left(e^{-\xi_1} - e^{-\xi_2} \right) \qquad M = 4, B = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} B_r \left(e^{-\xi_1} - e^{-\xi_2} \right)$$

$$\xi_1 = \pi g / d, g = 2y_1 \text{ gap}$$

Выигрыш $\sqrt{2}$ и слабое внешнее поле

Ондуляторы в виде системы токов и магнитов



Undulator made of an array of infinite parallel thick conductors.

Pure permanent magnet undulator made up of four magnets per period.

При одинаковых зазоре, периоде и высоте

$$\frac{B_I}{B_M} = 0.45 \frac{I/d}{M} \approx 0.11 \mu_0 \frac{d j}{B_r}$$

NdFeB $B_r = 1.2 \text{ T}$
 $B_I = B_M$
 $d=3 \text{ cm}, \ j \approx 300 \text{ A}/\text{ mm}^2$
 $d=3 \text{ mM}, \ j \approx 30 \text{ kA}/\text{ mm}^2$

Рентгеновские ЛСЭ

LCLS (2009), SACLA (2011), European XFEL (2017), PAL-XFEL (2017), SwissFEL (2017), FLASH 2 (2017)









Грандиозные сооружения, фантастические перспективы.



Первый рентгеновский ЛСЭ (2009)

Стэнфорд, США







13.6 ГэВ, 0.15 нм; ондулятор: d=3 cm, g=6.8 мм, B=1.25 Тл, K=3.5, 112 м



Контроль химических реакций. Понимание ранних стадий реакций, включая каталитические реакции, которые имеют решающее значение для производства топлива и промышленных химикатов. Понимание сверхбыстрой химии в масштабе атомов и молекул.



Понимание фотосинтеза - одной из важнейших химических реакций. Будущее энергетики.



Секреты жизни. Определение структуры мембранных белков – ключевых для открытия новых лекарств.





Будущая электроника. Ультра-быстрые, низкоэнергетические чипы компьютерной памяти.

Создание новых материалов и изучение термоядерных реакций.

Европейский рентгеновский ЛСЭ (2017)





3,4 км/ 1,2 млрд евро (58 % ФРГ, 27 % РФ). 17.5 ГэВ, 0.1 нм,

d=4 см, К=1.65-9









Сверхпроводящий линейный ускоритель с максимальной энергией электронов 17,5 ГэВ. Наблюдение за ходом химических реакций, фото и видео биомолекул на атомном уровне.

Компактные рентгеновские ЛСЭ

Существующие XFELs – огромные и дорогостоящие установки.

Очень востребованы более доступные источники.

Один из ключевых элементов – микроондулятор с *d*=1-10 мм

Хальбаховские микроондуляторы

N. Majernik, J. Rosenzweig "Design of Comb Fabricated Halbach Undulators", Instruments 2019, 3(4), 58



При ручной сборке планарных микро-ондуляторов манипулирование и юстировка тысяч магнитов размером меньше рисового зерна.

«Гребенки» из целых магнитов создание множества периодов из одной детали в одном режиме обработки.

Альтернатива: микроондуляторы из спиралей

- Ферромагнитные или хорошо проводящие спирали в поле соленоида,
- Намагниченные и ненамагниченные ферромагнитные спирали без соленоида.



Достоинства

- Большая <u>средняя</u> осцилляторная скорость и эффективность излучения
- Спирали тоже изготавливаются из одного куска
- Фокусировка по обеим поперечным координатам

Разновидности ондуляторов из спиралей

Перераспределение однородного поля соленоида спиральными ферромагнитными и/или хорошо проводящими вставками





Стальная спираль

Balal N., Bandurkin I.V., Bratman V.L., Magory E., Savilov A.V. "Negative-mass mitigation of Coulomb repulsion for terahertz undulator radiation of electron bunches", APL, 107, 163505 (2015). Balal N., Bandurkin I.V., Bratman V.L., Fedotov A.E., "Helical undulator based on partial redistribution of uniform magnetic field". Phys. Rev. Accel. Beams **20**, 122401 (2017).





Си в импульсном соленоиде

Сталь + Си

Balal N., Bratman V.L., Magory E. "New varieties of helical undulators" NIMA 971, 163895 (2020).

Намагниченные спирали (без соленоида)



NdFeB



Гибрид: NdFeB и сталь



Импровизированный эксперимент: намагниченный NdFeB порошок в винтовой пластиковой оправке («пылевая спираль»)

Сравнение планарных ондуляторов со спиралями

Системы с винтовым полем



Два M=4 Хальбах 2 спирали 4 спирали



Изготовление NdFeB микроондуляторов в виде спиралей и гребенок

J. Greer "Wire electrical discharge machining of helical devices from permanent magnets" (Thesis)

Электроэрозионный станок





Период 1 мм

Древний ондулятор на территории России?



Бронзовая спираль (VIII-IX век). Археологические раскопки. Псковская область.

Изготовление NdFeB микроондуляторов в виде спиралей и гребенок

J. Greer "Wire electrical discharge machining of helical devices from permanent magnets" (Thesis)

Электроэрозионный станок





Период 1 мм

Проект «ультракомпактного» рентгеновского ЛСЭ (UC-XFEL) UCLA, SLAC, LANL, INFN, Argonne NL, LBNL et al.



Keywords: free-electron laser, high accelerating gradient, inverse free-electron laser, high brightness beams, cryogenic accelerator

UC-XFEL. Основные идеи.

- Криогенные медные ускоряющие структуры с поверхностными полями до 250-500 МВ/м для фотоинжекторов с яркостью на порядок выше достигнутой.
- Ускорение пучков до энергии **1 ГэВ на длине менее 10 м**.
- Малый **эмиттанс 50 нм-рад за счет г**руппировки в инверсном ЛСЭ.
- Эти пучки и новые ондуляторы с периодом 1–10 мм позволят создать UC-XFEL для университетских лабораторий.
- Фотонный поток за импульс порядка нескольких процентов от производительности существующих источников XFEL

Схема генератора мягкого рентгеновского излучения



SXR UC-XFEL: 1 нм, 1 ГэВ/14 пКл/400 нм. Длина около 40 м.

HXR UC-XFEL: 0.16 нм, 1.6 ГэВ/4.7 пКл/140 нм.

Ондуляторы для UC-XFEL



Parameter	Units	Soft x-ray	Hard x-ray
Undulator period, λ_u	mm	6.5	3.0
Peak undulator field, B_0	Т	1.0	1.0
Undulator parameter, $K_{\rm u}$		0.60	0.28

Ондуляторы с периодами 1 мм - 10 мкм

Лазерная микро-обработка (1 мм - 0.2 мм)



Магнитные пленки на Si подложке (200 мкм – 10 мкм)



Намагничивание напыленной пленки NdFeB

d=200, 120 и 65 мкм

B.A. Peterson et al. "Technology development for short-period magnetic undulators", Physics and Applications of High Brightness Beams Workshop, HBEB 2013

Проекты лазерно-плазменных рентгеновских ЛСЭ



Laser wakefield accelerator (LWFA)-driven FEL High-gain FEL natural application for LWFA (ultra-short, high peak current) beams [F. Grüner et al., Appl. Phys. B (2007); D. Jaroszynski et al., Philos. Trans. R. Soc., Ser. A (2006)] Schematic of LBNL LWFA-driven FEL: oeder et al., in Proc. of FEL06 (www.jacow.org/) (FEL output: LBNL-LWFA single-pass, hig gain SASE FEL λ=31 nm ~3 cm 1 J/pulse 1013 photons/pulse ww Undulator 5 m 0.5 GeV, 5 kA, electron beam 2.18 cm period. nlasma XUV Laser beam channel 220 periods K=1.85 Stable 0.5 GeV beams demonstrated LBNL laser system Plasma capillary 0.4 0.5 technology conventional undul K. Rob on et al., IEEE QE (1987)

Выметание электронов сверхмощным фемтосекундным лазерным импульсом и формирование безэлектронного пузыря. Затем часть электронов втягивается в пузырь и ускоряется до энергии порядка 1 ГэВ.



Выводы

- Для компактных и доступных многим лабораториям рентгеновских ЛСЭ требуются микроондуляторы с *d*=1-10 мм.
- Современные технологии позволяют создать эффективные планарные и винтовые ондуляторы из редкоземельных магнитов с d=3 мм, K=0.3.
- Спирали хороши для ТГц диапазона, но имеется много открытых вопросов о возможности их использования в более коротковолновых диапазонах.

Спасибо за внимание!