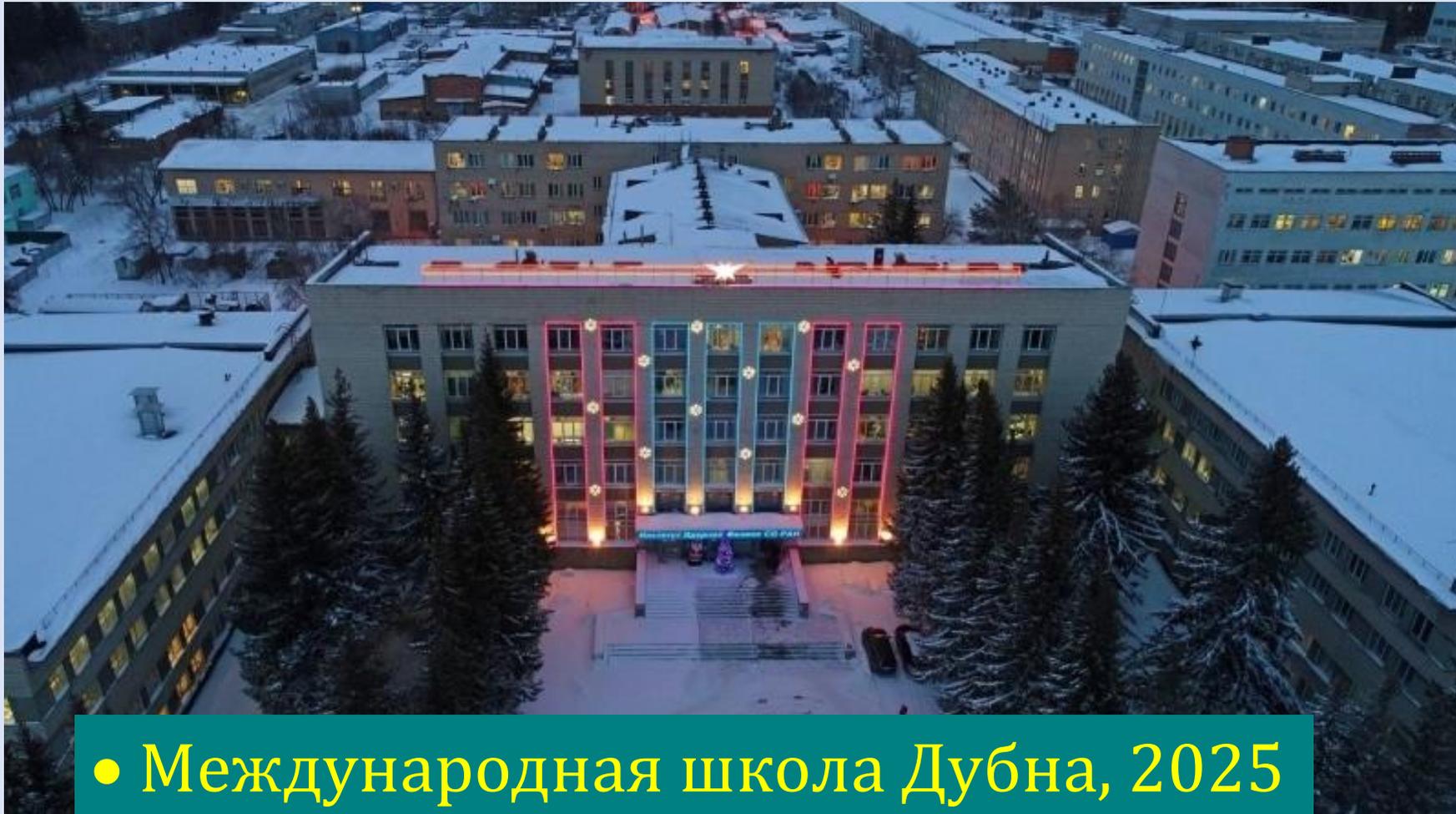


Источники пучков электронов и позитронов



• Международная школа Дубна, 2025



Институт ядерной физики
имени Г. И. Будкера СО РАН



ИНСТИТУТ КАТАЛИЗА
им. Г.К. БОРЕСКОВА

Данила
Никифоров

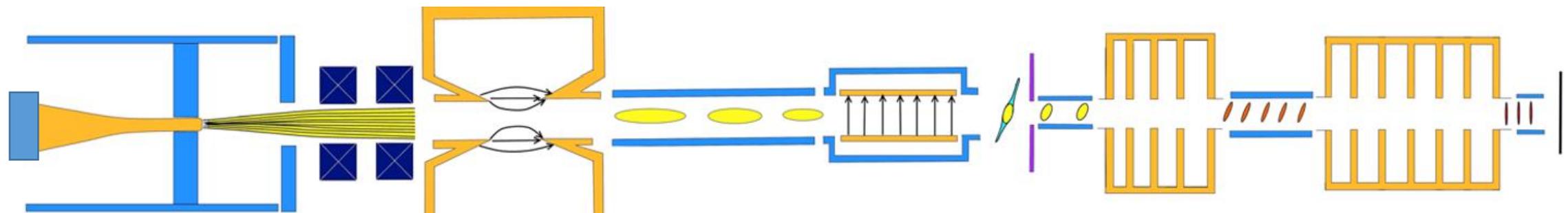
25.08.2025

План лекции

- 1) Некоторые определения
- 2) Основные типы электронной эмиссии
- 3) Формирование электронных пучков
- 4) Тенденции развития источников электронов

Некоторые определения

Источник электронов — устройство, генерирующее пучок заряженных частиц (электронов) с заданными характеристиками для различных применений.



100-160 keV

0. Cathode

1. Electron gun

2. Pre-buncher

3. Chopper

4. Waveguide buncher

5. Accelerator

Некоторые определения

- Источники электронов непрерывного действия.
- Импульсные источники электронов (длительность импульса, частота повторения импульсов, скважность (длительность импульса × частота повторения импульсов))
- Основные параметры источников:
 - Кинетическая энергия на выходе ($E [KeV]$)
 - Энергетический разброс
 - Ток пучка $I [A]$ (средний, импульсный)
 - Эмиттанс
 - Заряд в сгустке
 - Число частиц в пучке
 -



Тип	Ток пучка	Энергия пучка	Длительность импульса пучка/частота повторения	Стабильность энергии/Энергетический разброс	Время жизни катода
СW (электронно-лучевая сварка)	1 - 500 мА	60 КэВ	-----	1 %	500 часов
Pulsed (пушка инжектора СКИФ)	1 А (импульсный)	700 КэВ	1 нс/1 Гц	1 %	20000 часов

Некоторые определения

Вместо переменных (x, P_x) удобно использовать (x, x') , где $x' = \frac{\gamma m \dot{x}}{p_z}$.

Выражение: $\varepsilon_x = \frac{1}{\pi} \int dx dx'$ Называют эмиттансом пучка. [mm · mrad]

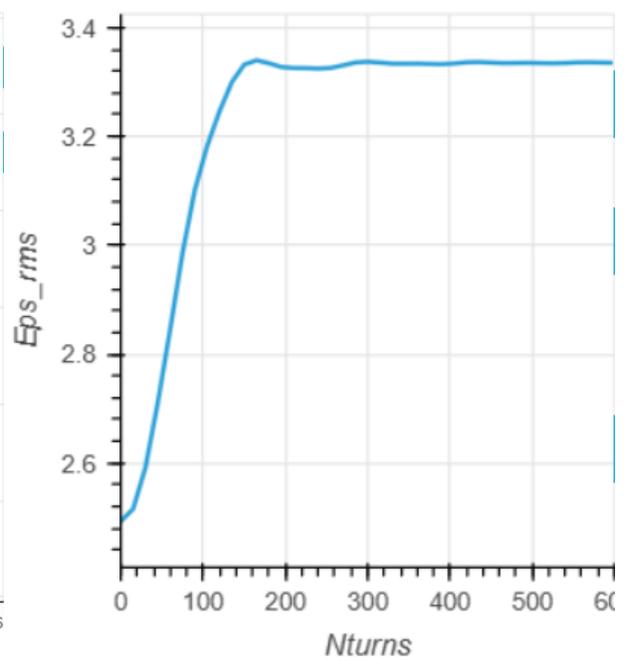
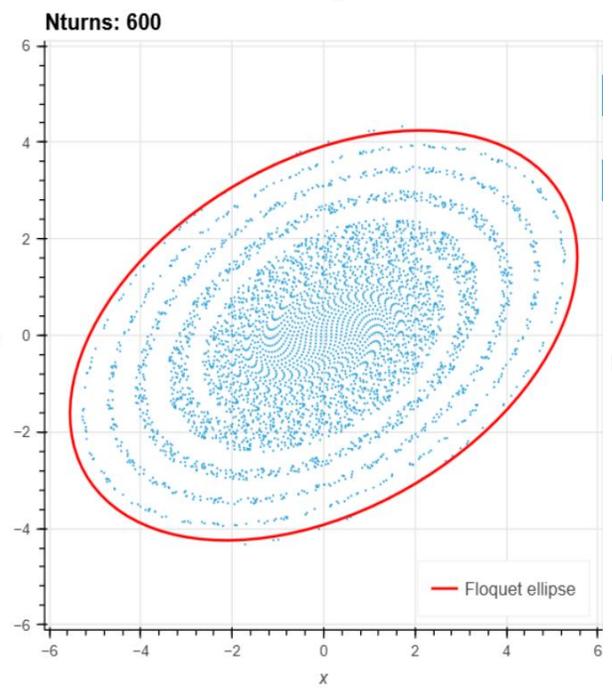
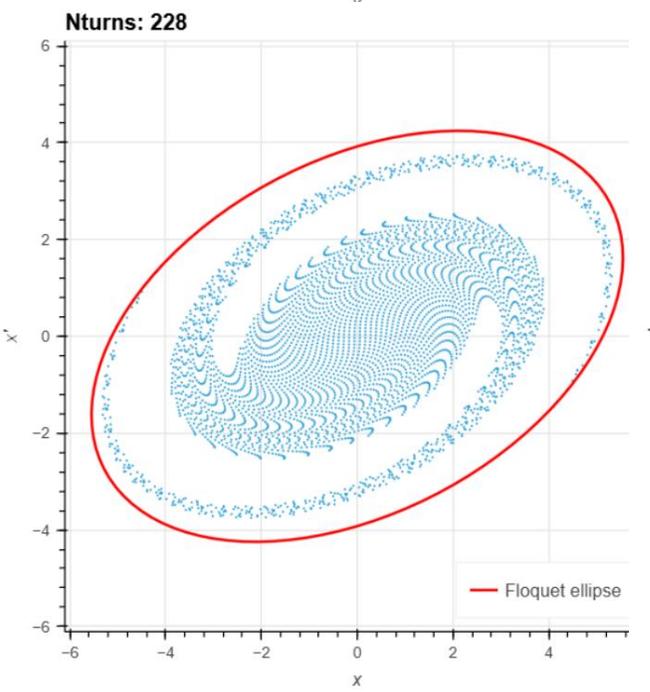
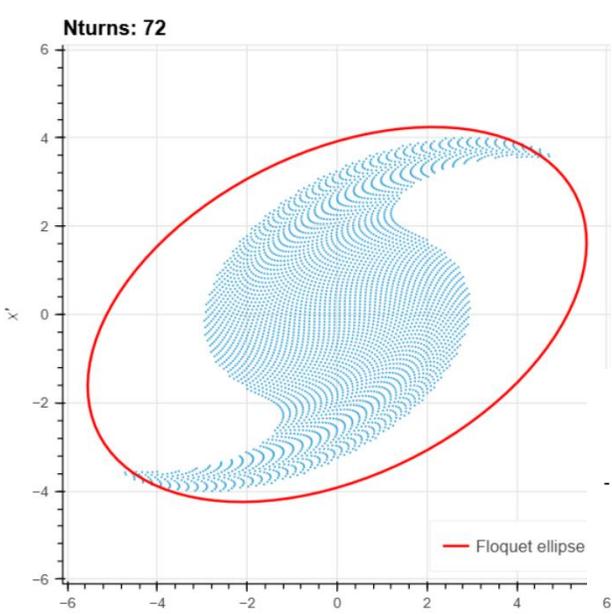
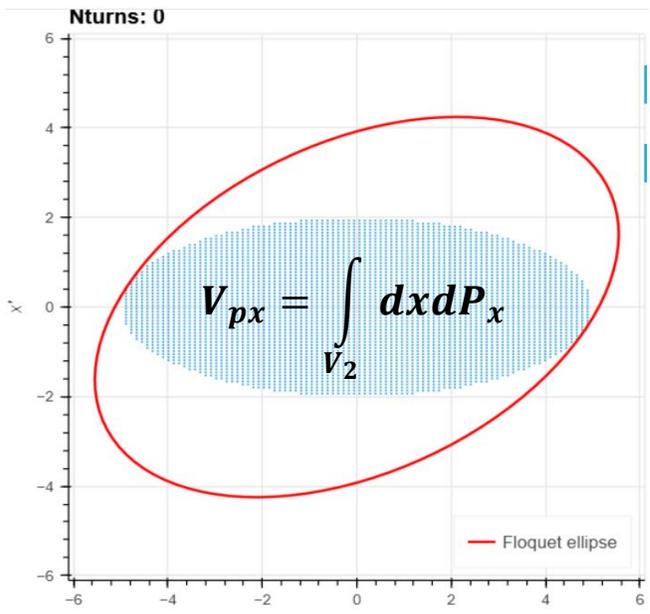
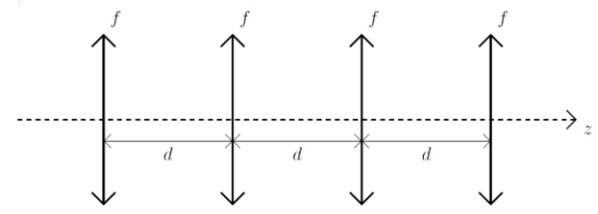
Среднеквадратичный нормализованный эмиттанс: $\varepsilon_{nx} = \beta \gamma \varepsilon_x$

Яркость: $B = \frac{I}{(2\pi)^2 \varepsilon_x \varepsilon_y}$

$$\varepsilon_{rms} = \beta \gamma \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle x x' \rangle^2}$$

Факторы деградации эмиттанса:

- тепловой разброс электронов на катоде;
- шероховатости поверхности катода;
- воздействие рассеянных магнитных полей вблизи поверхности катода;
- нелинейности полей, создаваемых оптикой пушки (включая анодное отверстие) и пространственным зарядом;
- Аберрации фокусирующих линз



$$F_r = e(E_r - V_z B_\varphi)$$

$$F_r = (1 - \beta_z^2) \cdot \left[\left(\frac{\kappa r}{2\pi \varepsilon_0 r_b^2} \right) \right]$$

Основные применения современных источников электронов

- **Физика высоких энергий**

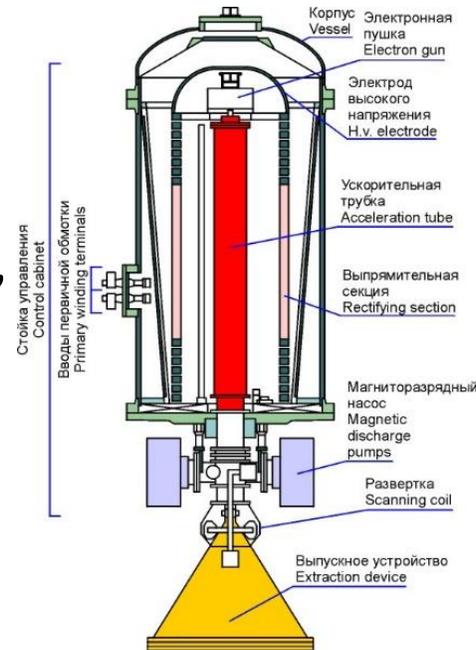
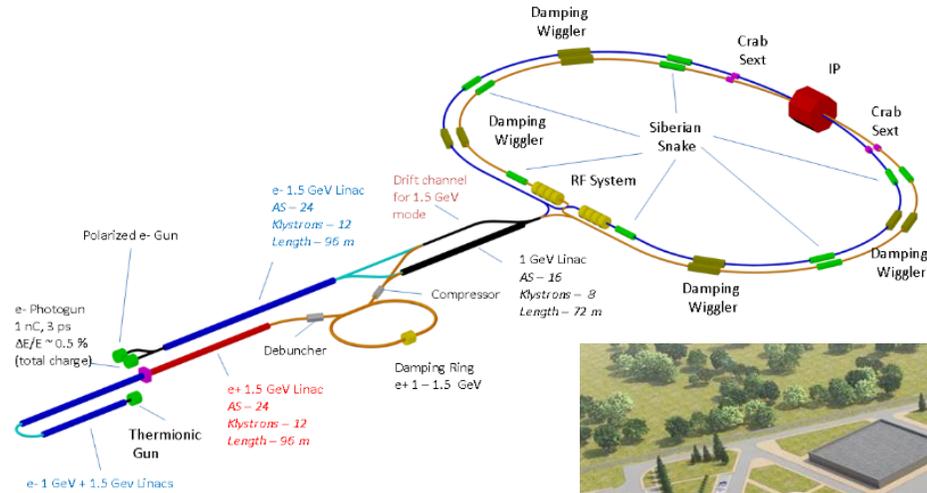
- Встречные пучки частиц и античастиц
- ILC

- **Генерация излучения**

- Современные источники СИ 4-го поколения
- FEL, ERL
- Тормозное излучение
- Обратное комптоновское рассеяние лазерных фотонов на электронах

- **Промышленность, технологии, медицина**

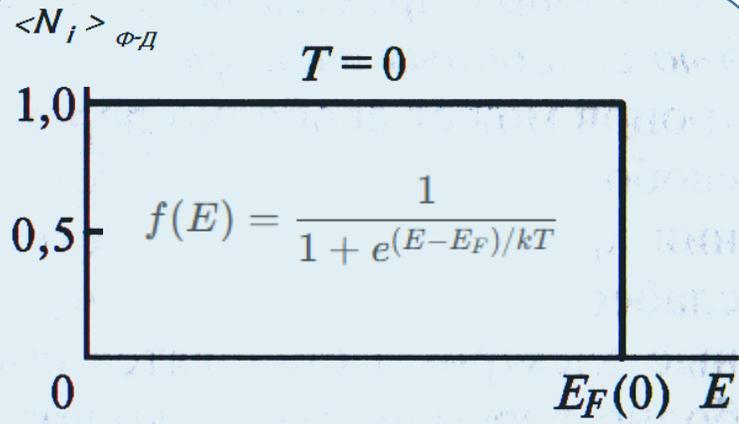
- Электронно-лучевая сварка
- Промышленные ускорители (Стерилизация, медицина, ионная имплантация...)



Эмиссия

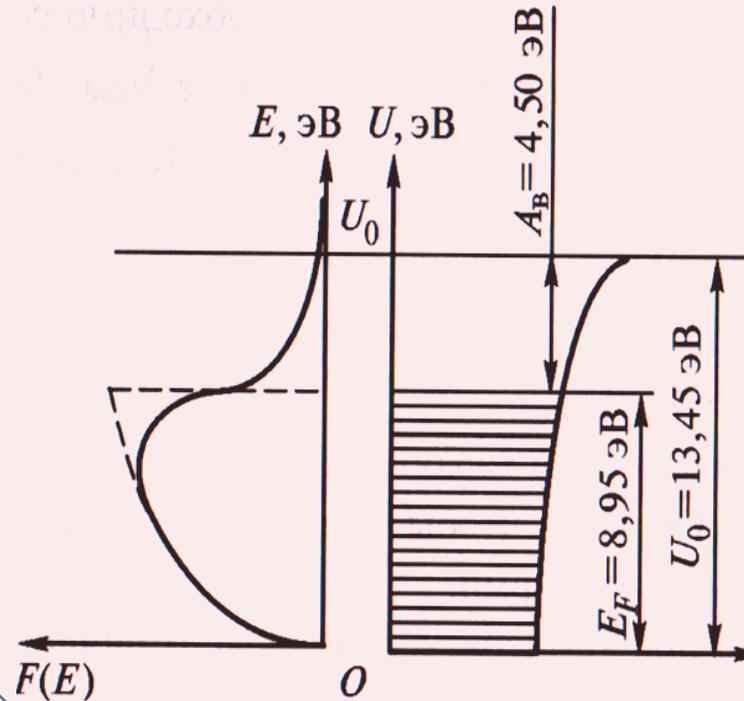
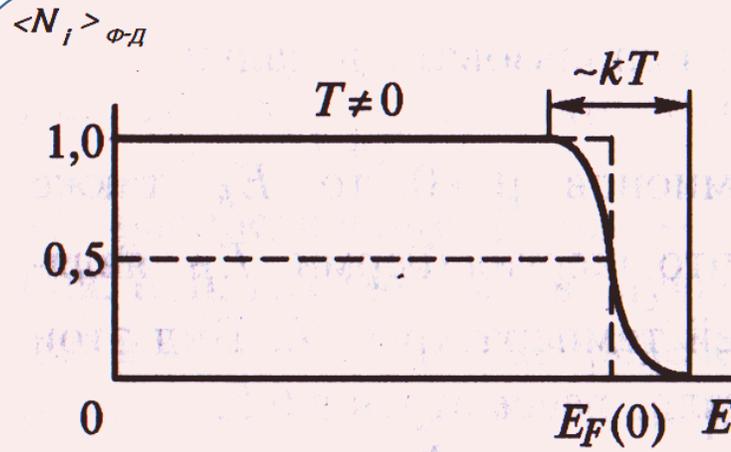
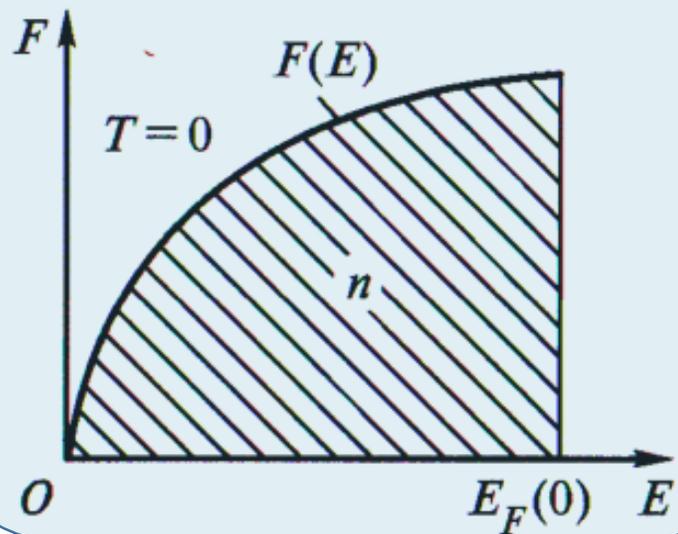
- Эмиссией называется явление испускания частиц с поверхности тел (твёрдых, жидких) в вакуум при сообщении им энергии. Само такое тело называется эмиттером.
- Основные типы электронной эмиссии
 - термоэлектронная;
 - фотоэлектронная;
 - полевая;

Термоэлектронная эмиссия



$T \rightarrow 0$, E_f есть максимальная энергия которой могут обладать фермионы.

$$dn = g(E)f(E)dE$$



Число электронов с $E > E_f + A_B$ определяется "хвостом" распределения.

Чтобы извлечь электрон из металла, необходимо совершить работу выхода: $A_B = U_0 - E_f$.

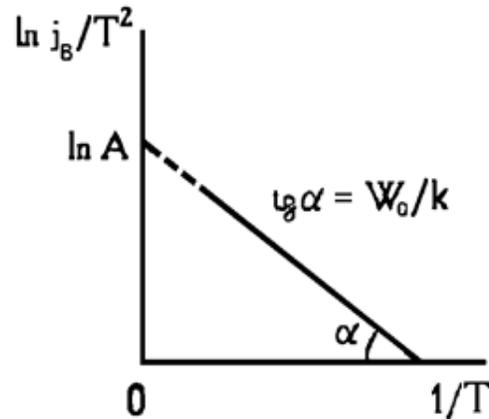
Термоэлектронная эмиссия

При заданном материале и температуре эмитирующей поверхности плотность тока термоэмиссии определяется формулой Ричардсона-Дэшмана:

$$J = \frac{e}{m} \int_{\frac{mv_x^2}{2} > E_f + A_B} n(v_x) v_x dv_x \rightarrow J = AT^2 e^{-\frac{A_B}{kT}} \quad A = \frac{emk^2}{2\pi^2\hbar^3} = 120.4 \left[\frac{A}{(\text{см} \cdot \text{К})^2} \right]$$

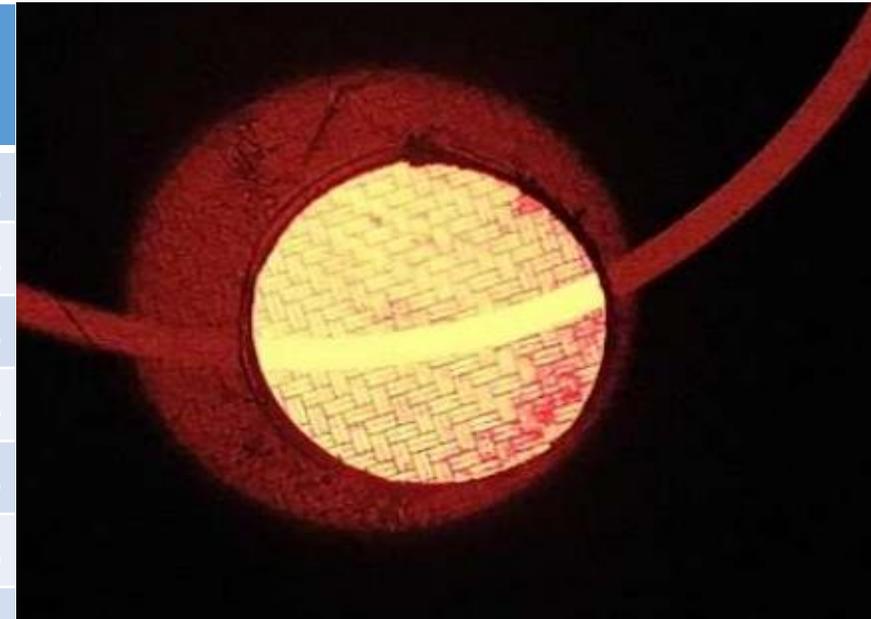


$$\ln \frac{j}{T^2} = \ln A - \frac{A_B}{kT}$$



Металл	W_A , эВ
Вольфрам, W	4.5
Тантал, Та	4.1
Молибден, Мо	4.3
Никель, Ni	5.0

Эмиссии (мА)	Температура (К)
1,1	1373
1,2	1523
1,26	1573
1,4	1773
1,77	1823
2,7	1923
4,5	2023



Металлические катоды (чистые металлы)

Применение чистых металлов в качестве термокатодов ограничено той областью, где последним приходится работать в достаточно неблагоприятных условиях, при которых нормальное функционирование различных катодов активированного типа делается практически невозможным.

Металл	$T_{\text{плавл}} \text{ } ^\circ\text{K}$	$A \text{ а/см}^2 \cdot \text{град}^2$	$\varphi \text{ эВ}$	$T_0 \text{ } ^\circ\text{K}$ для $J = 3 \text{ а/см}^2$	Скорость испарения при $T_0 \text{ } ^\circ\text{K}$ $\text{мг/см}^2 \cdot \text{сек}$
Re	3710	720	4,74	2590	<0,043
W	3655	75	4,55	2780	0,043
Ta	3300	55	4,19	2585	0,043
Mo	2850	51	4,17	2580	14,0
Nb	2770	29	4,01	2560	0,42

Размер таблетки: диаметр 3 мм, толщина 2 мм		
Металл	Скорость испарения (мг/сек)	Время испарения
Re	0.0141	~5.8 часов
W	0.0141	~5.3 часов
Ta	0.0141	~4.6 часов
Mo	4.606	~31.5 секунд
Nb	0.138	~14.6 минут

- Простота изготовления и эксплуатации
- Устойчивы к загрязнениям и примесям в вакуумных системах.
- Возможность механической обработки (точение, шлифовка) перед установкой в прибор
- Высокая рабочая температура/ограниченная плотность тока
- Высокая скорость испарения при больших плотностях тока

Металлические катоды (+ моноатомные пленки)

Первые эффективные термокатоды представляли собой металлы, покрытые моноатомными плёнками активного вещества. Первым, наиболее известным и довольно широко применяемым катодом этого типа был торированный вольфрам, Th-W.

Система	A $a/cm^2 \cdot град^2$	φ эв	$T_{раб}$ °K	$J_{T, \gamma}$ a/cm^2
Th-W	3,0	2,6	2000	3,0
Ba-W	2,0	1,6	1320	3,0
Cs-W	3,2	1,4	1540	50
			1400	79

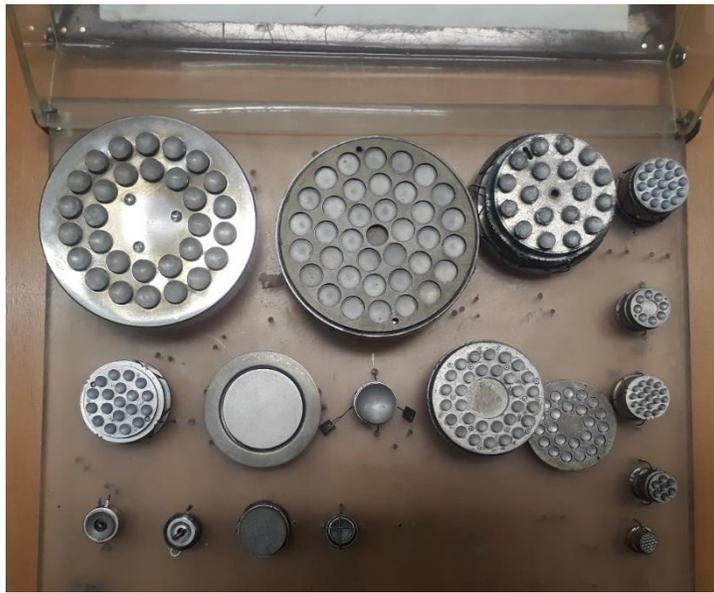
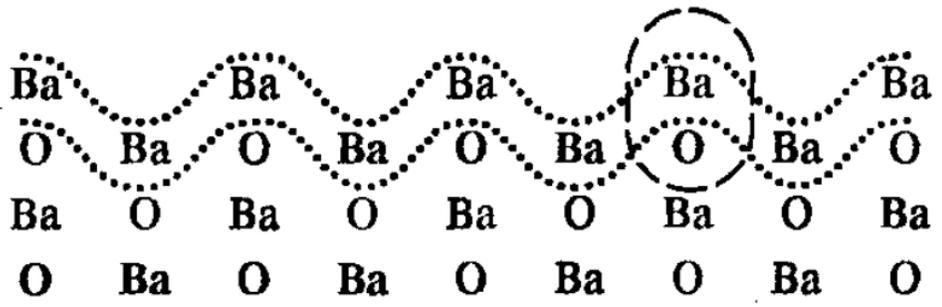
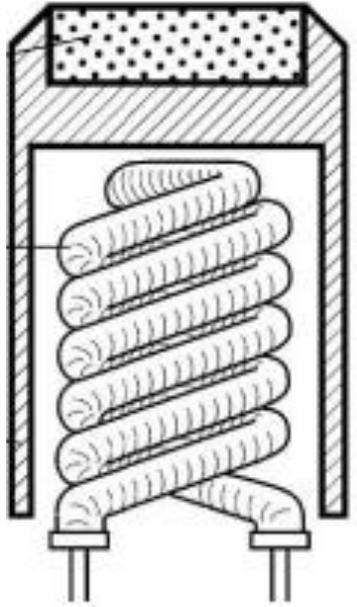
- Низкая работа выхода
- Низкая рабочая температура
- Чувствительность к загрязнениям и уровню вакуума
- Неравномерность эмиссии

Неметаллические катоды (оксидный катод)

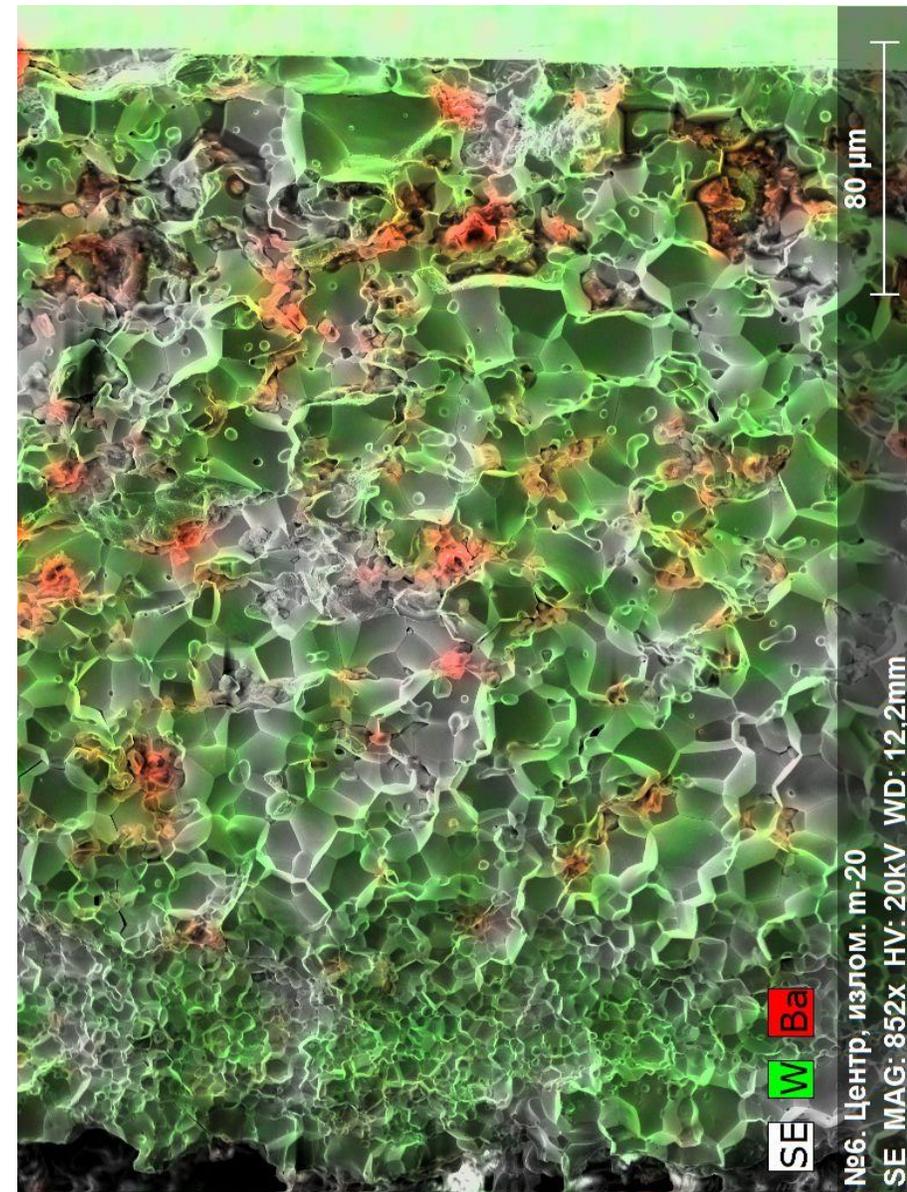
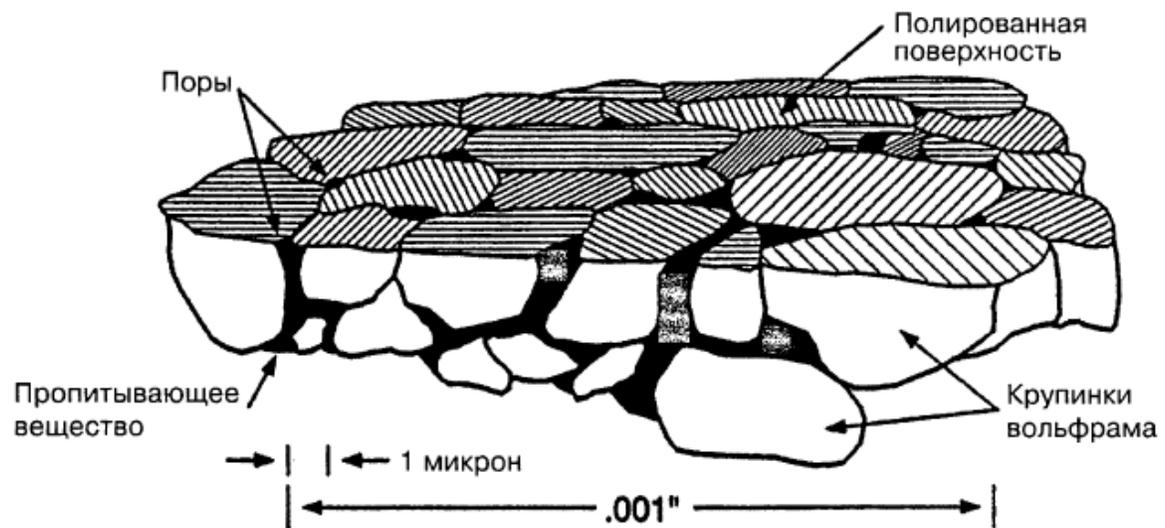
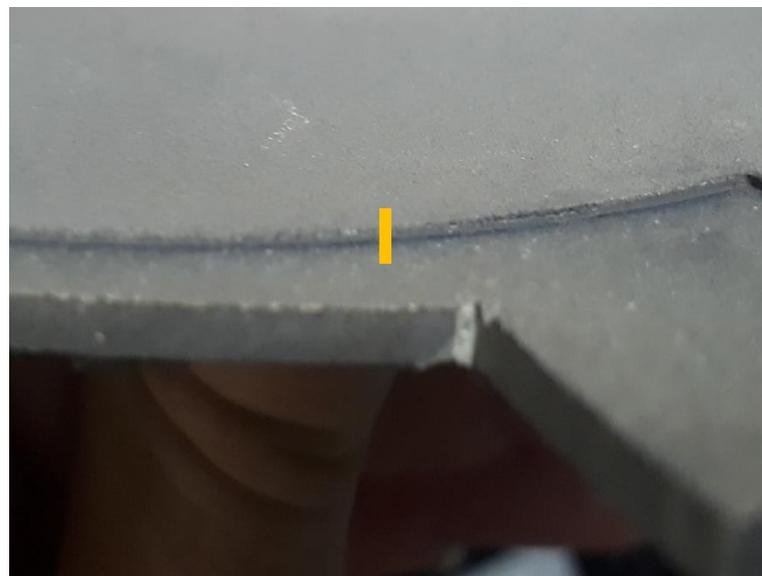
Оксиды щёлочно-земельных металлов:



Структуру оксидного катода можно представить схематически следующем виде - на металлической (обычно никелевой) подложке лежит основной слой оксида толщиной 10ки мкм, состоящий обычно из смеси окислов бария или стронция с соответствующей при месью атомарного Ba или Sr. В своём рабочем режиме этот катод накалиён до температуры ~ 1100° K и помещён в условия высокого вакуума;



Металлопористый оксидный катод



Бориды

Основаны на различных щёлочно-земельных или редкоземельных металлов с бором типа MV_6 : CaV_6 , SrV_6 , **LaV_6** , CeV_6 .

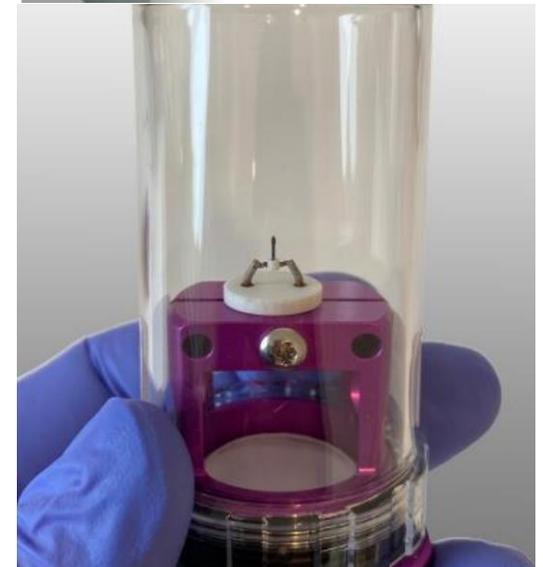
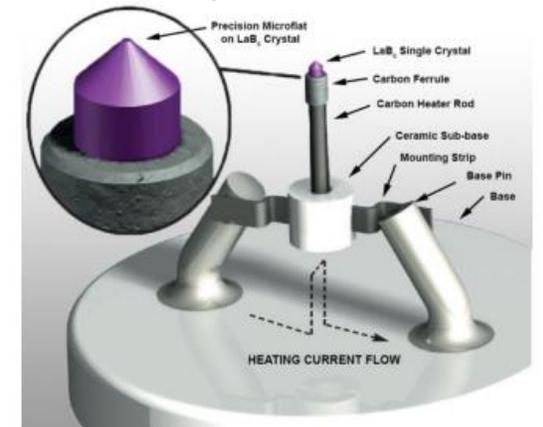
Первая статья Лафферти (1951 год)

Для объяснения высоких термоэмиссионных свойств Лафферти предложил теорию диффузного перемещения активных атомов лантана на поверхность катода которые образуют эмитирующую пленку на поверхности

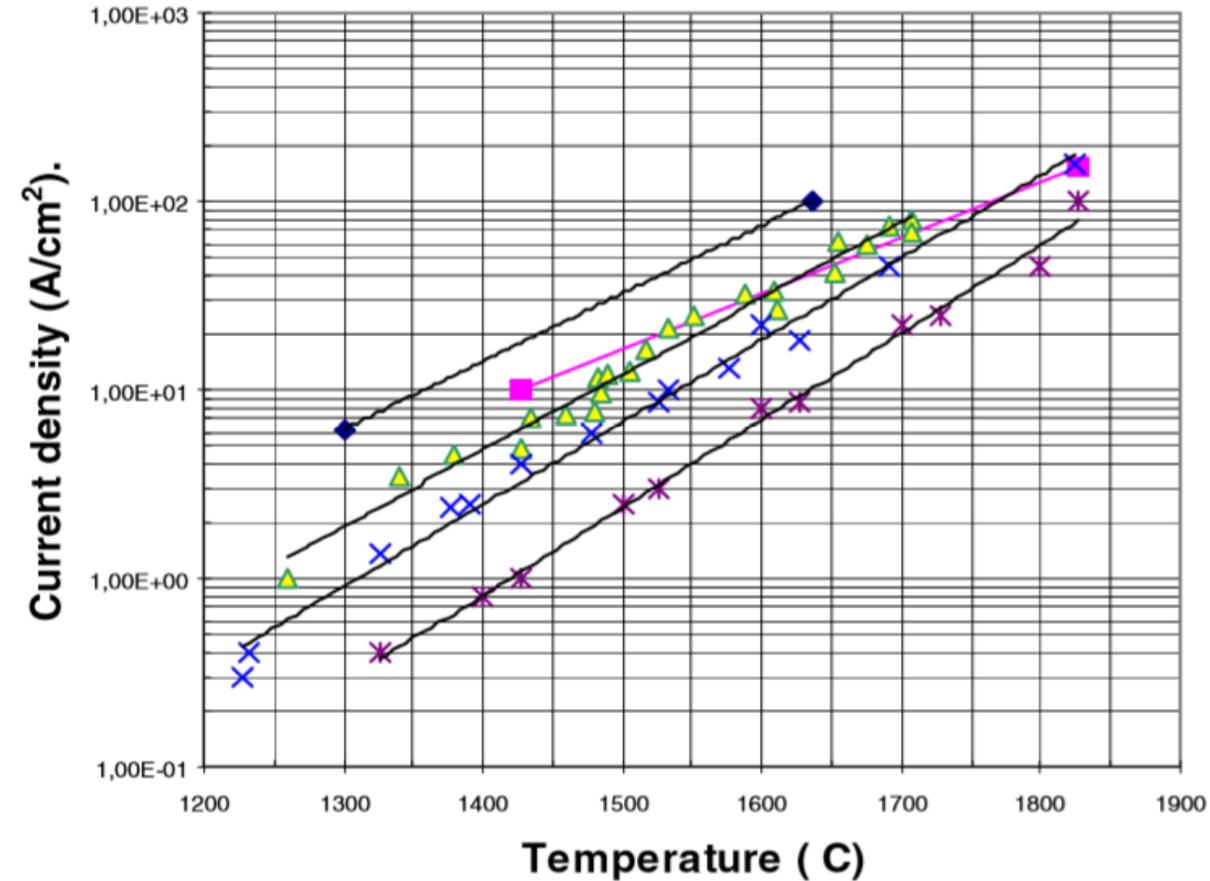
Порошок:



Кристалл:



Металлосплавные катоды



- ◆ IrCe, IrLa [#2]
- IrCe [#1]
- ▲ IrCe, IrLa [#3]
- × LaB6 [100] [#4]
- × LaB6 [#5]



Rozhkov S.E., Kultashev O.K., Gugnin A.A., "Technical Characteristics of Thermoemitters from Iridium-based Alloys with Lanthanum, Cerium and Praseodmium," *Generatoryie, Modulatornye I Rentgenovskye Pribory*, 2, Moscow, 1969, pp. 81-83 (in Russian).

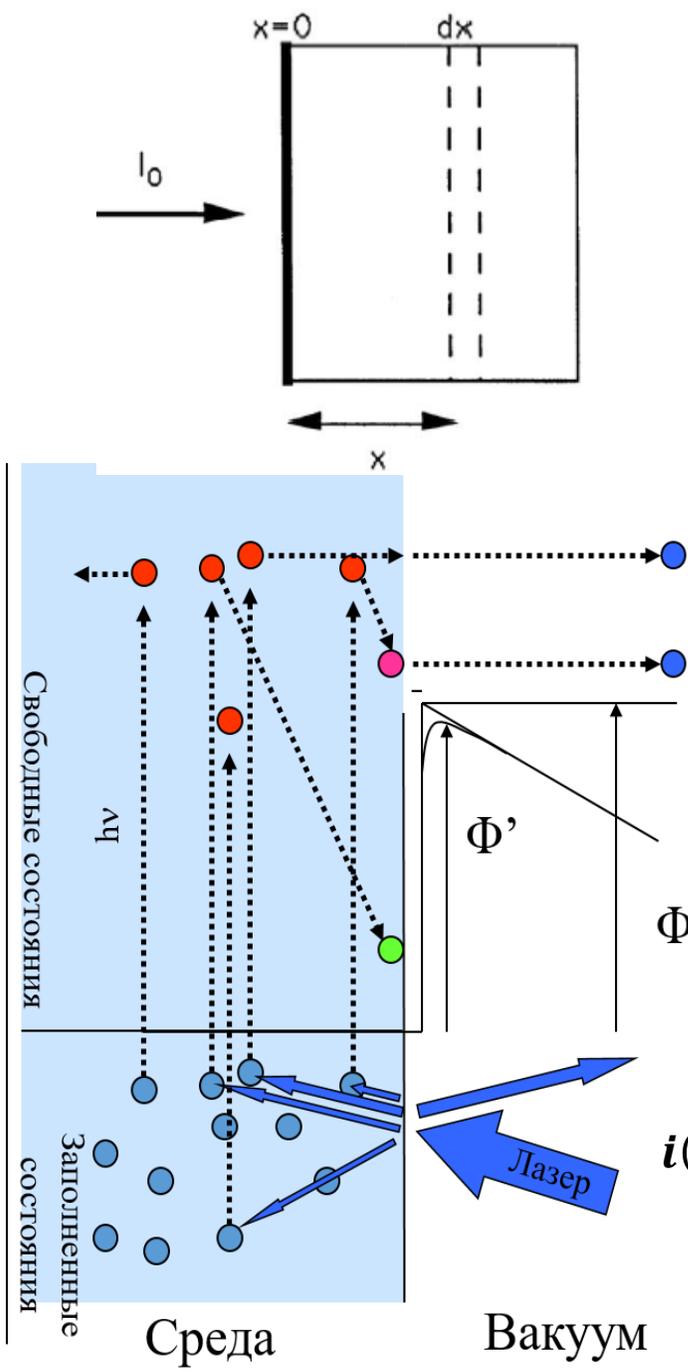
ФОТОЭМИССИЯ

$$h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + \frac{m_e v_{\text{max}}^2}{2}$$

Красная граница фотоэффекта:

$$\nu \geq \nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{out}}}{h} \quad \lambda_{\text{max}} = \frac{hc}{A_{\text{out}}}$$

El.	Nb	Ca	Ba	Mg	Cu
eV	4.0	2.9	2.5	3.66	4.3
nm	310	425	496	339	288



1) Поглощение фотонов и фотовозбуждение из валентной зоны в зону проводимости:

$$P_{\alpha}(h\nu, x, dx)$$

2) На протяжении второй стадии фотоэлектроны движутся к поверхности катода (диффузия):

$$P_T(h\nu, x)$$

3) Выход в вакуум

$$P_E(h\nu)$$

ФОТОЭМИССИОННЫЙ ТОК ИЗ СЛОЯ вещества толщиной dx равен:

$$di(x) = P_{\alpha}(h\nu, x, dx) \cdot P_T(h\nu, x) \cdot P_E(h\nu)$$

Общий фотоэмиссионный ток равен:

$$i(x) = \int_0^{\infty} di(x) \cdot dx = (1 - R) \cdot I_0 \cdot \frac{\alpha_{PE}}{\alpha + L} \cdot P_E(h\nu)$$

Krolikowski and Spicer, Phys. Rev. 185 882 (1969), M. Cardona and L. Ley: Photoemission in Solids 1, (Springer-Verlag, 1978)

ФОТОЭМИССИЯ

$$i(x) = \int_0^{\infty} di(x) \cdot dx = (1 - R) \cdot I_0 \cdot \frac{\alpha_{PE}}{\alpha + \frac{1}{L}} \cdot P_E(h\nu)$$

l_a – глубина оптического поглощения

$L(h\nu)$ - длина выхода, определяемая механизмом рассеяния в твердом веществе.

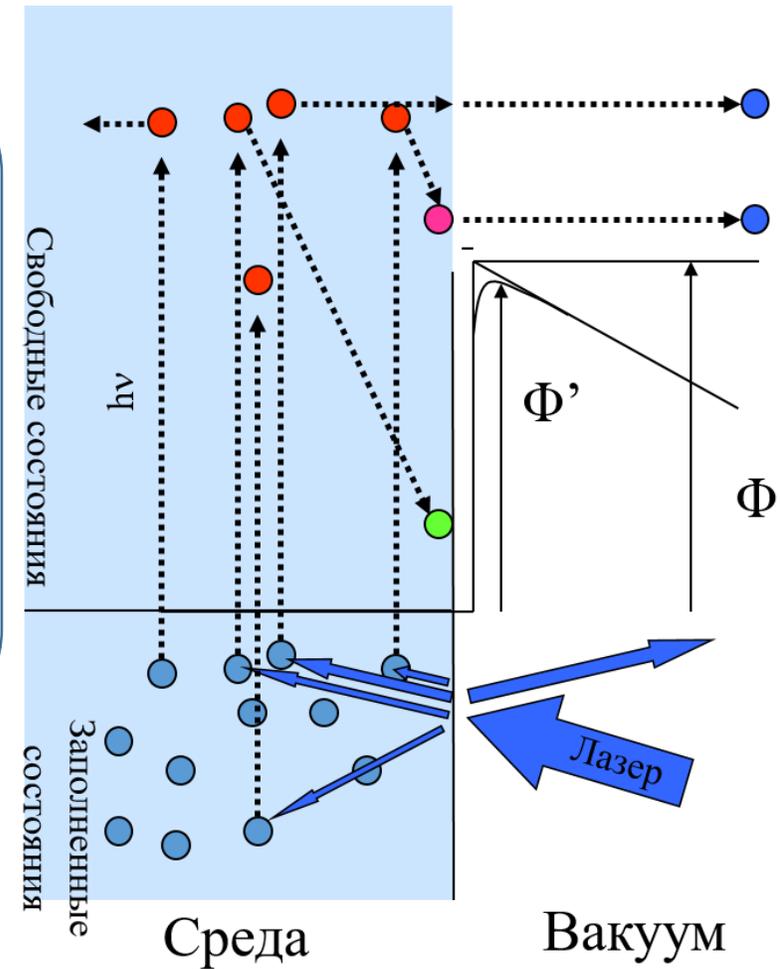
$P_E(h\nu)$ – эмпирическая константа

$\alpha_{PE}(h\nu)$ - часть поглощения в которой электроны возбуждаются с энергией больше уровня вакуума

$$QE = \frac{i}{I_0} = (1 - R) \frac{\frac{\alpha_{PE}}{\alpha}}{1 + \frac{l_a}{L}} \cdot P_E$$

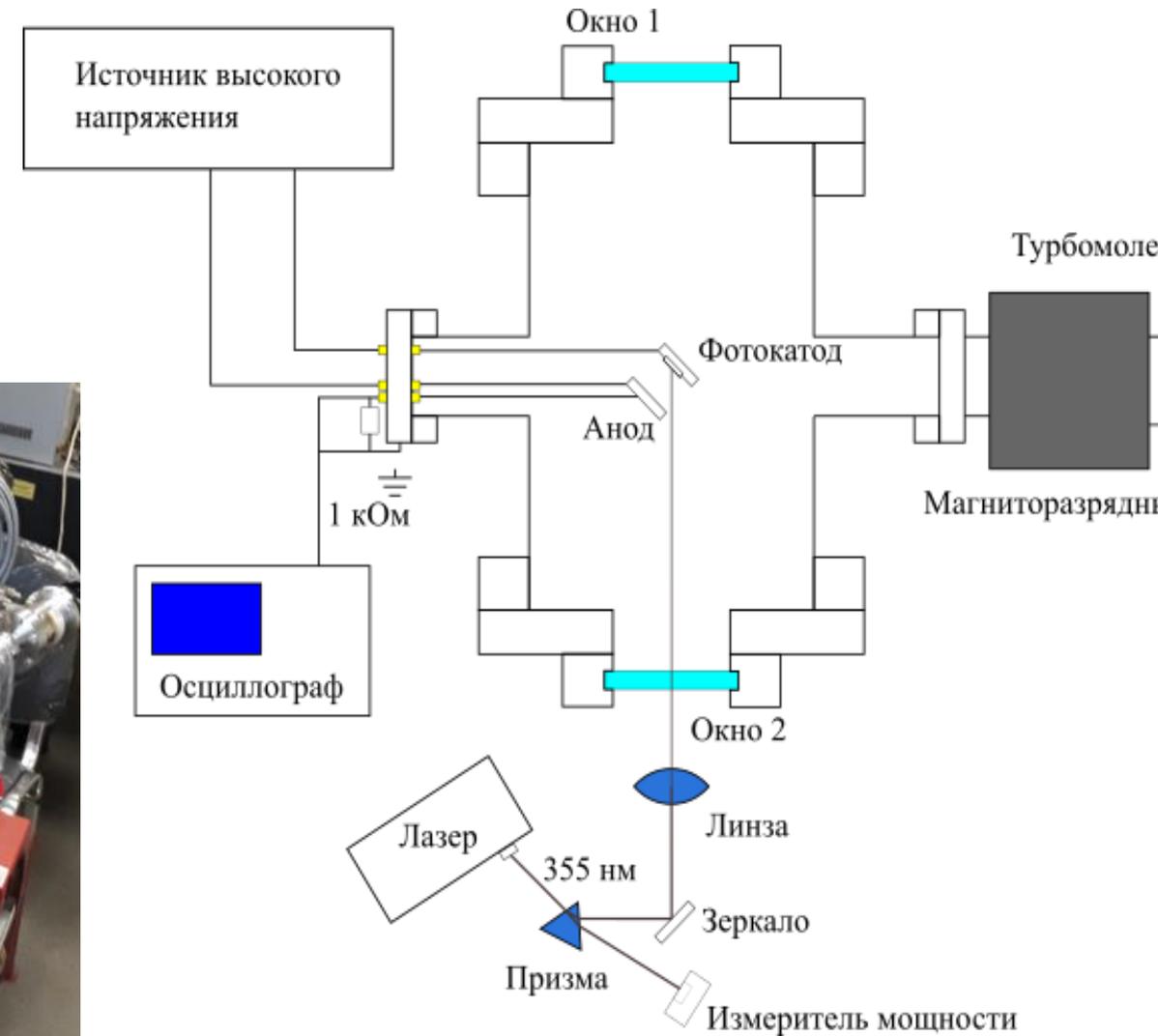
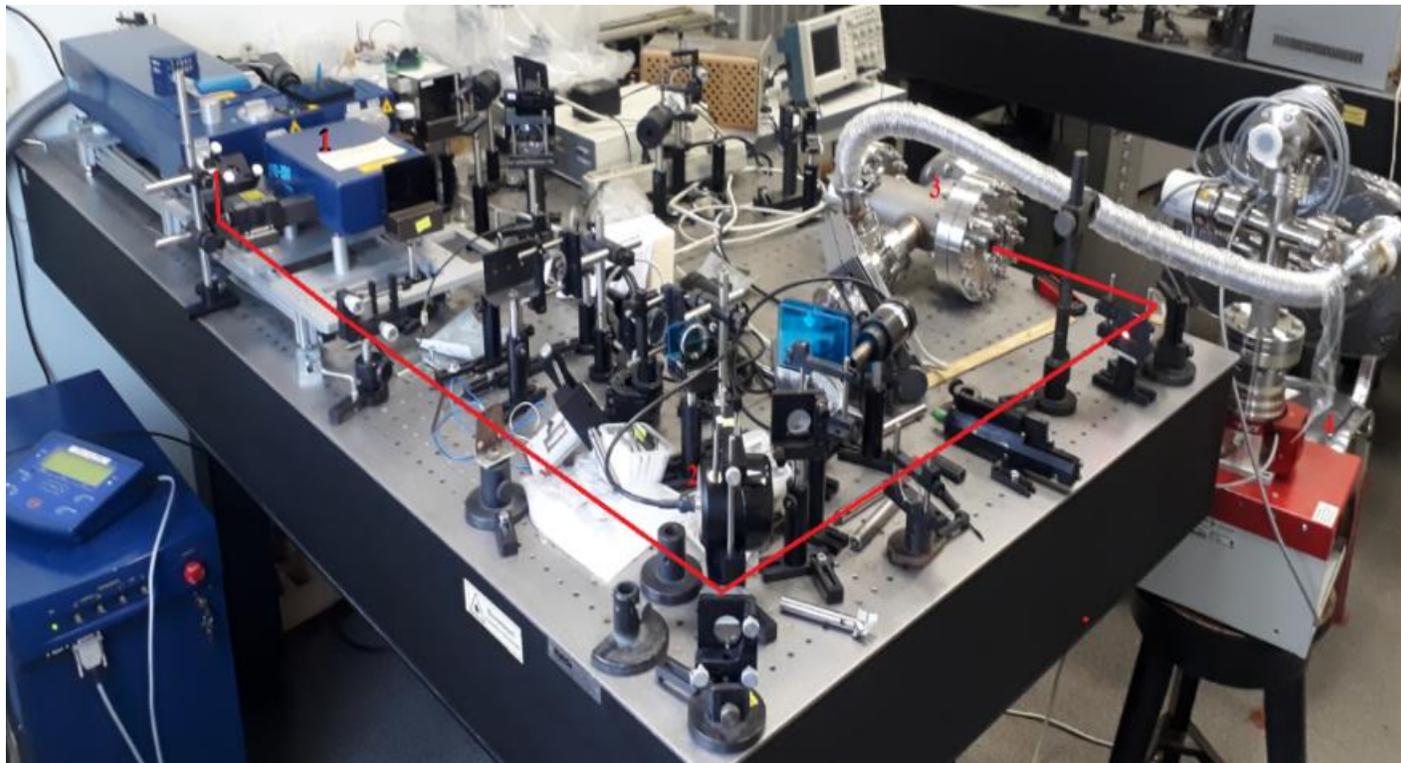
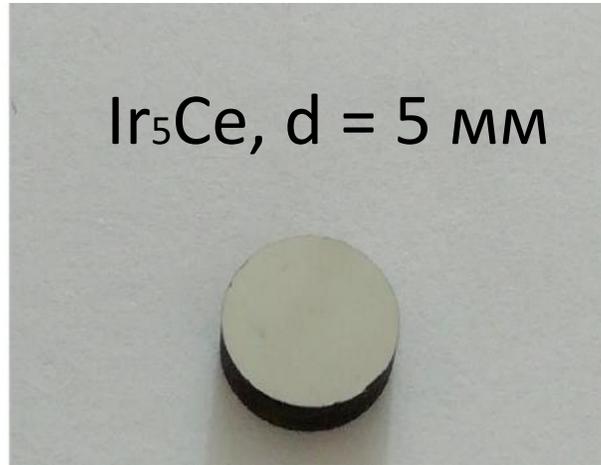
Металлические фотокатоды :

- 1) $L \ll l_a$ - Большинство фотоэлектронов теряют энергию при столкновении с электронами из зоны проводимости и приходят к поверхности с энергией меньше энергии уровня вакуума.
- 2) $\frac{\alpha_{PE}}{\alpha} \ll 1$ - это связано с большой величиной работы выхода, даже в активированном состоянии и с большой шириной заполненной части зоны проводимости.
- 3) У металлов коэффициент отражения света R от поверхности близок к единице .



$$Q \sim 10^{-4} - 10^{-5}$$

Измерение квантовой эффективности



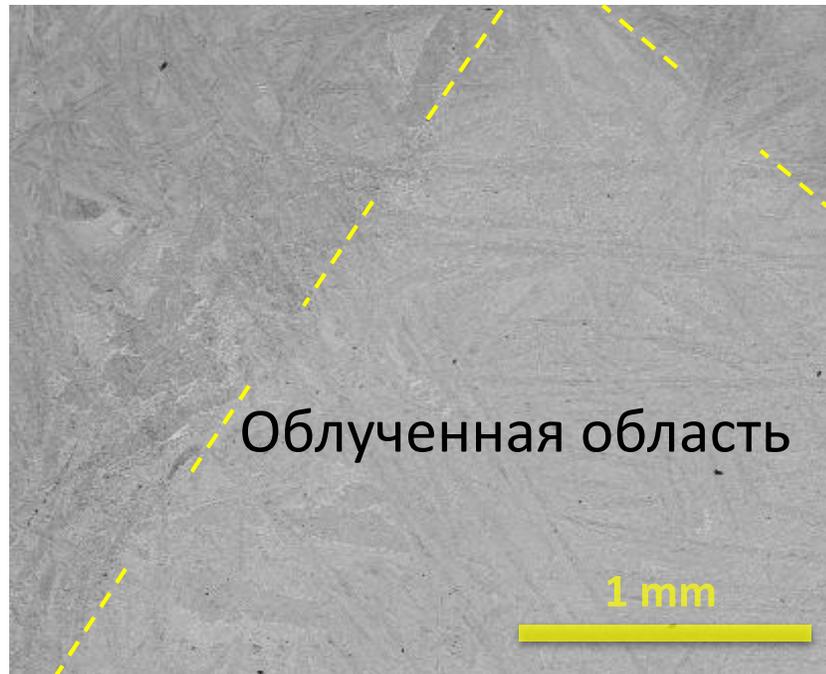
Эффект лазерной чистки поверхности катода



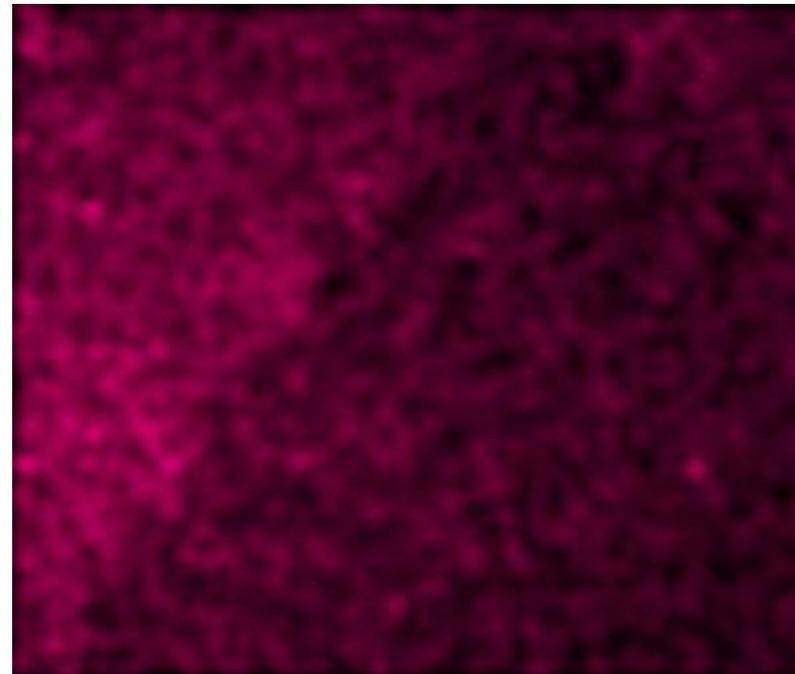
Фотокатод облучался лазерными импульсами с плотностью энергии 19.4 mJ/cm^2 , число импульсов было $1.8 \cdot 10^4$

Для энергии лазера $38 \text{ }\mu\text{J}$ и напряжении анода 5 kV , квантовая эффективность возросла с $6,27 \cdot 10^{-6}$ до $9.69 \cdot 10^{-5}$. (266 nm)

Сканирующий микроскоп:



Распределение кислорода:



Лазерная чистка уменьшила количество окислов на поверхности

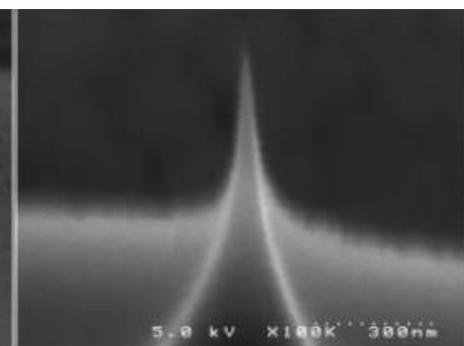
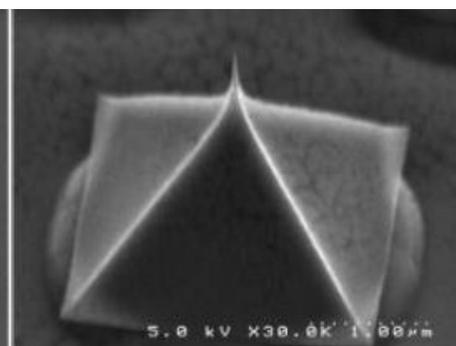
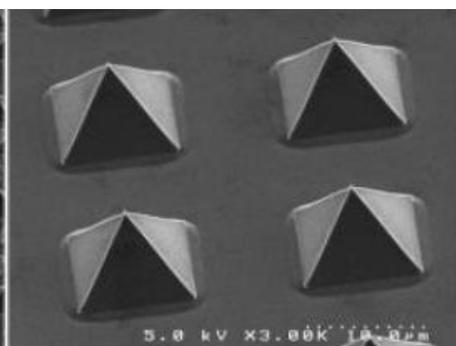
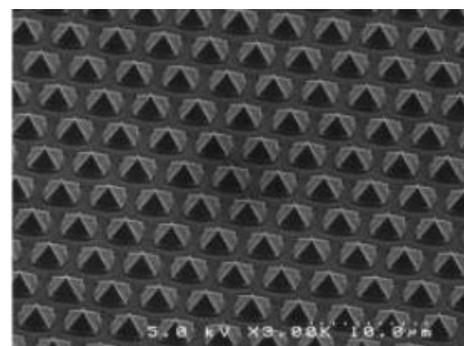
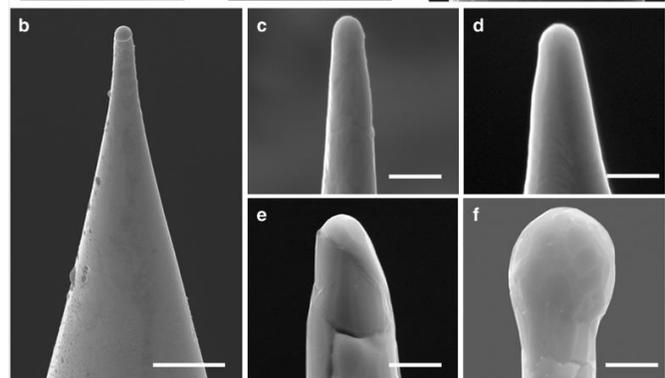
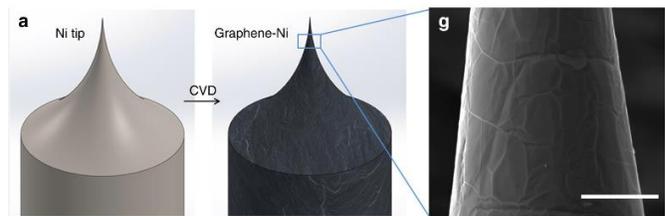
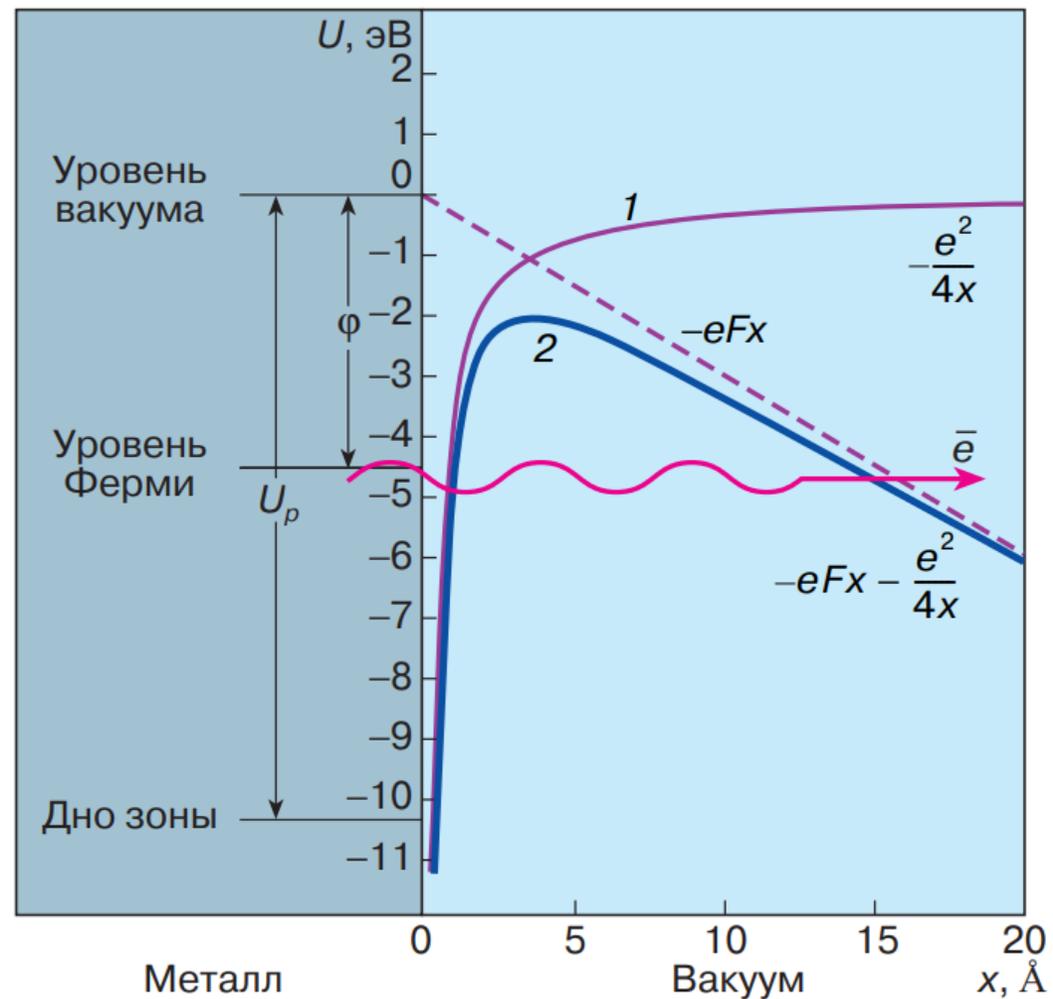
Полевая электронная эмиссия

Явление полевой эмиссии заключается в испускании электронов телами под действием внешнего электрического поля у их поверхности. При этом:

$$j\left(\frac{A}{\text{см}^2}\right) = 1,54 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{\phi} \exp\left\{-\frac{6,79 \cdot 10^7 (\phi)^{\frac{3}{2}}}{E} \times \theta\left(\frac{3,62 \cdot 10^{-4} E^{\frac{1}{2}}}{\phi}\right)\right\}$$

$\phi \rightarrow (\text{эВ}), E \rightarrow \left(\frac{B}{\text{см}}\right), \theta(x) \rightarrow \text{функция_Нордгейна}$

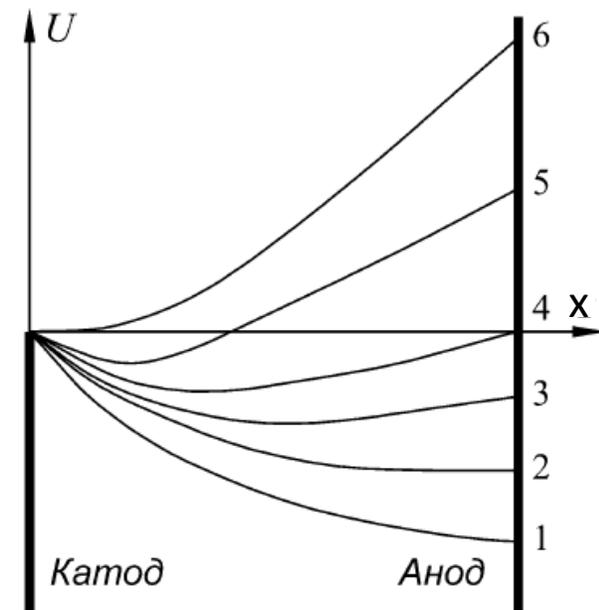
Можно отметить, что полевая эмиссия зависит от электрического поля так же, как термоэмиссия зависит от температуры.



Формирование электронных пучков

ПЛОСКИЙ ДИОД

- Потенциал катода равен нулю, а потенциал анода U_a можно регулировать.
- Без учёта пространственного заряда эта система представляла бы собой обычный плоский конденсатор с линейно возрастающим потенциалом и однородным полем.
- Пространственный заряд вызовет уменьшение потенциала пространства, следовательно, $\varphi(x)$ будет иметь минимум на каком-то расстоянии от катода



Предположим, что плоский диод имеет бесконечный размер во всех направлениях, следовательно имеет место изменение только в направлении x :

$$\Delta\varphi = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

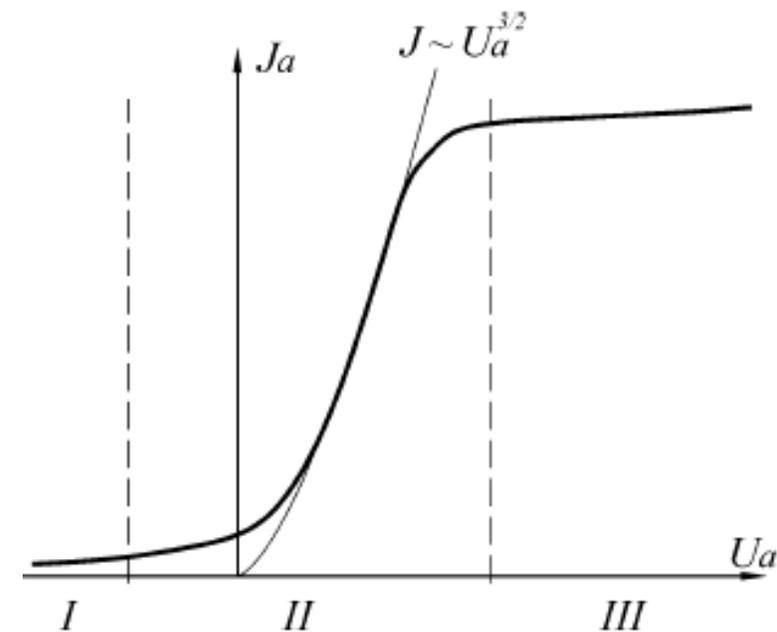
$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, J = \rho\vec{v}$$

$$J = \frac{4}{9}\varepsilon_0\sqrt{2\eta}\frac{\varphi^{3/2}}{x^2} = 2.33 \cdot 10^{-6}\frac{\varphi^{3/2}}{x^2}$$

Для диода с расстоянием катод-анод равным d закон обычно записывают в виде:

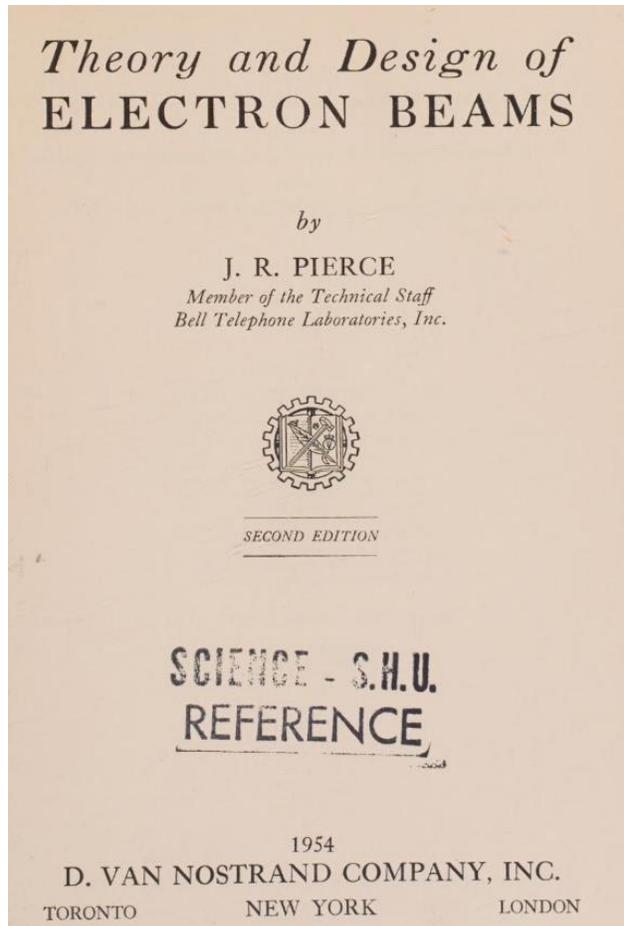
$$I = P\varphi^{3/2}$$

где $I = JS$, S – площадь катода, $P = \frac{4}{9}\frac{\varepsilon_0\sqrt{2\eta}}{d^2}S = 2.33 \cdot 10^{-6}\frac{S}{d^2}$ – называется **первеансом**.

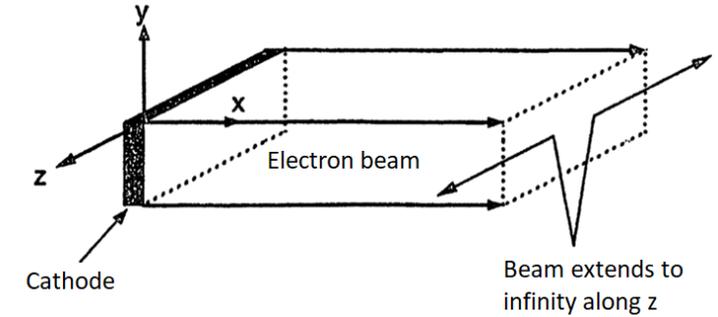
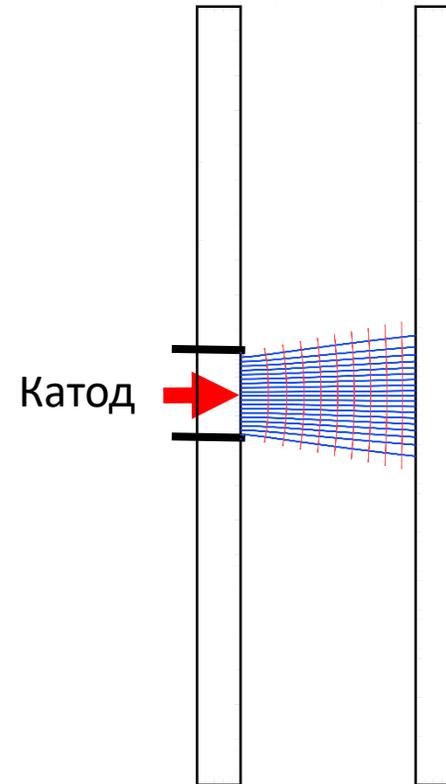
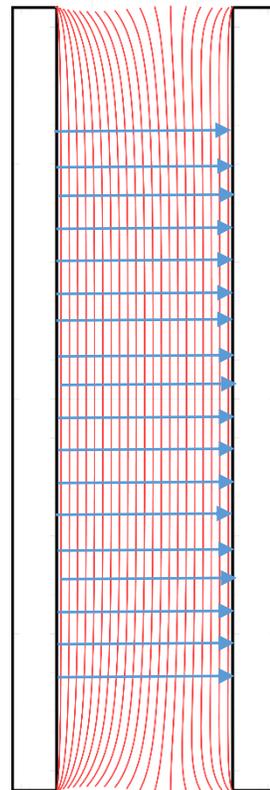


Формирование пучка в термоэмиссионной пушке

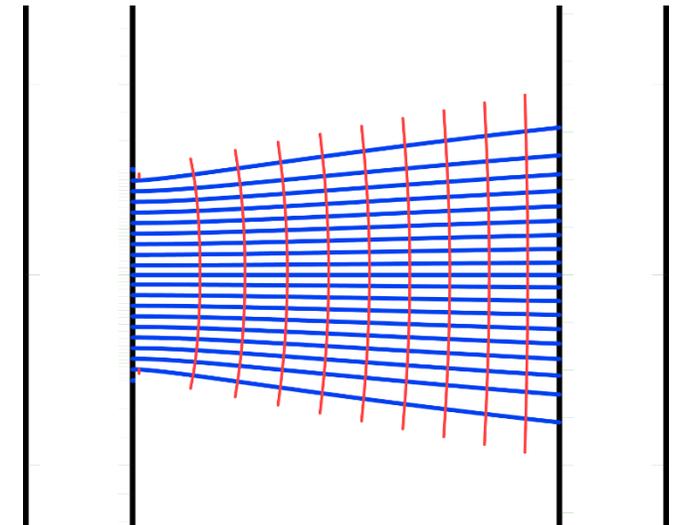
Впервые проблему формирования пучка в пушке рассмотрел американский физик Джон Пирс в 40х годах.



При отсутствии электронов эквипотенциальные линии в плоском диоде параллельны:



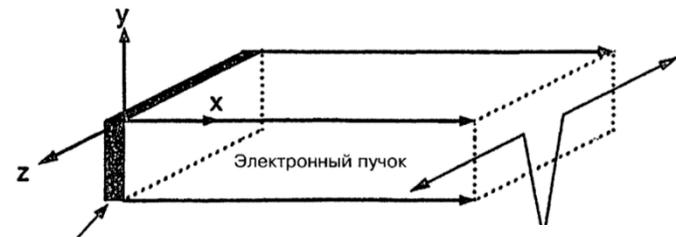
В присутствии электронов эквипотенциальные линии изгибаются вправо:



UltraSAM simulations

Фокусирующие электроды для параллельного потока

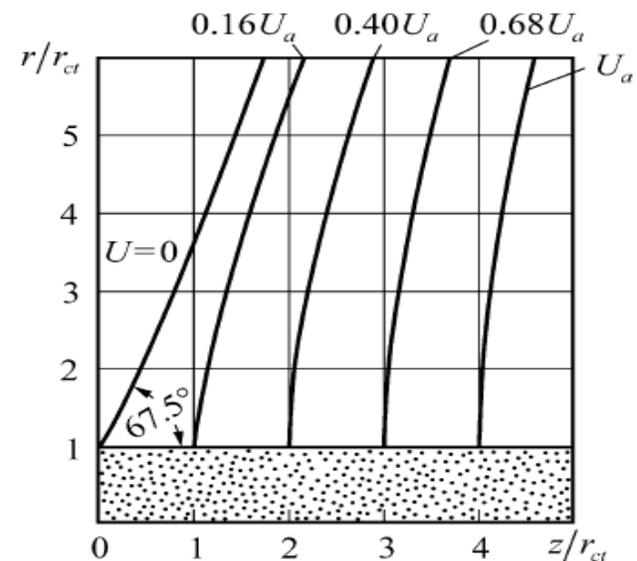
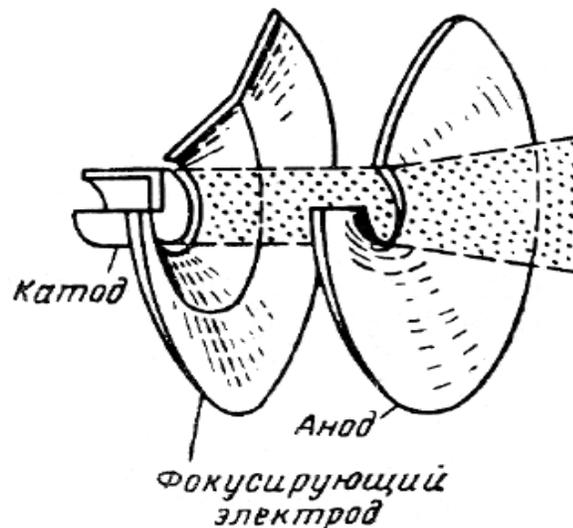
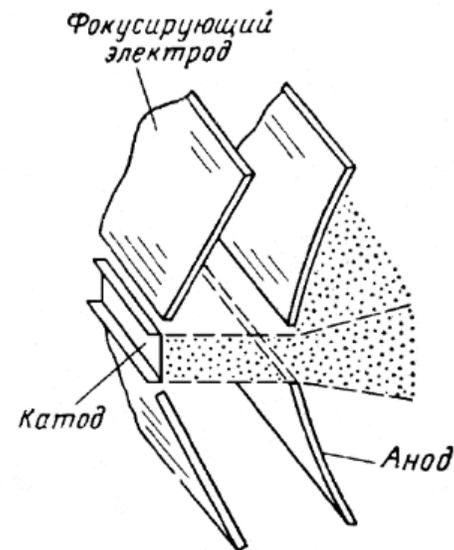
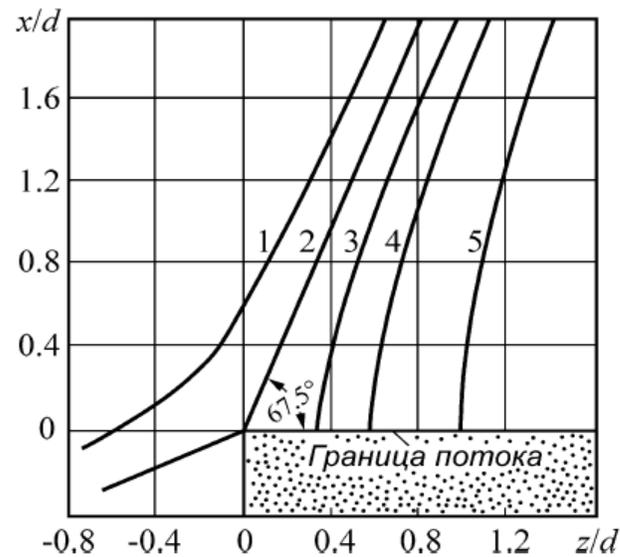
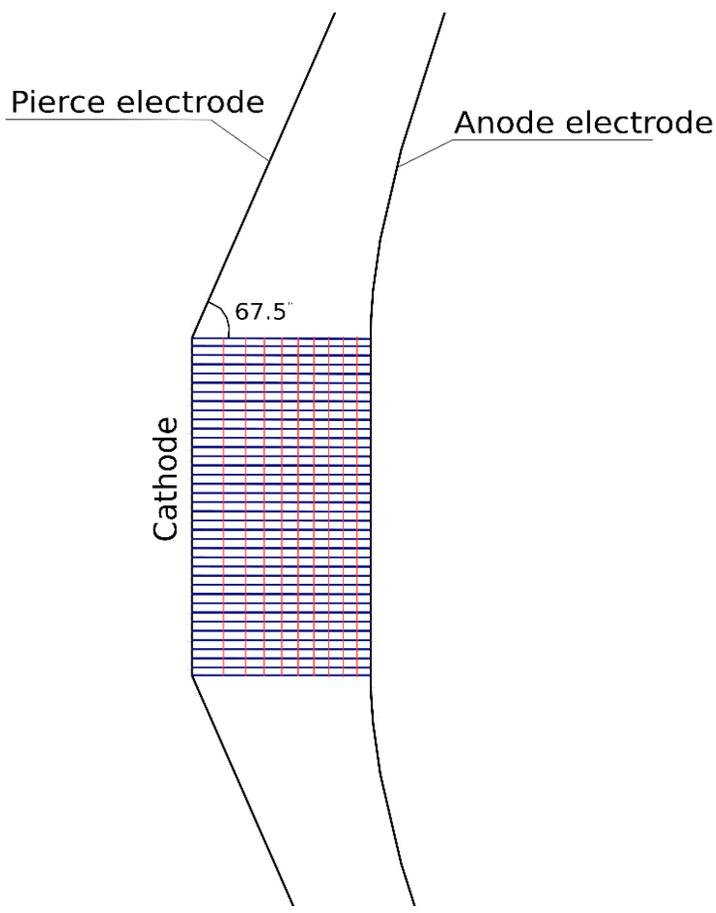
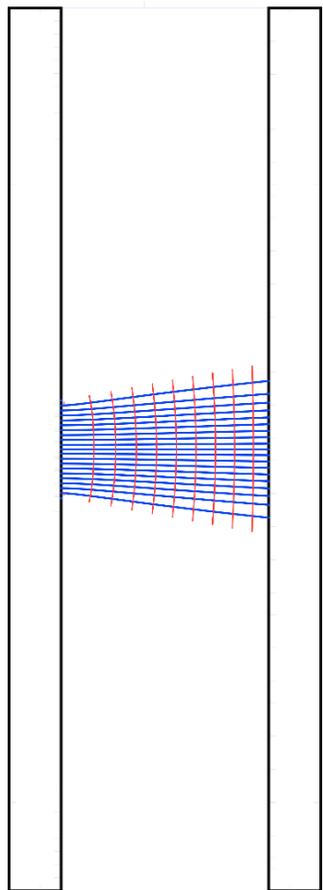
Электрод Пирса — это проводящая поверхность, которая имитирует продолжение пучка в пустом пространстве. Для достижения параллельных траекторий электронов поля вдоль осей y и z должны отсутствовать, потенциал может изменяться только в направлении оси x :



$$\varphi = f(x), E_y = \frac{d\varphi}{dy} = 0, \frac{d\varphi}{dz} = 0$$

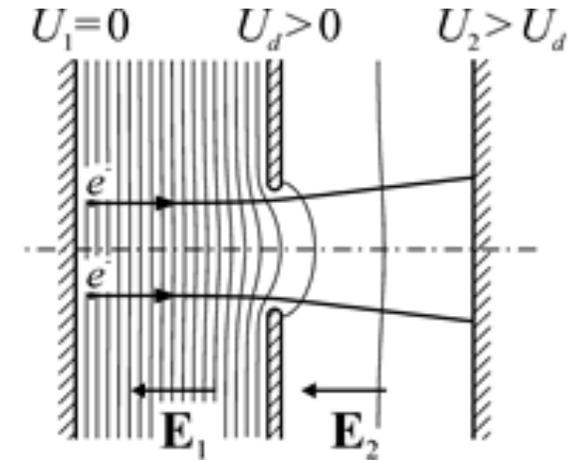
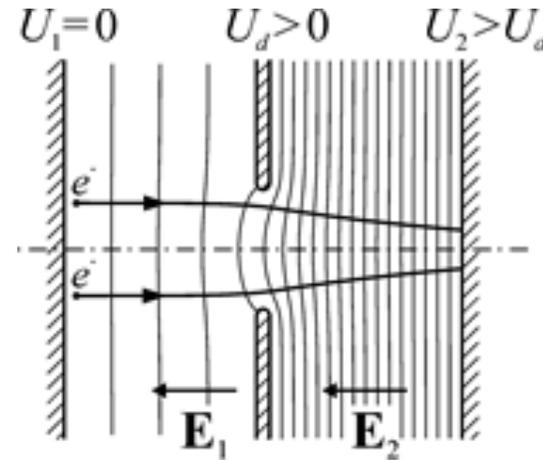
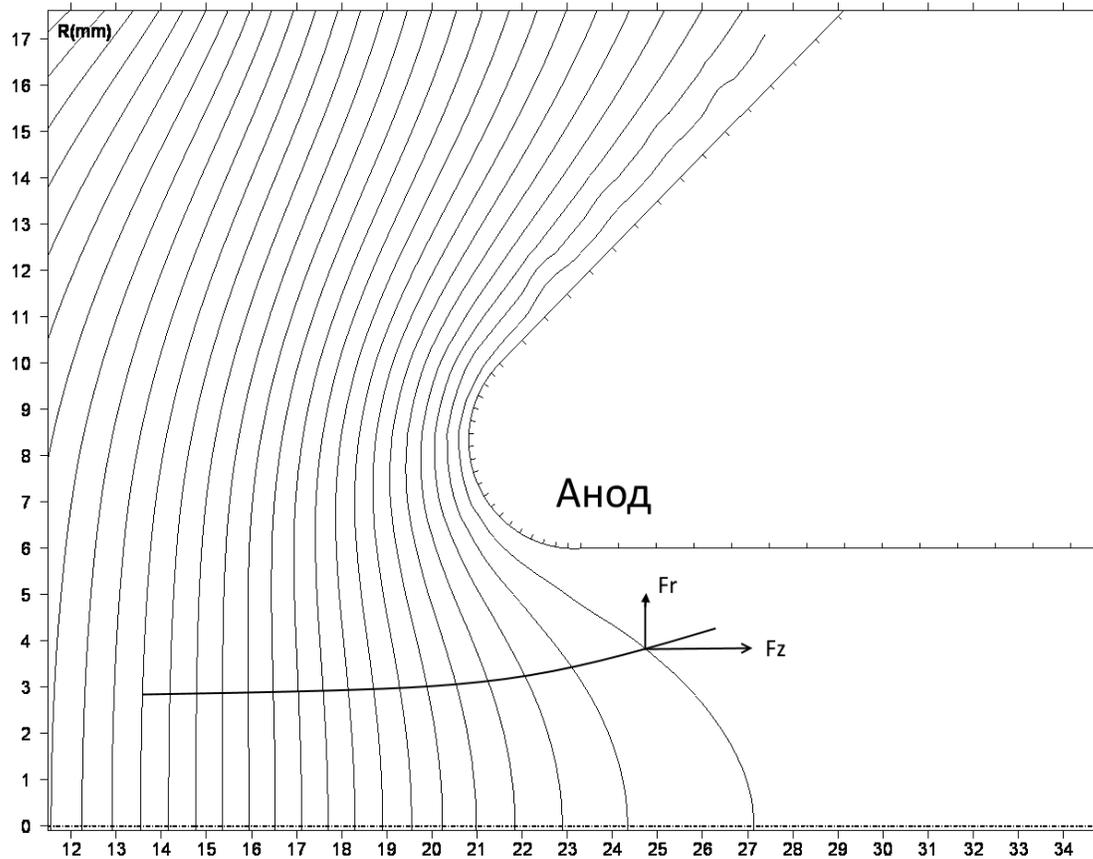
$$\vartheta = \frac{3\pi}{8} = 67.5^\circ \text{ (Для } \varphi = 0 \text{)}$$

$$\varphi(r, \vartheta) = Ar^{4/3} \cos \frac{4}{3} \vartheta$$



Анодное отверстие как дефокусирующая линза

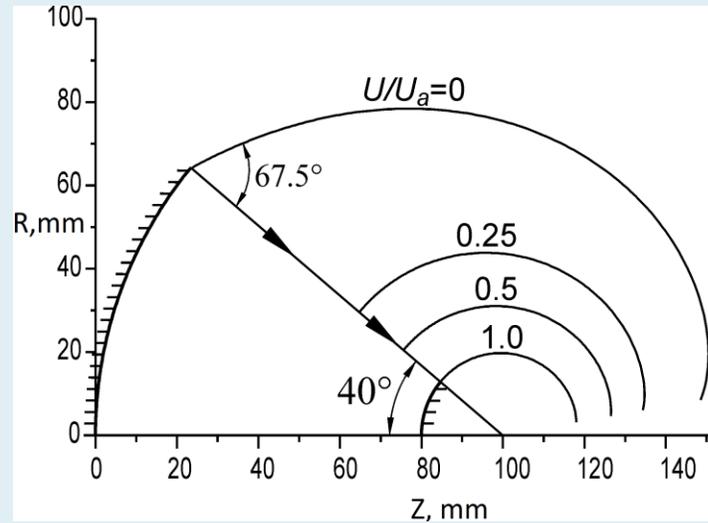
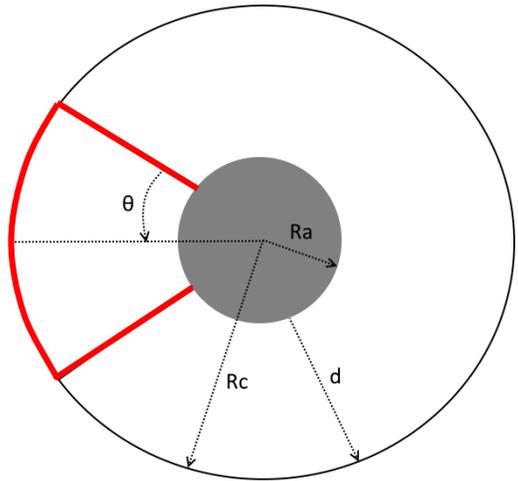
В аноде делается отверстие, чтобы инжектировать электроны в область дрейфа. Это создает распределение потенциала в области анода, которое действует как дефокусирующая линза:



- 1) Сходящийся поток позволяет получать существенно большую плотность тока, чем плотность тока на катоде (особенно актуально для СВЧ-устройств).
- 2) Обычно электронные пучки, формируемые такими пушками, требуют меньших магнитных полей для фокусировки (например, за счет компенсации угловой расходимости в аноде)

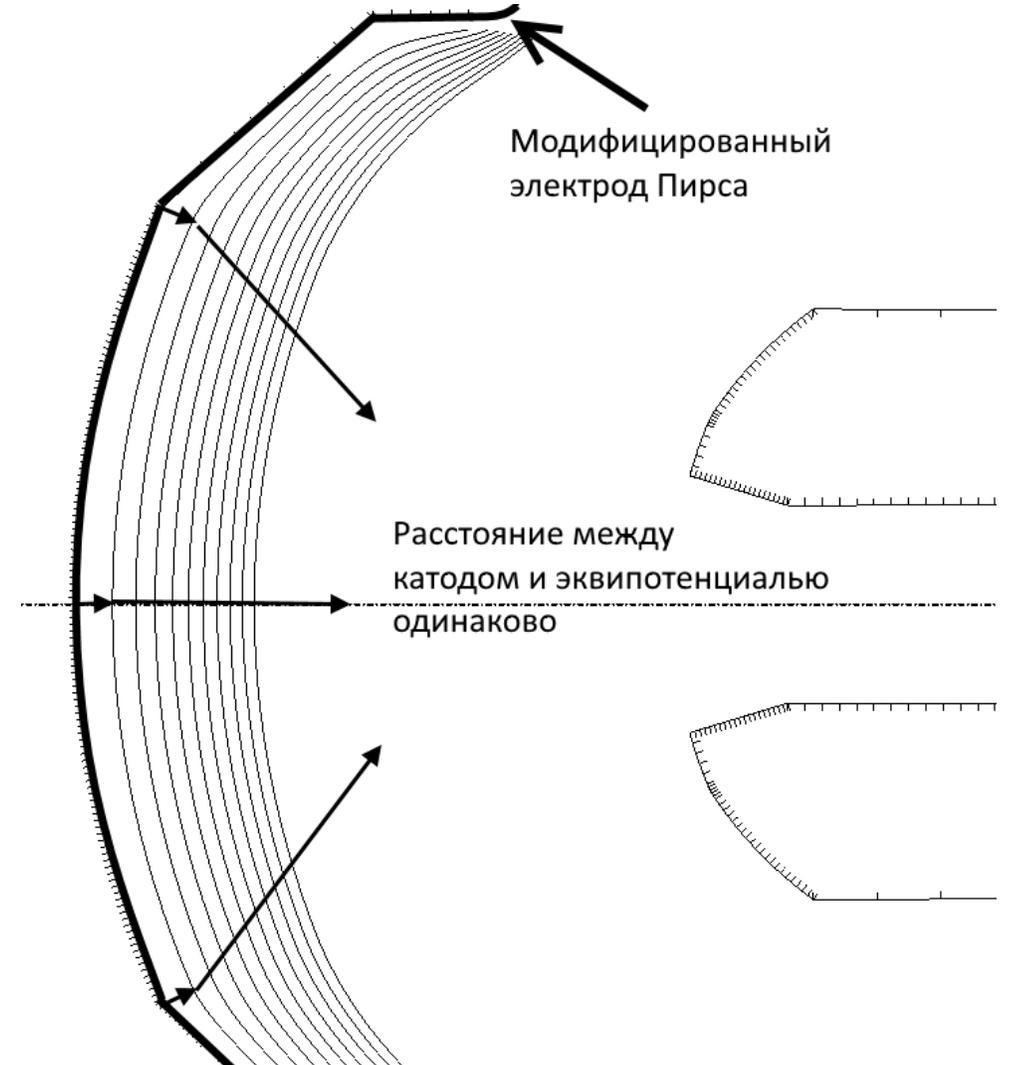
Сферический диод

Конусообразная часть сферического диода (представляющая собой две концентрические сферы) используется для создания пушки Пирса.

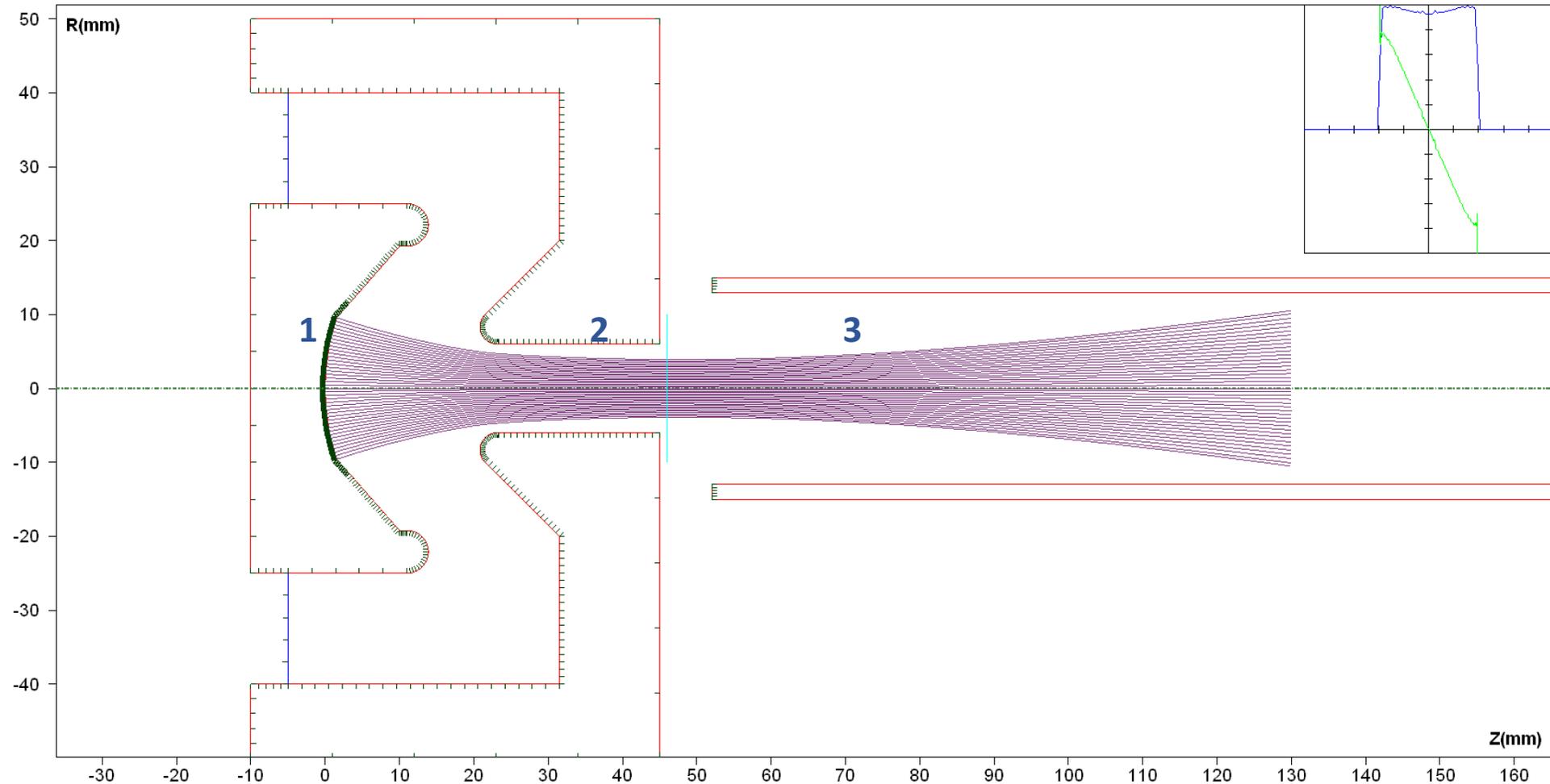


$$\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial \phi}{\partial R} \right) = \frac{\rho}{\epsilon_0} = \frac{I_s}{4\pi R^2 \epsilon_0 \sqrt{2\eta\phi}}$$

$$I_s = \frac{16\pi\epsilon_0}{9} \sqrt{2\eta} \frac{U^{3/2}}{(-\alpha)^2}$$



Сферическая пушка Пирса

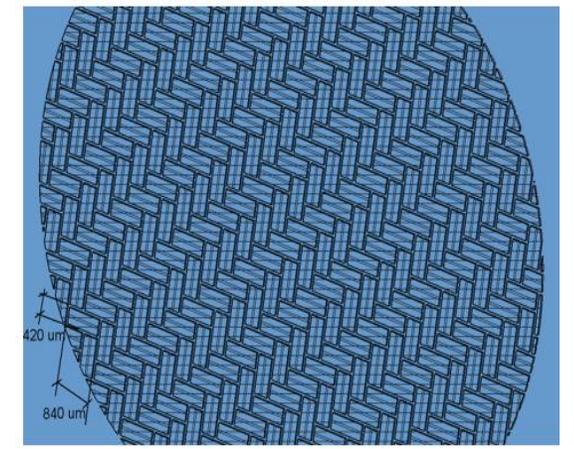
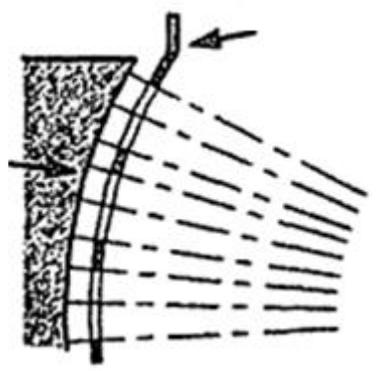
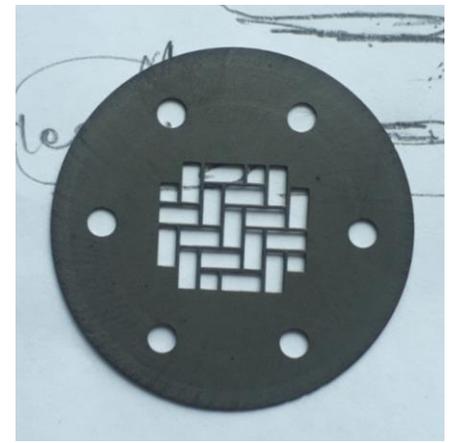
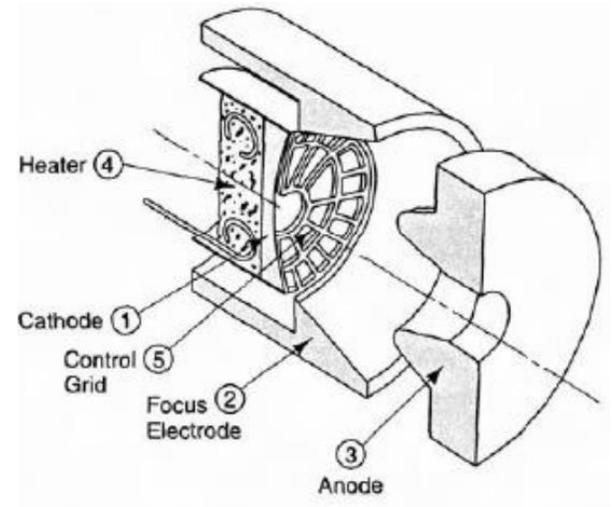
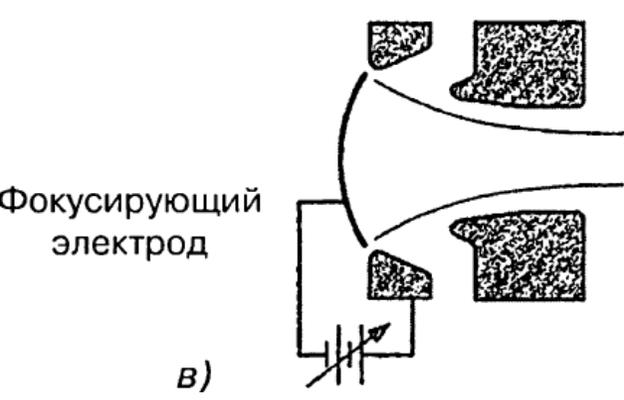
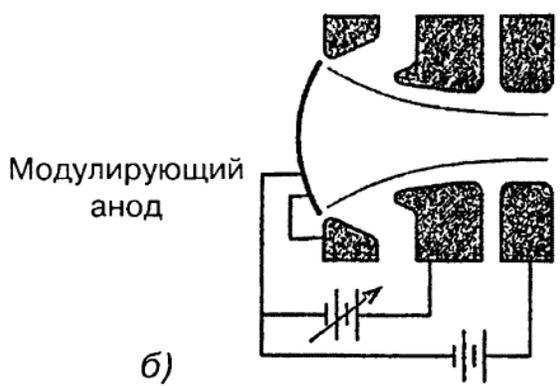
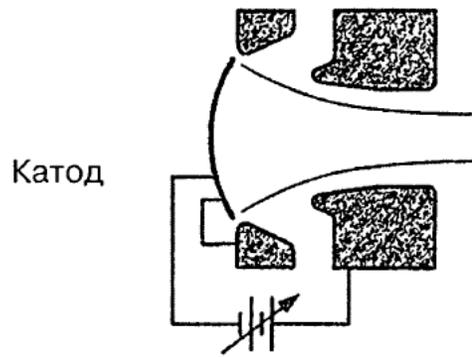


1- Эмиссионная поверхность сферической формы и фокусирующий электрод, компенсирующий размытие пучка силами пространственного заряда.

2 - Анодное отверстие для вывода пучка из пушки

3 - Пучок инжектируется в транспортный канал и дрейфует там под действием сил пространственного заряда

Управление пучком в термоэмиссионных пушках



Некоторые выводы по DC пушкам

DC-пушки являются хорошо освоенной технологией, эти пушки являются хорошим выбором для многих приложений, особенно для высоких средних токов при умеренных зарядах пучка. DC-пушки могут обеспечивать рабочие напряжения до 500 кВ.

Основными недостатками термоэмиссионных пушек постоянного тока являются:

- Относительно низкий градиент ускорения и, как следствие, более низкая общая энергия пучка.
- Низкие градиенты ускорения увеличивают влияние собственных нелинейных полей на рост эмиттанса.
- Разброс скоростей электронов на катоде и рассеяние электронов на сетке также вызывают значительное увеличение эмиттанса.

Получение позитронов для коллайдеров

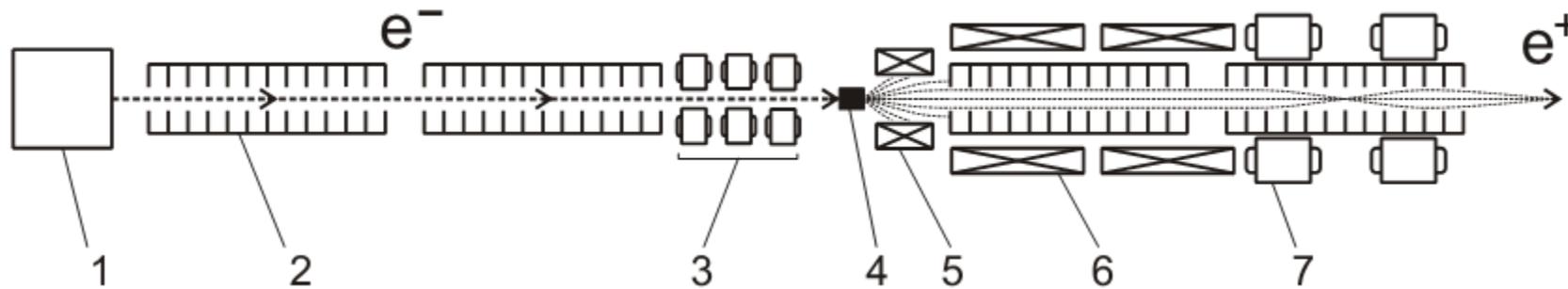


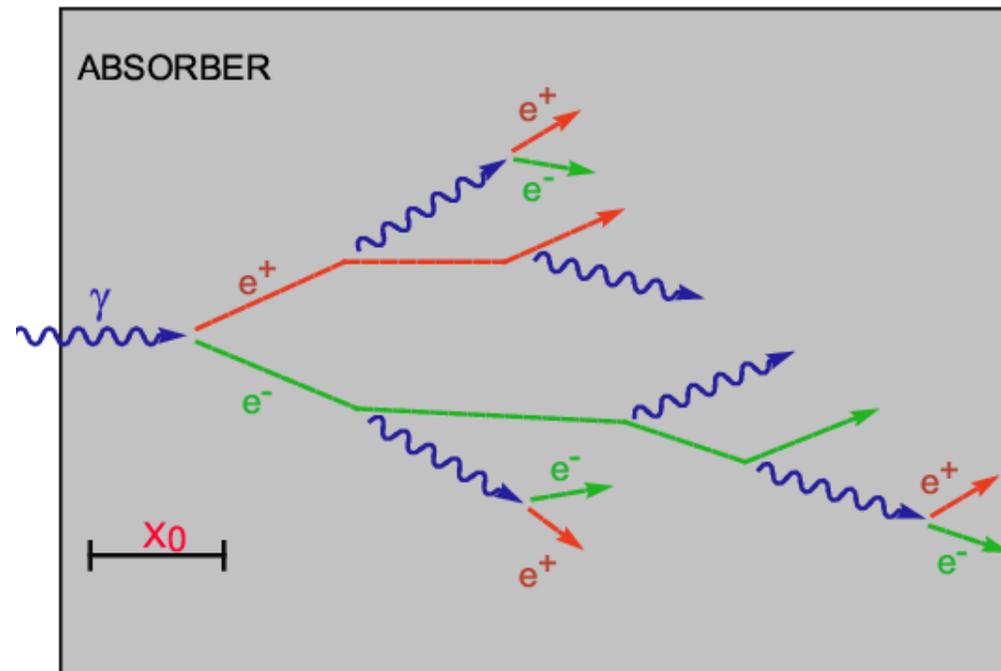
Схема типичного источника позитронов, используемого в ускорительной технике. 1 — источник электронов, 2 — ускоряющая ВЧ-структура, 3 — фокусирующий триплет из квадрупольных линз, 4 — конверсионная мишень, 5 — согласующее устройство, 6 — соленоид, в который вложена первая ускоряющая позитроны структура, 7 — квадрупольная линза

$$E_c = \frac{800 \text{ МэВ}}{Z + 1.2},$$

$$N_{e^+} \approx \frac{0,15}{\sqrt{\ln(E/E_c) - 0,37}} \cdot \frac{E}{E_c},$$

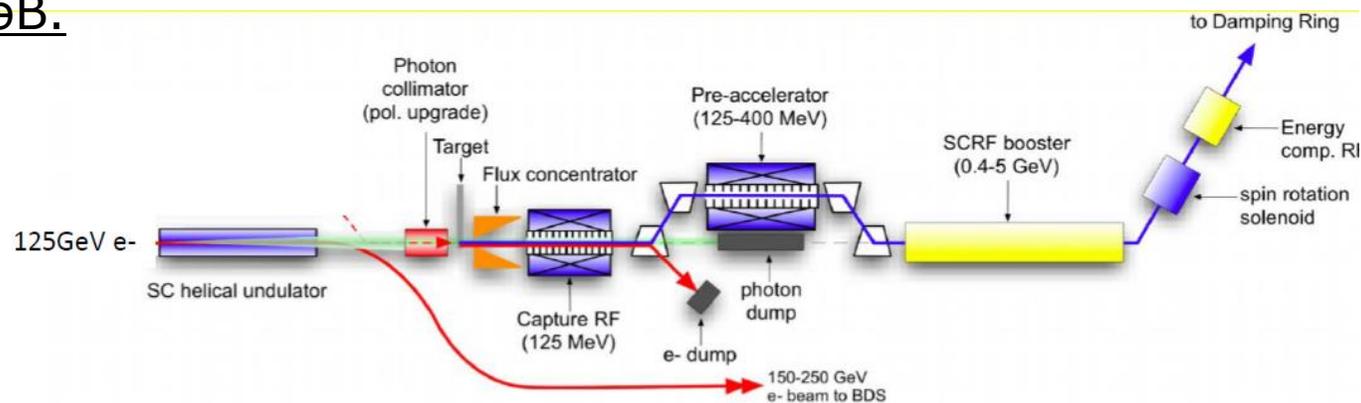
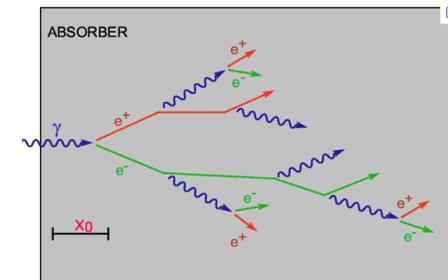


Число позитронов в максимуме электромагнитного ливня, рожденного электроном с энергией E

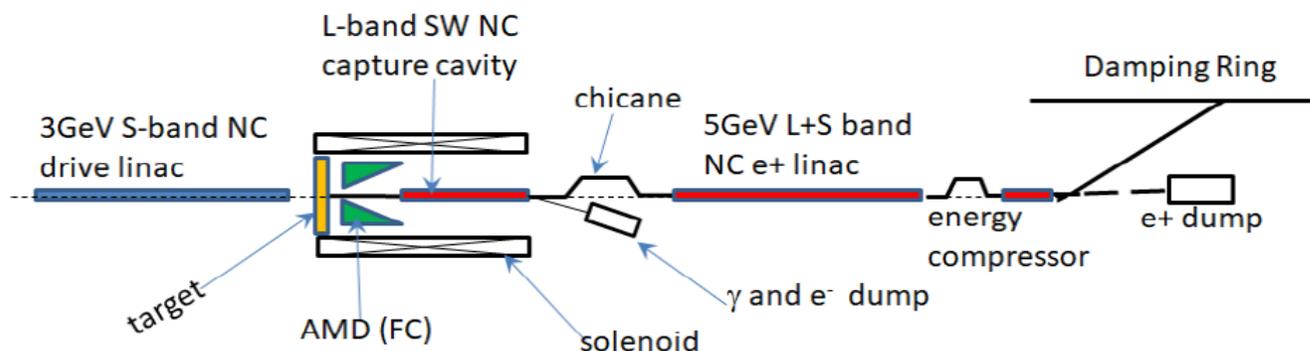


Positron source development

Метод с ондулятором: электроны с энергией 125 ГэВ пропускаются через спиральный ондулятор, и образующиеся гамма-лучи попадают в мишень, где рождаются электрон-позитронные пары. Требуется пучок электронов с энергией 125 ГэВ.

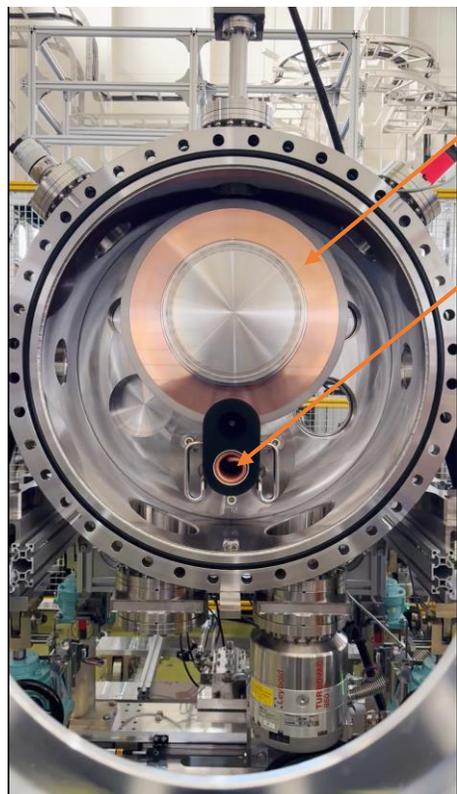


Метод с электронным пучком : электроны с энергией 3 ГэВ попадают в мишень, где рождаются электрон-позитронные пары.



Оба метода требуют прочную мишень и сложную конструкцию концентратора потока и секции захвата (резонатора и соленоида)

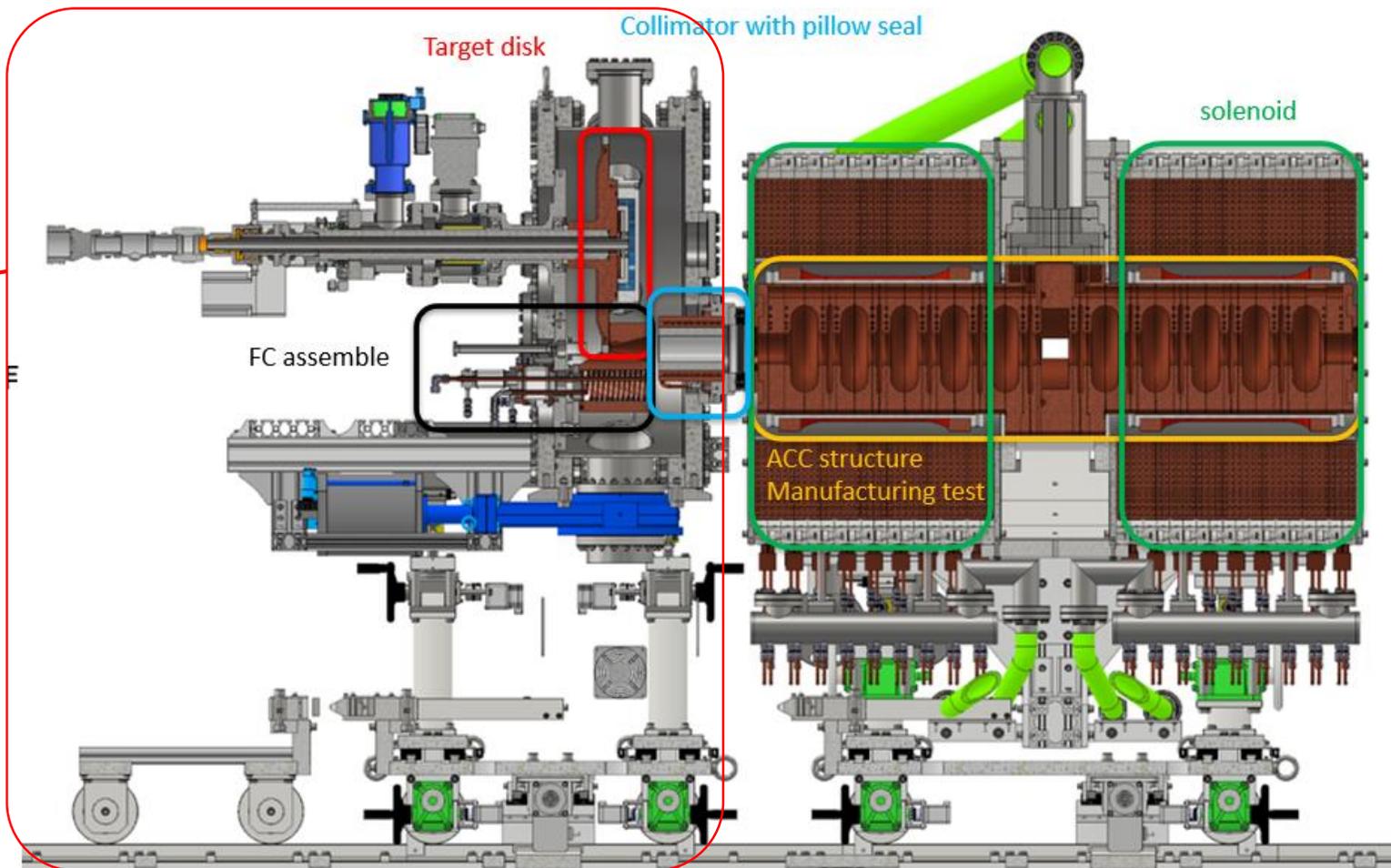
Пример позитронного источника для коллайдера SuperKEKb



Вращающаяся мишень

Около 200 об/мин с водяным охлаждением. Вакуум около 10^{-6} Па

Movie



Target disk

Collimator with pillow seal

solenoid

FC assemble

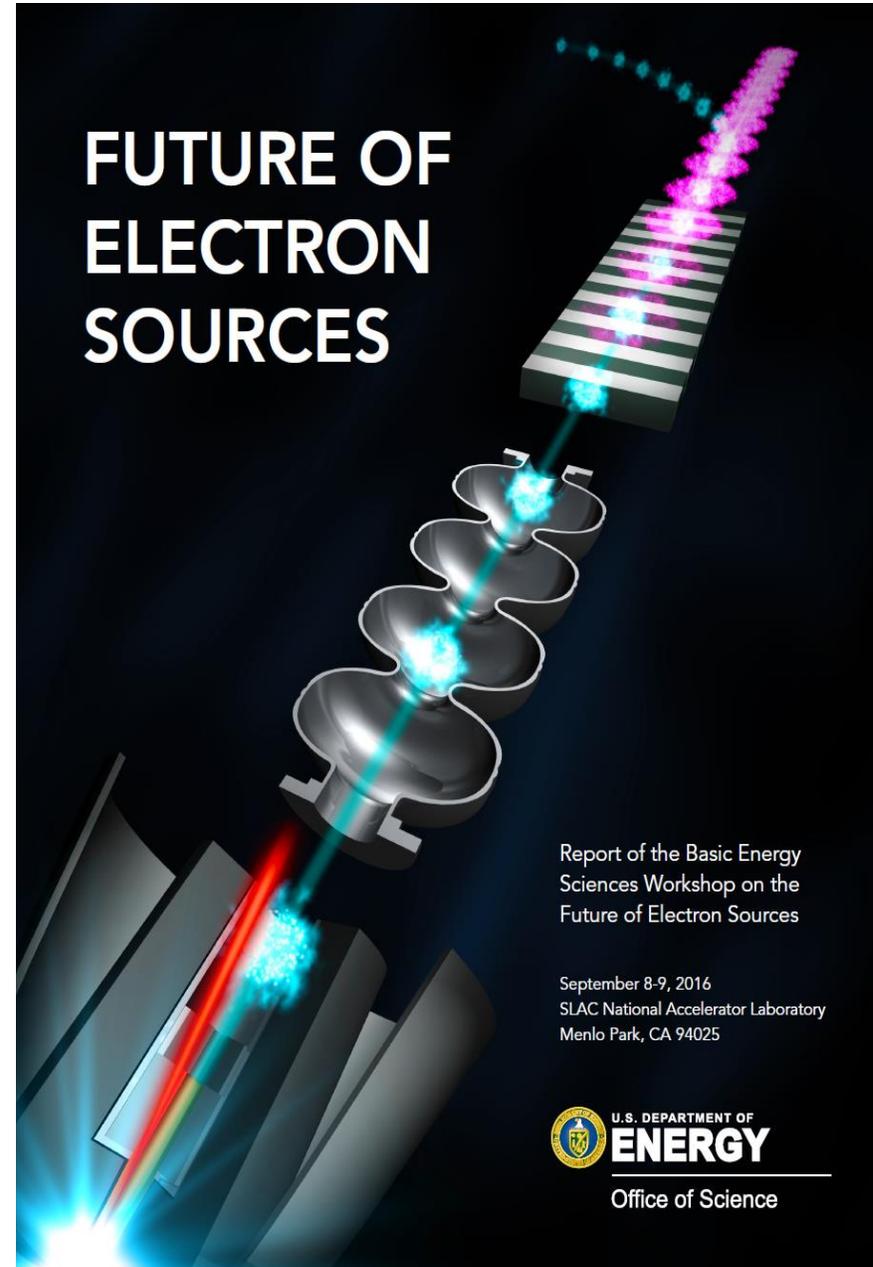
ACC structure
Manufacturing test

Тенденции развития источников электронов

Направления развития источников электронов

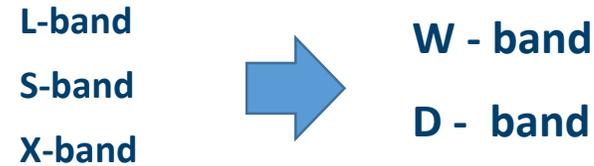
Выделены перспективные направления для генерации электронных пучков с большой яркостью:

FUTURE OF ELECTRON SOURCES



1) Сверхвысокоградиентное ускорение (>1 ГВ/м):

- **ТГц-пушки** Используют терагерцовые частоты для достижения градиентов >1 ГВ/м.



- **Лазерно - Плазменное ускорение:** Градиенты **10–100 ГВ/м** создаются лазерными или пучковыми плазменными волнами.

2) Новые методы манипуляции пучка (Advanced beam-manipulation concepts):

- **Laser-based manipulations:**

OPEN

Toward a terahertz-driven electron gun

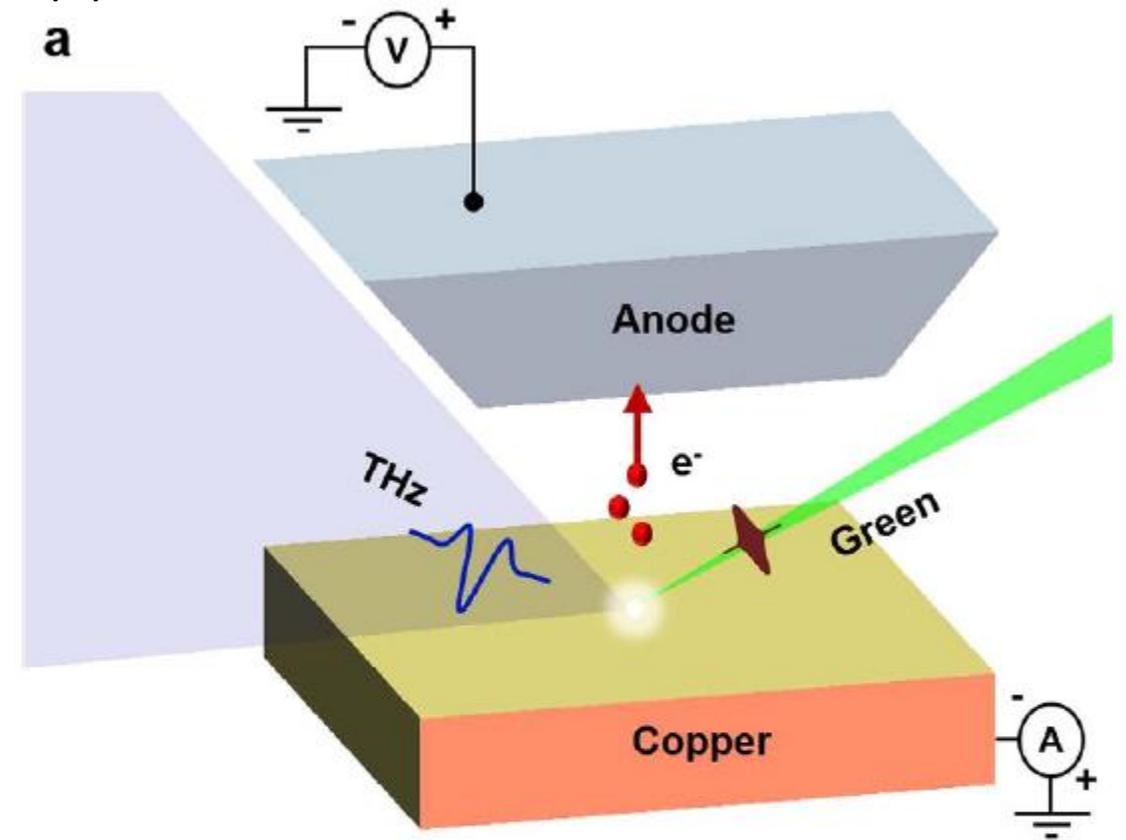
W. Ronny Huang¹, Emilio A. Nanni², Koustuban Ravi², Kyung-Han Hong¹, Arya Fallahi², Liang Jie Wong¹, Phillip D. Keathley¹, Luis E. Zapata² & Franz X. Kärtner^{1,2}

Received: 07 August 2015

Accepted: 20 August 2015

Published: 21 October 2015

Femtosecond electron bunches with keV energies and eV energy spread are needed by condensed matter physicists to resolve state transitions in carbon nanotubes, molecular structures, organic salts, and charge density wave materials. These semirelativistic electron sources are not only of interest for ultrafast electron diffraction, but also for electron energy-loss spectroscopy and as a seed for x-ray FELs. Thus far, the output energy spread (hence pulse duration) of ultrafast electron guns has been limited by the achievable electric field at the surface of the emitter, which is 10 MV/m for DC guns and 200 MV/m for RF guns. A single-cycle THz electron gun provides a unique opportunity to not only achieve GV/m surface electric fields but also with relatively low THz pulse energies, since a single-cycle transform-limited waveform is the most efficient way to achieve intense electric fields. Here, electron bunches of 50 fC from a flat copper photocathode are accelerated from rest to tens of eV by a microjoule THz pulse with peak electric field of 72 MV/m at 1 kHz repetition rate. We show that scaling to the readily-available GV/m THz field regime would translate to monoenergetic electron beams of ~100 keV.



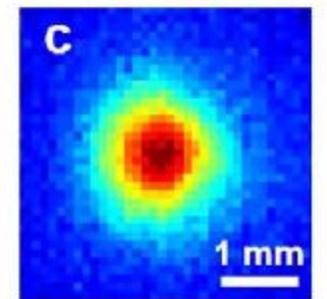
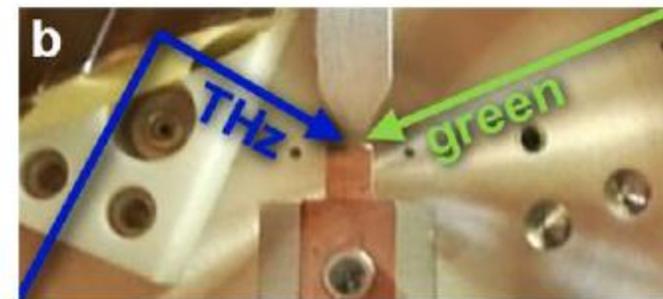
Экспериментальные результаты:

•Установка:

- Фотокатод (медь): Двухфотонная эмиссия лазером 515 нм (525 фс).
- ТГц-ускорение: 1 Гц, 0.45 ТГц, 72 МВ/м, 6 мкДж.

•Результаты:

- Ускорение 50 фКл пучка до **92 эВ** (пиковая энергия).
- Средняя энергия: 18 эВ (совпадение с симуляциями).



Прогресс в области ТГц пушек: 2016 год

Letter

Vol. 3, No. 11 / November 2016 / Optica 1209

optica

Terahertz-driven, all-optical electron gun

W. RONNY HUANG,^{1,2} ARYA FALLAHI,¹ XIAOJUN WU,¹ HUSEYIN CANKAYA,¹ ANNE-LAURE CALENDRON,¹ KOUSTUBAN RAVI,^{1,2} DONGFANG ZHANG,¹ EMILIO A. NANNI,² KYUNG-HAN HONG,² AND FRANZ X. KÄRTNER^{1,2,*}

¹Center for Free-Electron Laser Science at Deutsches Elektronen Synchrotron (DESY), Department of Physics and the Center for Ultrafast Imaging, University of Hamburg, Hamburg 22761, Germany

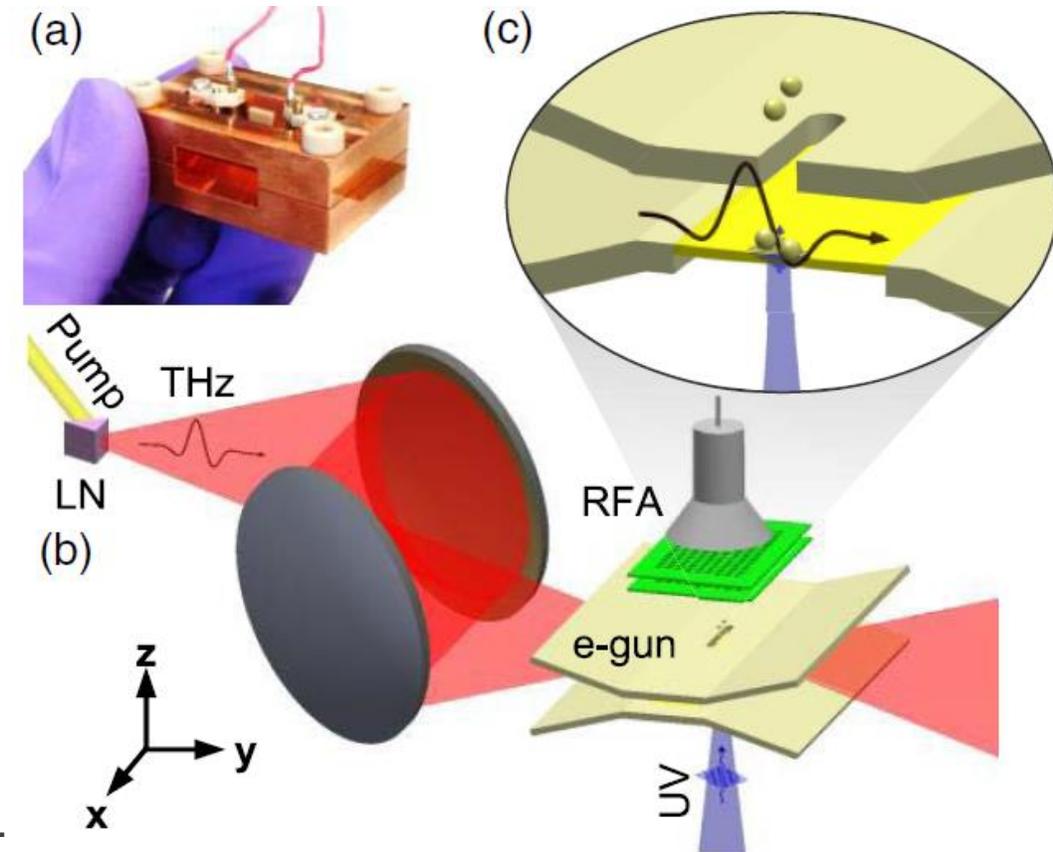
²Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, Massachusetts 02139, USA

*Corresponding author: franz.kaertner@desy.de

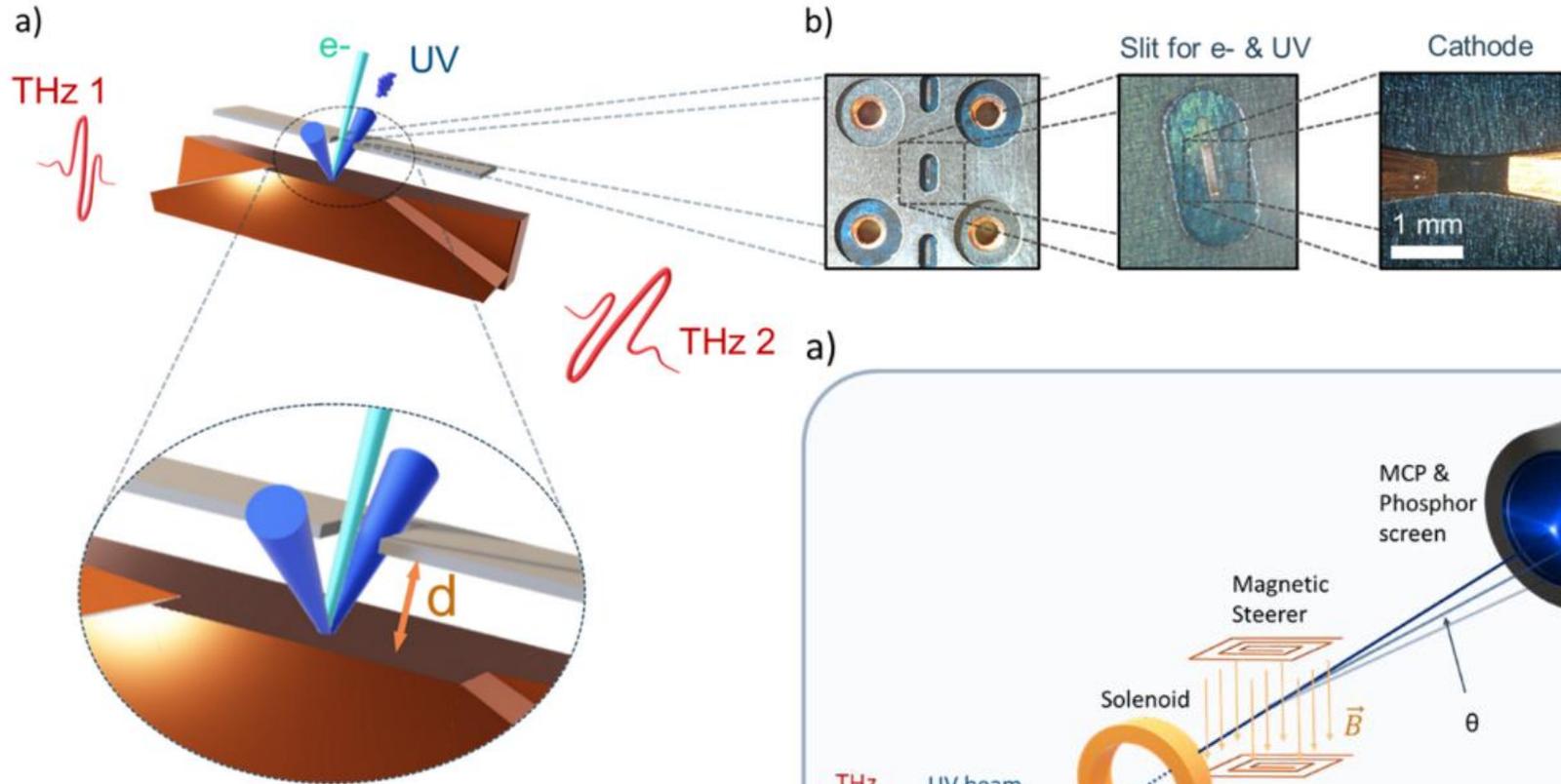
Received 27 June 2016; revised 5 September 2016; accepted 14 September 2016 (Doc. ID 267483); published 24 October 2016

Результаты:

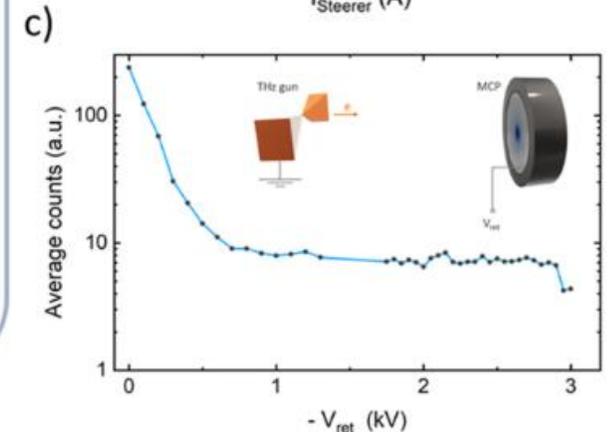
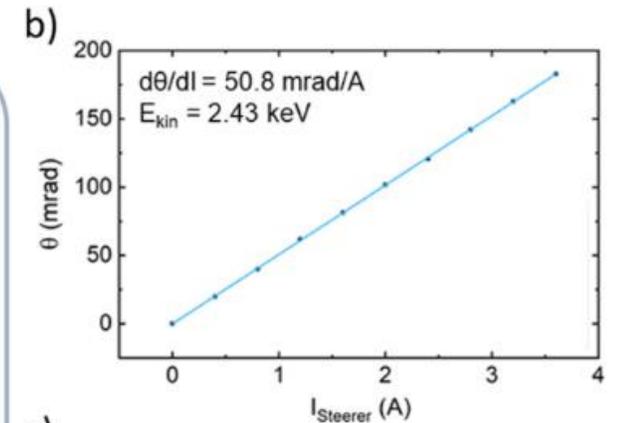
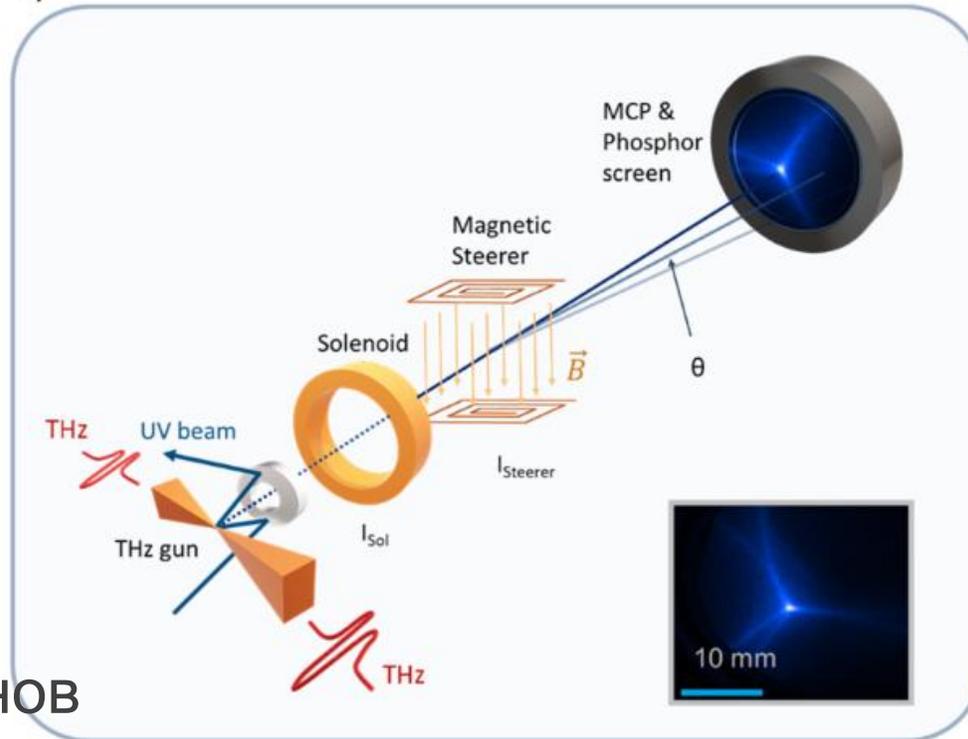
1. Электроны испускаются с фотокатода под действием УФ-импульса, синхронизированного с ТГц-полем, и ускоряются в микрометровом волноводе с параллельными пластинами (PPWG).
2. Пиковая напряженность поля достигает 350 МВ/м внутри PPWG, что значительно выше, чем в традиционных системах.
3. Ускорение электронов до энергии ~ 0.8 кэВ с зарядом пучка 32–40 фКл.
4. Демонстрация квазимоноэнергетических пучков с энергетическим разбросом $\sim 1.8\%$.
5. Отсутствие деградации характеристик после 1 миллиарда выстрелов.



Прогресс в области ТГц пушек: 2021 год



frequency	~ 220 GHz
UV-pulse	254 nm, 130 nJ, 1 ps
cathode	120 x 600 μm
acceleration length	\sim mm



Результаты:

- Рекордная энергия:

Достигнута энергия электронов до 3 кэВ

Прогресс в области ТГц пушек: 2024 - 2025 г

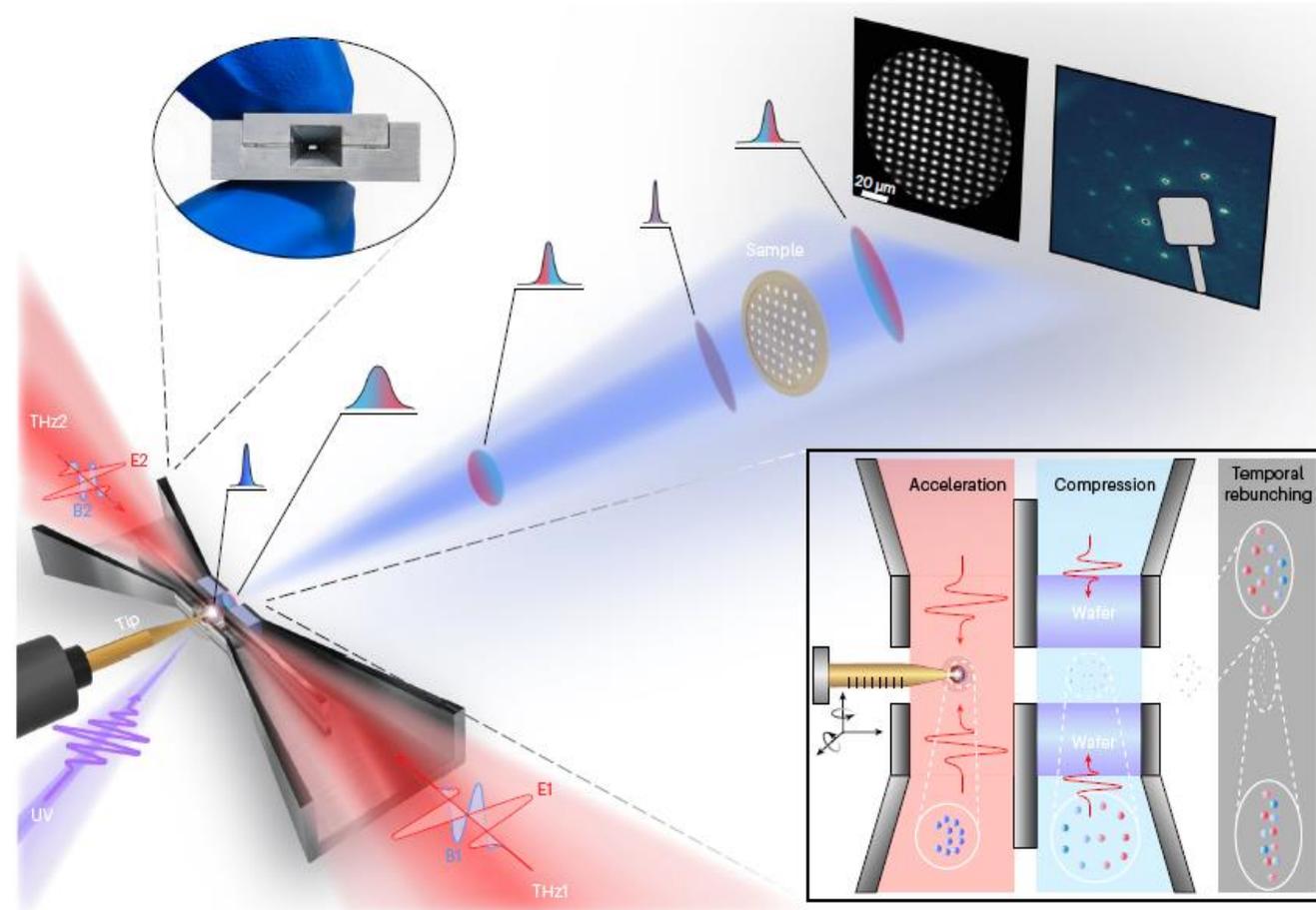
nature photonics

Article

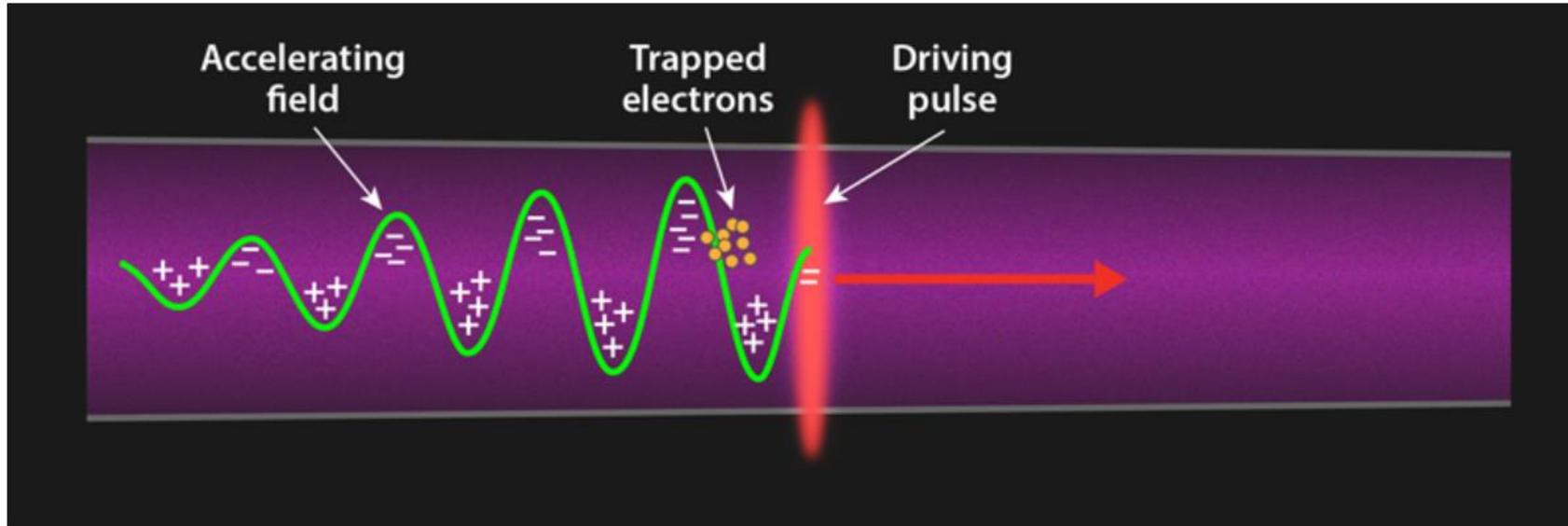
<https://doi.org/10.1038/s41566-024-01441-y>

High gradient terahertz-driven ultrafast photogun

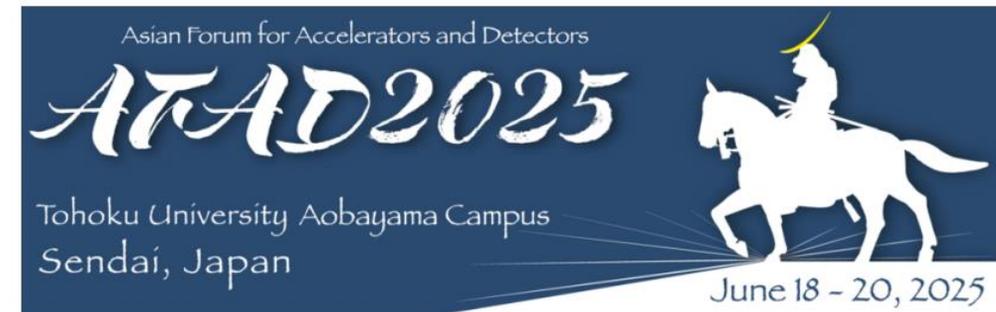
- Энергия электронов: до 14 кэВ
- Градиент ускорения: 3 ГВ/м (максимальный для фотоэмиссионных источников).
- Энергетический разброс: 1% (рекордно низкий для ТГц-ускорения).
- Эмиттанс: 0.015 мм·мрад (высокое качество пучка).
- Длина пучка: 167 фс после компрессии (сжатие в 10 раз от исходного).
- Заряд пучка: 100 фКл (стабильная генерация).



Лазерно-плазменное ускорение



Сквозь [плазму](#) почти со скоростью света летит компактный объект - драйвер (электронный или лазерный сгусток) и расталкивает плазменные электроны. Ионы тоже получают толчок, но остаются на своих местах, так как они тяжелые. Электроны начинают колебаться относительно положений равновесия, возникает разделение зарядов и электрическое поле. Если в это поле поместить заряженные частицы, то они будут ускоряться.



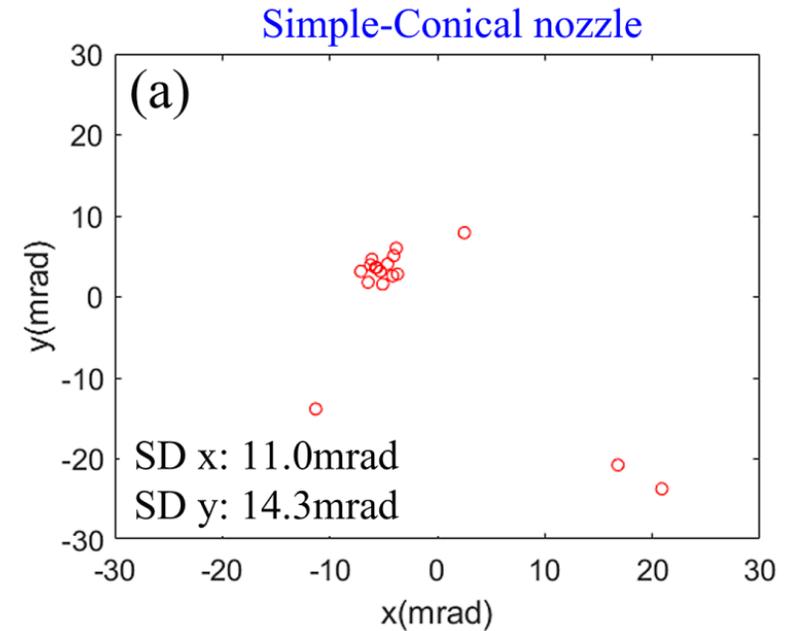
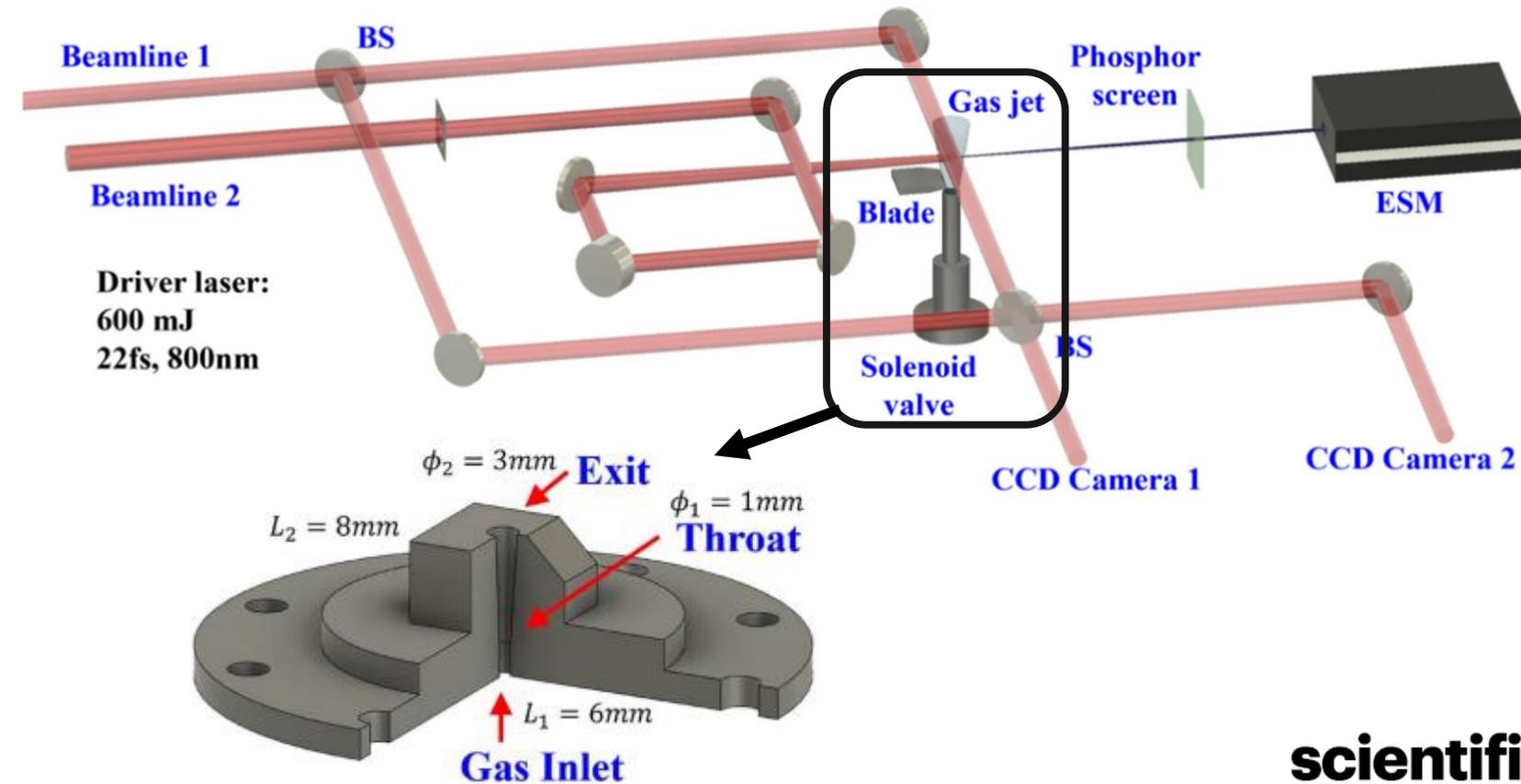
Contribution ID: 24

Type: not specified

Toward a Compact Tabletop Free-Electron Laser Driven by Laser Wakefield Acceleration

Friday, June 20, 2025 10:00 AM (30 minutes)

Лазерно-плазменное ускорение



scientific reports

1. Флуктуации плотности плазмы:

Турбулентность и вихревые структуры в газовом потоке.

2. Чувствительность к параметрам плазмы:

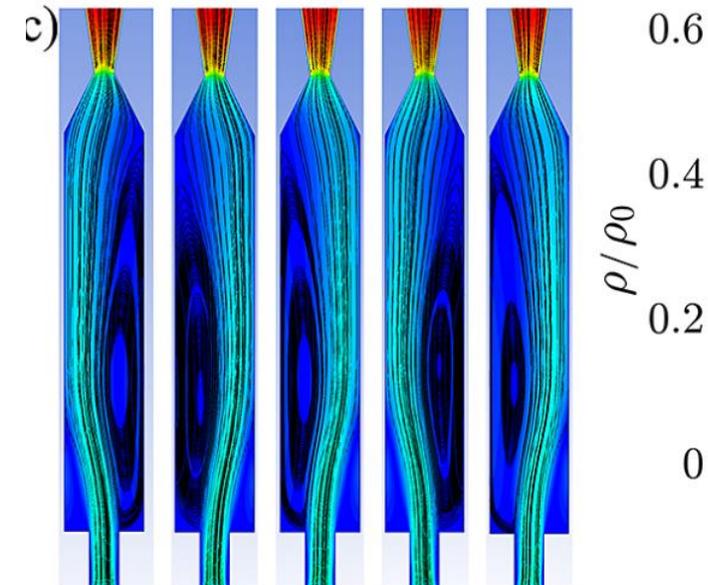
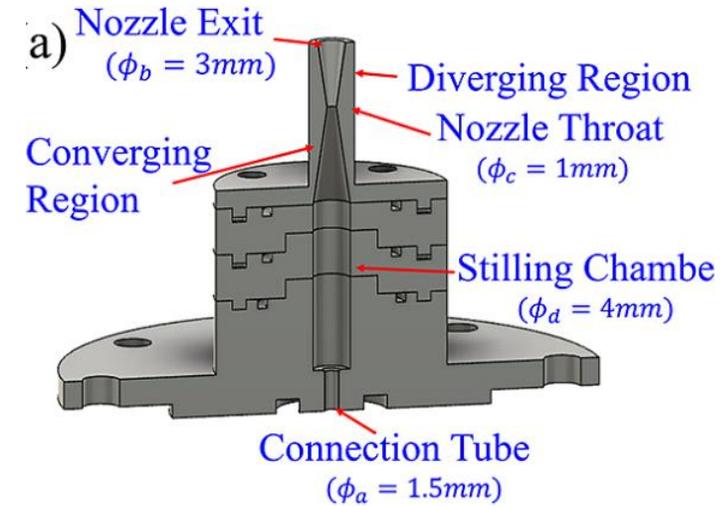
Процесс ударной инжекции крайне чувствителен к положению скачка плотности (даже отклонение на 30 мкм меняет энергию пучка на десятки MeV)

OPEN

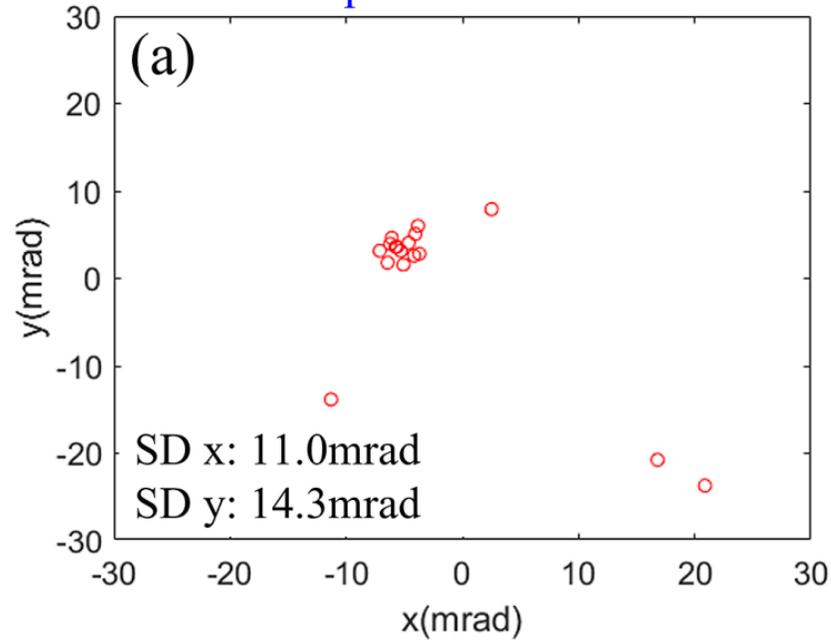
Generation of highly stable electron beam via the control of hydrodynamic instability

Yan-Jun Gu^{1,3}, Zhan Jin^{1,3}, Zhen-Zhe Lei^{1,3}, Shingo Sato^{1,3}, Kai Huang^{1,2,3}, Nobuhiko Nakani^{2,3}, Izuru Daito^{2,3}, Masaki Kando^{1,2,3} & Tomonao Hosokai^{1,3}

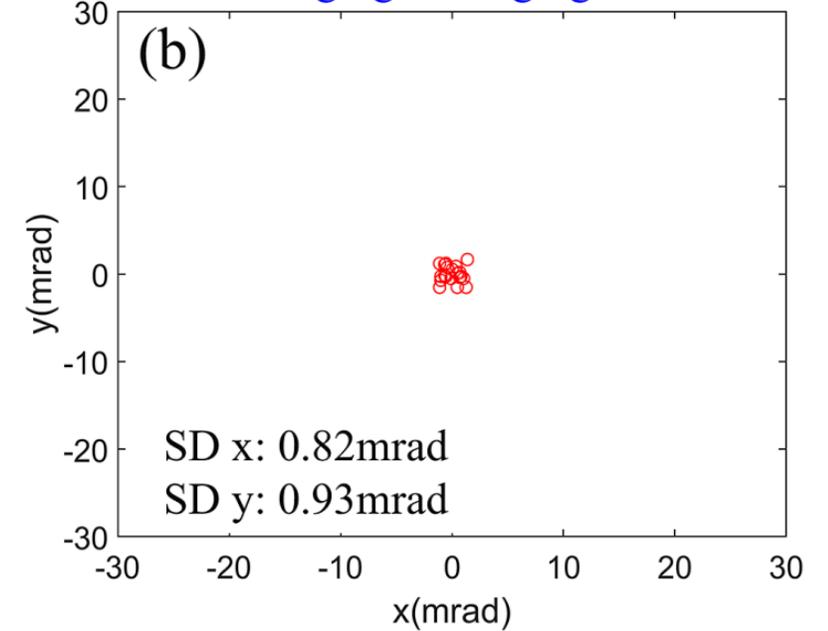
Лазерно-плазменное ускорение



Simple-Conical nozzle



Converging-Diverging nozzle



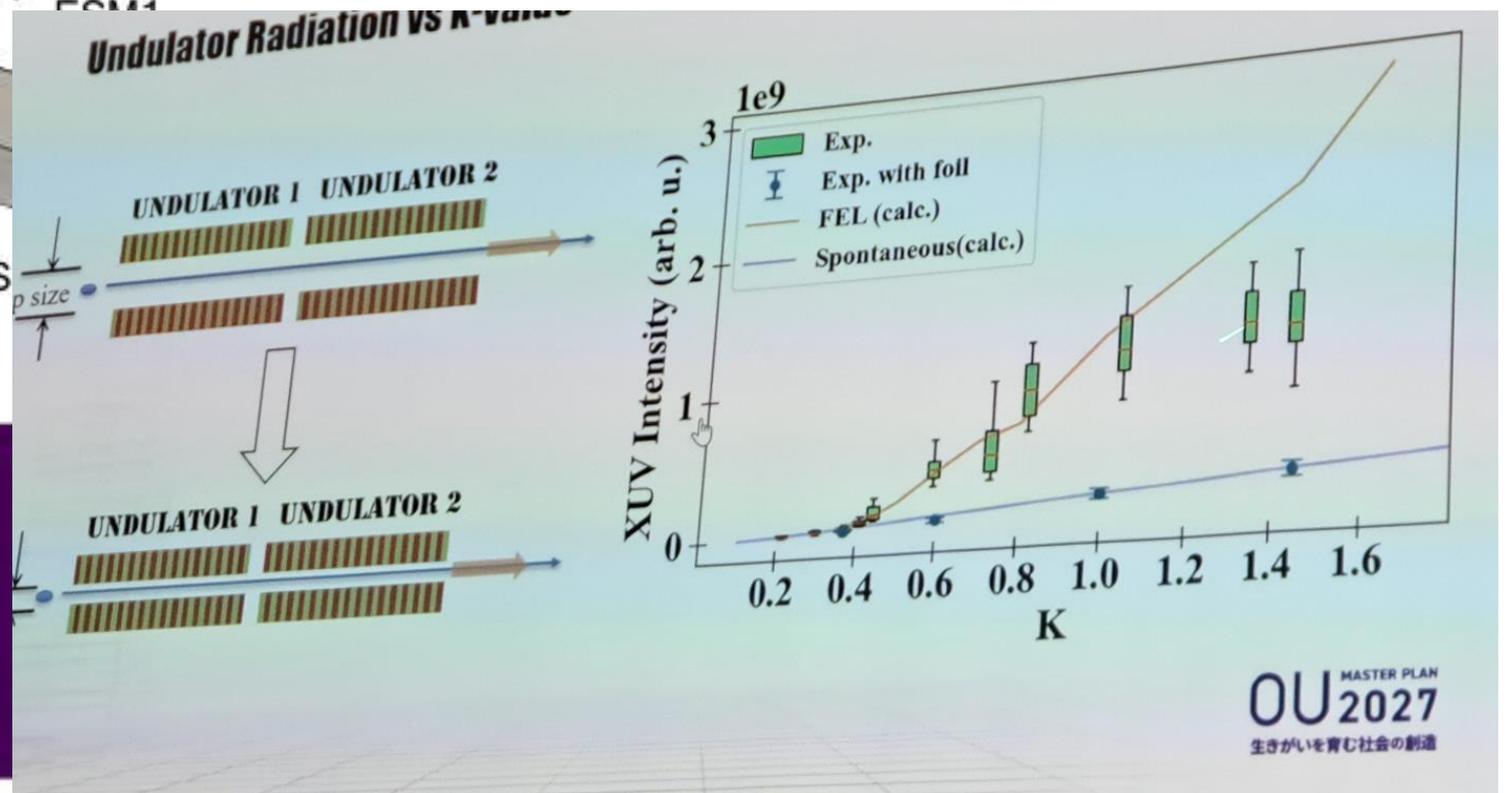
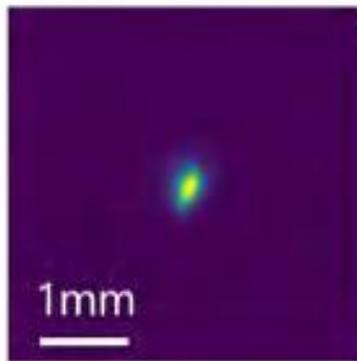
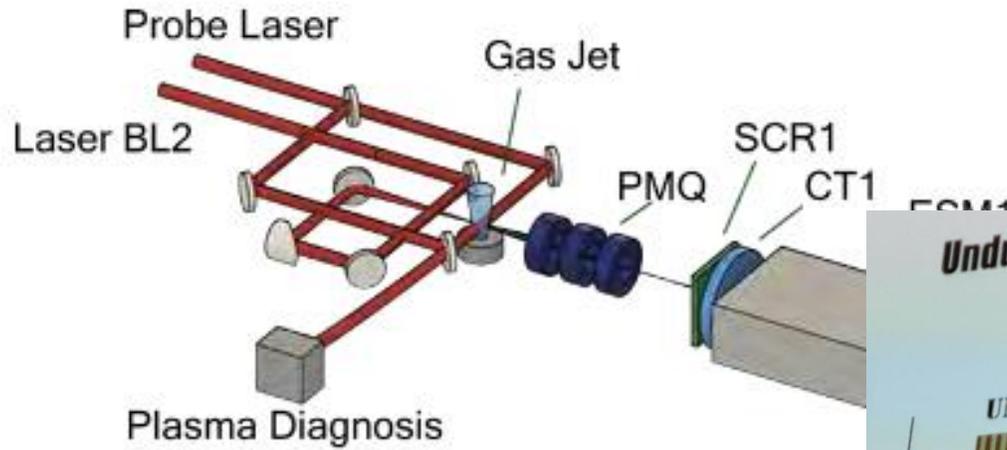
- Получен квази-моноэнергетический пучок с пиковой энергией $315 \text{ МэВ} \pm 12.5 \text{ МэВ}$.

- Угловая стабильность пучка: $< 1 \text{ мрад}$ (улучшение на порядок по сравнению с предыдущими работами).

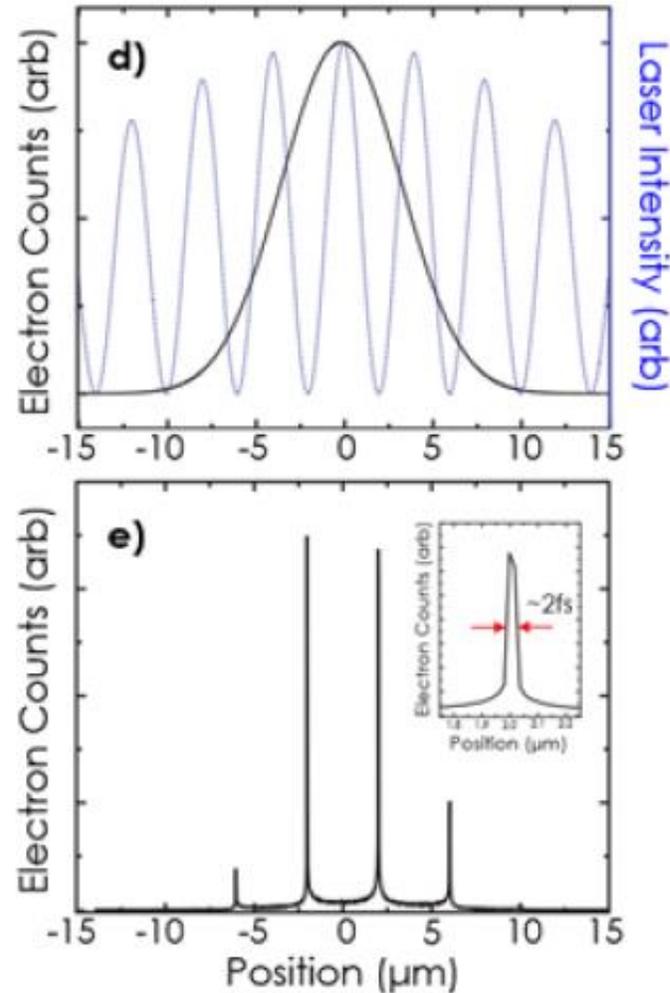
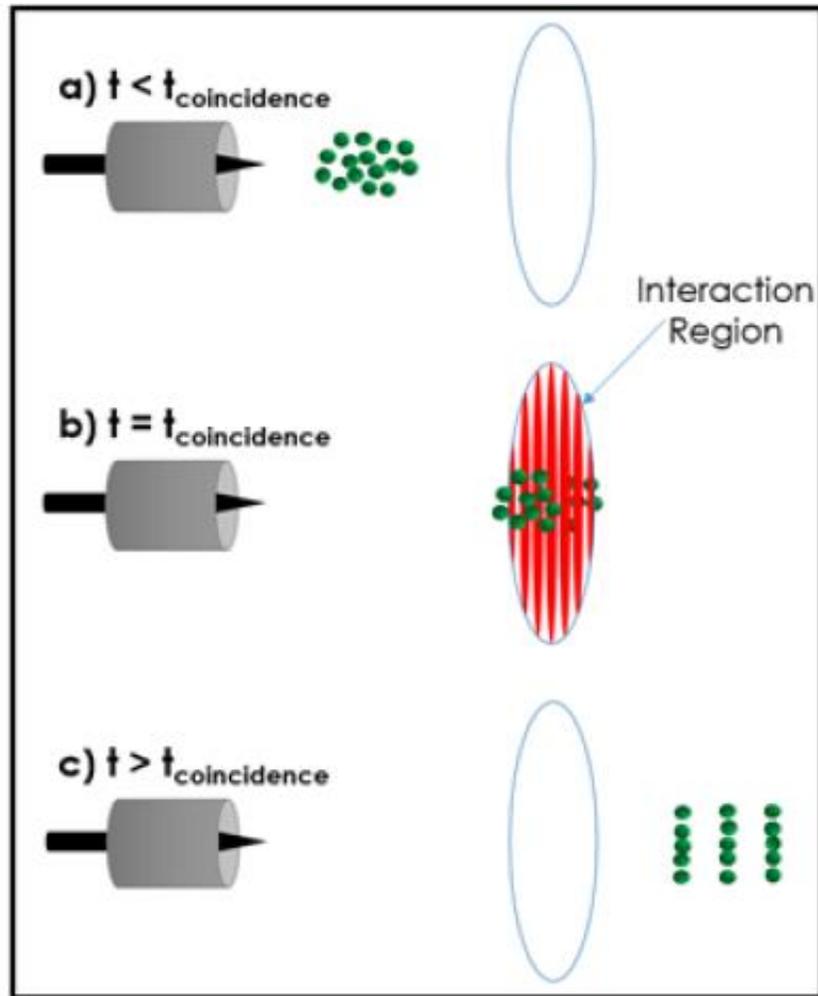
Лазерно-плазменное ускорение

- Получен квази-моноэнергетический пучок с пиковой энергией **315 МэВ \pm 12.5 МэВ**.

- Угловая стабильность пучка: **< 1 мрад** (улучшение на порядок по сравнению с предыдущими работами).



Группировка пучка лазером



Экспериментальная реализация:

1. Исходный пучок с разбросом скоростей направляется в зону взаимодействия с лазерным стоячим полем.
2. Стоячая волна модулирует скорости электронов, создавая коррелированное распределение ("быстрые" \rightarrow "медленные").
3. После 2.8 пс распространения пучок сжимается до узких пиков.

Аттосекундный электронный микроскоп

Attosecond electron-beam technology: a review of recent progress

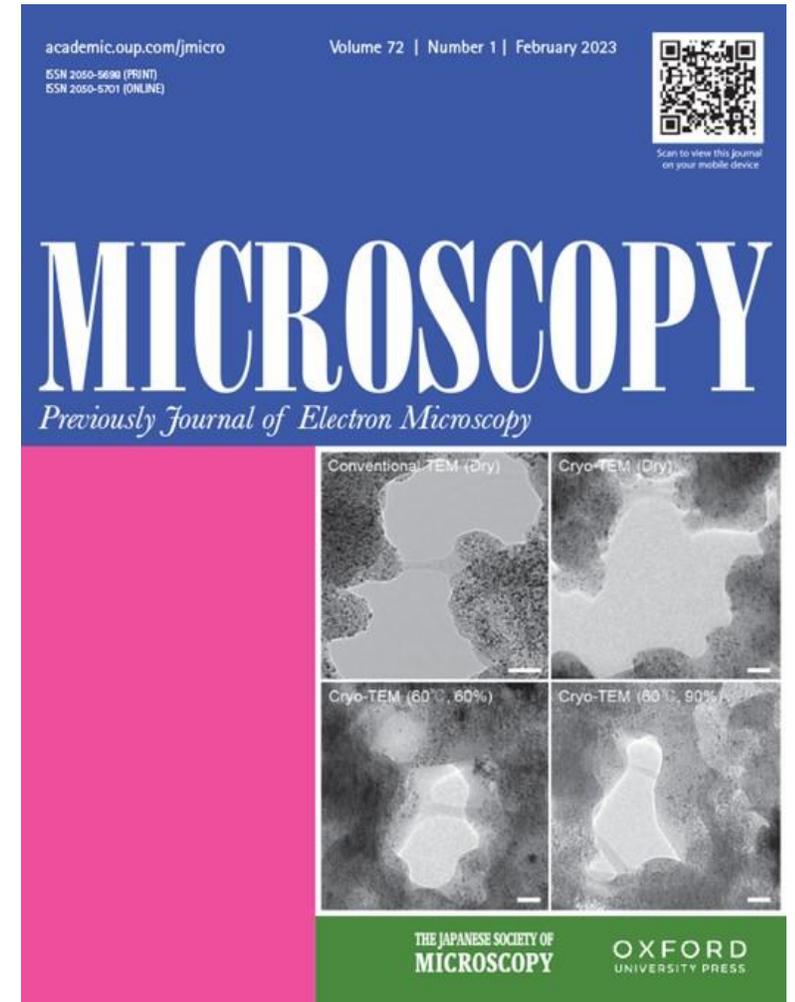
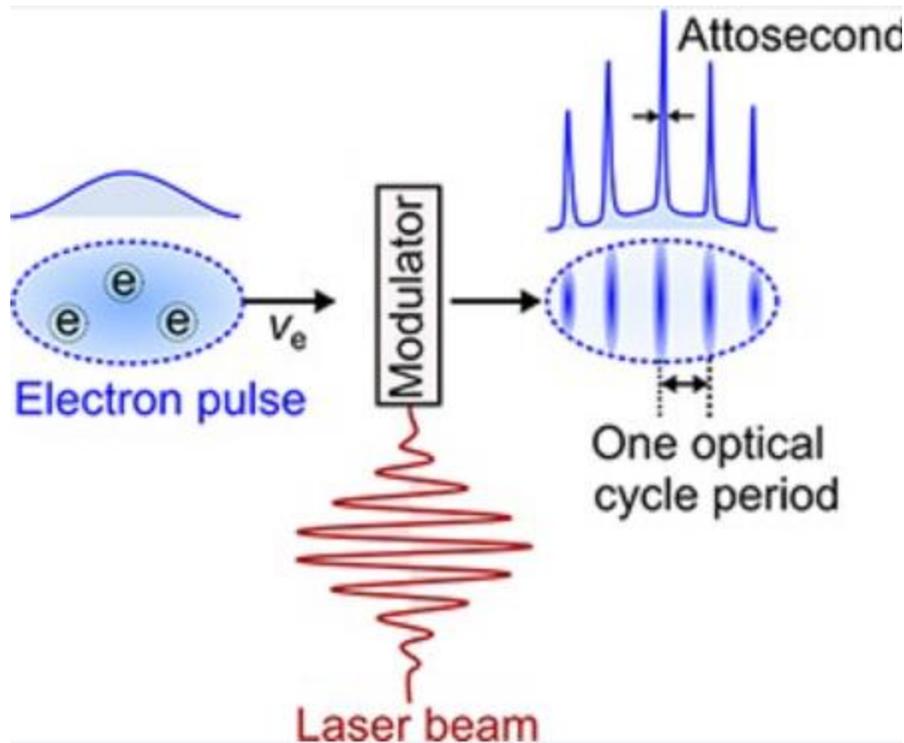
Get access >

Yuya Morimoto ✉

Microscopy, Volume 72, Issue 1, February 2023, Pages 2–17,

<https://doi.org/10.1093/jmicro/dfac054>

Published: 21 October 2022 **Article history** ▼



Аттосекундный электронный микроскоп

Article

Attosecond electron microscopy of sub-cycle optical dynamics

<https://doi.org/10.1038/s41586-023-06074-9>

David Nabben^{1,2}, Joel Kuttruff^{1,2}, Levin Stolz¹, Andrey Ryabov¹ & Peter Baum¹

Received: 12 October 2022

Accepted: 12 April 2023

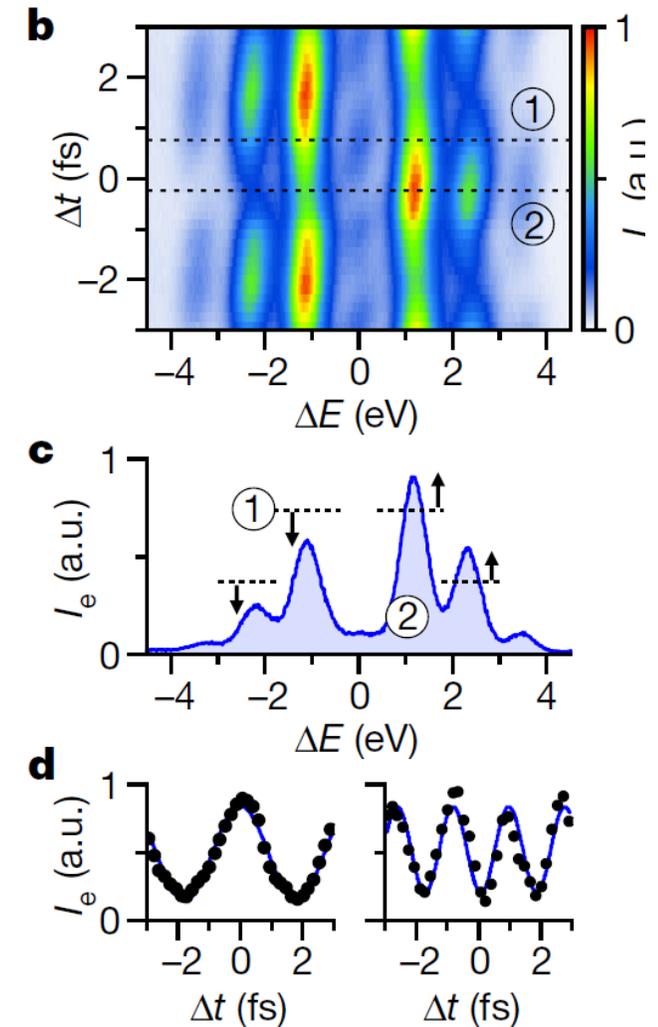
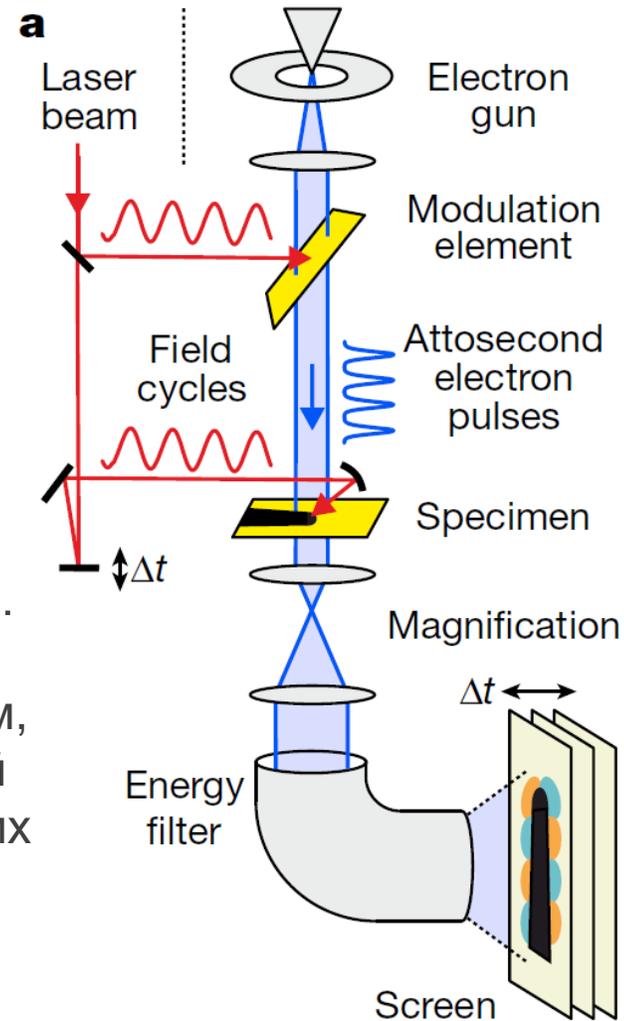
Published online: 31 May 2023

Check for updates

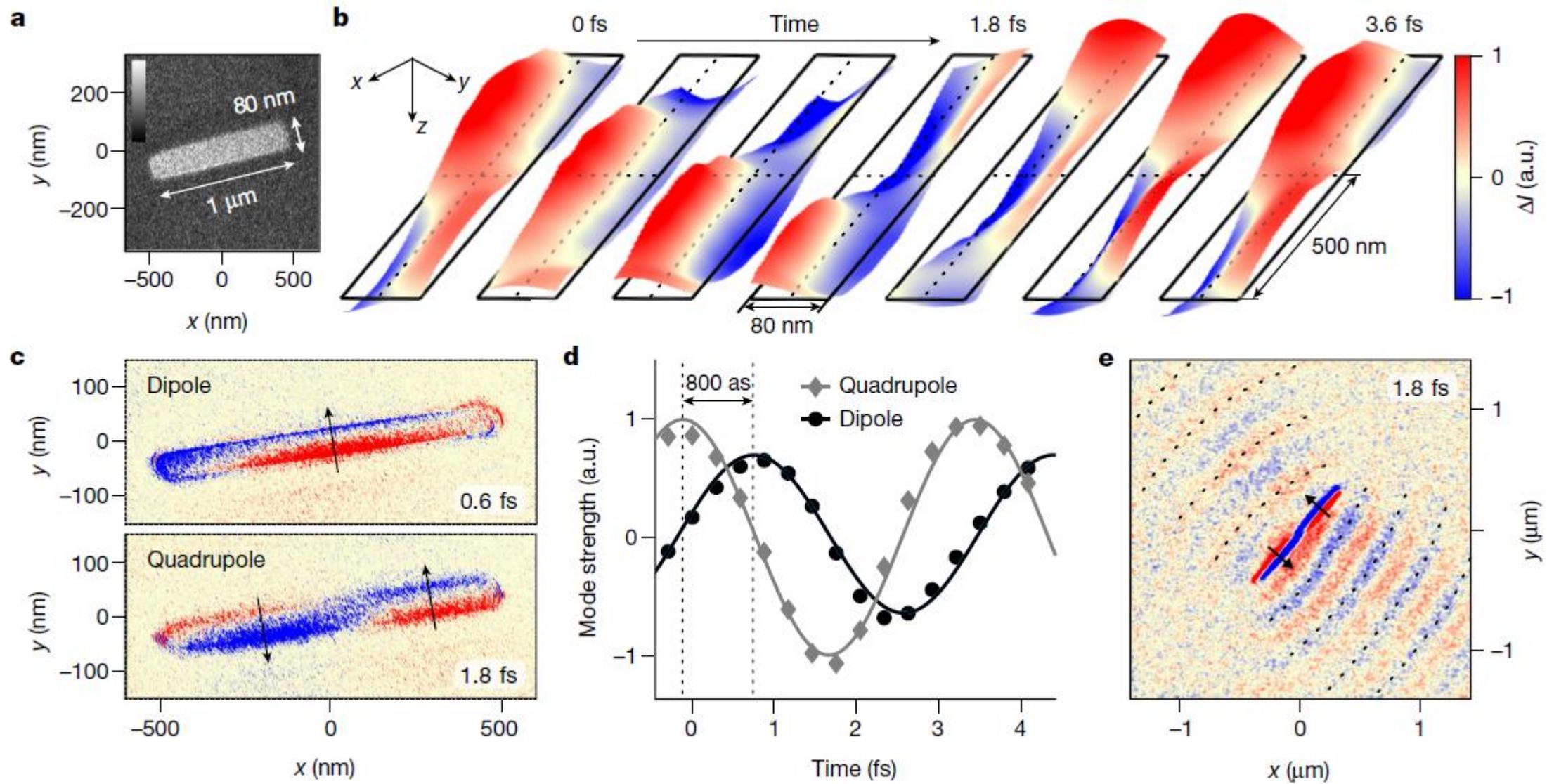
The primary step of almost any interaction between light and materials is the electrodynamic response of the electrons to the optical cycles of the impinging light wave on sub-wavelength and sub-cycle dimensions¹. Understanding and controlling the electromagnetic responses of a material^{2–11} is therefore essential for modern

•Электронный пучок ускоряется до энергии 183 кэВ.

•Непрерывный лазерный луч (длина волны 1064 нм, период колебания 3.6 фс) модулирует электронный пучок, создавая последовательность ультракоротких импульсов длительностью в аттосекунды. Это достигается за счёт периодического ускорения и замедления электронов оптическим электрическим полем лазера.



Скрытая динамика света в наноструктурах



Спасибо за внимание

Proposal for a Quantum-Degenerate Electron Source

M. Zolotarev, E. D. Commins,* and F. Sannibale

Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, One Cyclotron Road, Berkeley, California 94720, USA

(Received 28 April 2006; published 3 May 2007)

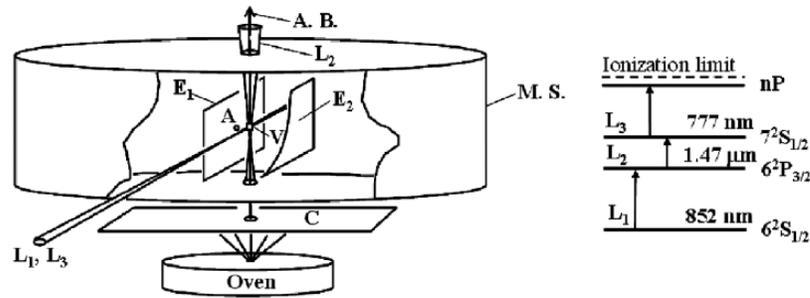


FIG. 1. Schematic diagram of source (not to scale). C: atomic beam collimator; M.S.: magnetic shield; L_1 , L_2 , L_3 : Laser beams; V: laser-atom interaction region; E_1 , E_2 : plane electrodes; A.B.: atomic beam; A: electron extraction aperture. Transverse cooling laser beams not shown.

Возбуждаются холодные атомы CS:

- 1) **Лазер 1 (852 нм):** Переводит атомы из основного состояния $6^2S_{1/2}$ в $6^2P_{3/2}$.
- 2) **Лазер 2 (1.47 мкм):** Дальнейшее возбуждение до $7^2S_{1/2}$.
- 3) **Лазер 3 (777 нм):** Переводит атомы в высоковозбужденное состояние nP .

$$r_n \approx a_B n^2$$



- 4) В момент максимального удаления электрона от ядра применяется **импульс электрического поля** (~ 100 В/см, длительность 0.5 нс), который:
 - Ионизирует атом.
 - Ускоряет электрон до энергии 1–10 эВ.

- 5) **Очистка ионов:** После ускорения электрона второй импульс поля удаляет оставшийся ион Cs^+ из зоны взаимодействия, чтобы он не мешал следующим циклам.

Все электроны получают в одинаковых квантовых состояниях. Их фазовые координаты "упакованы" в объём λ_e^3 . Ансамбль ведёт себя как единый квантовый объект, а не как классический газ.

Эмиттанс в электронных пушках

$$\epsilon_n = \beta\gamma\sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}$$



Факторы деградации эмиттанса:

- тепловой разброс электронов на катоде;
- шероховатости поверхности катода;
- воздействие рассеянных магнитных полей вблизи поверхности катода;
- нелинейности полей, создаваемых оптикой пушки (включая анодное отверстие) и пространственным зарядом;
- Аберрации фокусирующих линз

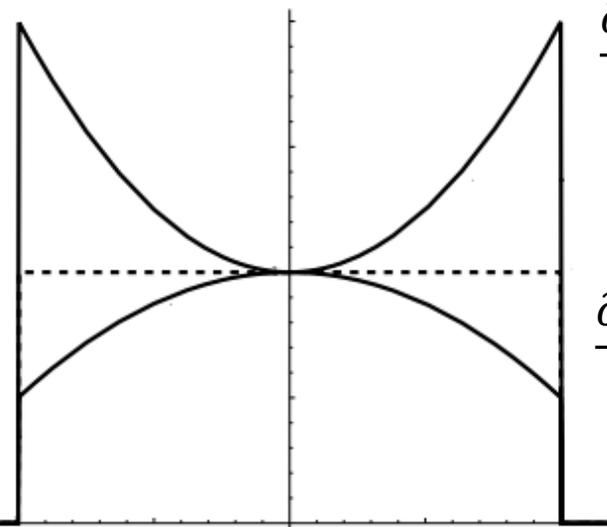
$$\epsilon_n = \beta\gamma\sigma_x\sigma_{x'}$$

$$\sigma_{x'} = \frac{\langle p_x^2 \rangle}{p_{total}} = \frac{1}{\beta\gamma} \frac{\sqrt{\langle v_x^2 \rangle}}{c}$$

$$f(v_x^2) = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} e^{-\frac{mv_x^2}{2kT}} \quad \langle v_x^2 \rangle = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \int_{-\infty}^{\infty} v_x^2 e^{-\frac{mv_x^2}{2kT}} dv_x = \frac{kT}{m}$$

$$\epsilon_{thermo} = \sigma_x \sqrt{\frac{kT}{mc^2}} = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{kT}{mc^2}} \approx [R = 5\text{мм}, T = 1100^\circ\text{C}] \approx 1\text{мкм}$$

$$\rho(r, z) = \rho_1(z) + \rho_2(z) \cdot r^2$$



$$\frac{\partial \rho(r, z)}{\partial r^2} > 0$$

$$\frac{\partial \rho(r, z)}{\partial r^2} < 0$$

$$F_r = e(E_r - V_z B_\varphi)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r E_r) = \frac{\kappa}{\pi \epsilon_0 r_b^2} - \frac{\rho_2 r_b^2}{2 \epsilon_0} + \frac{\rho_2 r_b^2}{\epsilon_0}$$

$$E_r = a^{(0)} r + b^{(0)} r^3$$

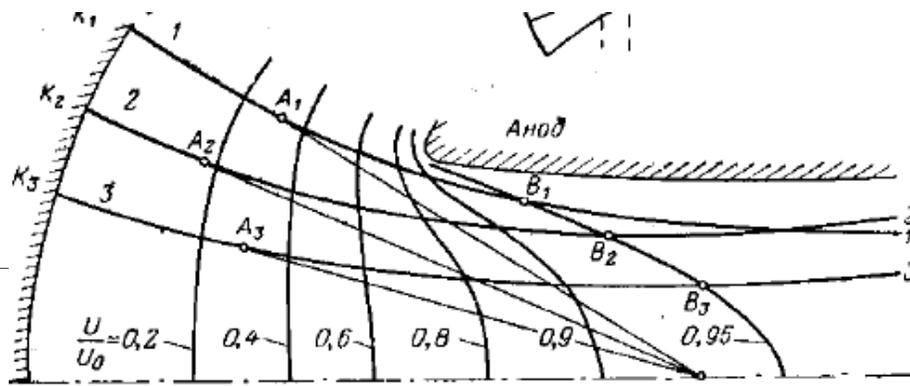
$$a^{(0)} = \frac{\kappa}{2\pi \epsilon_0 r_b^2} - \frac{\rho_2 r_b^2}{4 \epsilon_0}$$

$$b^{(0)} = \frac{\rho_2}{4 \epsilon_0}$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r B_\varphi) = \beta_z \rho(r, z)$$

$$F_{r, nonlinear} = (1 - \beta_z^2) \cdot \left[\left(\frac{\kappa}{2\pi \epsilon_0 r_b^2} - \frac{\rho_2(z) r_b^2}{4 \epsilon_0} \right) r + \left(\frac{\rho_2(z)}{4 \epsilon_0} \right) r^3 \right]$$

Эмиттанс в электронных пушках



$$\varepsilon_n = 2\beta\gamma\sqrt{\langle r^2 \rangle \langle r'^2 \rangle - \langle rr' \rangle^2}$$

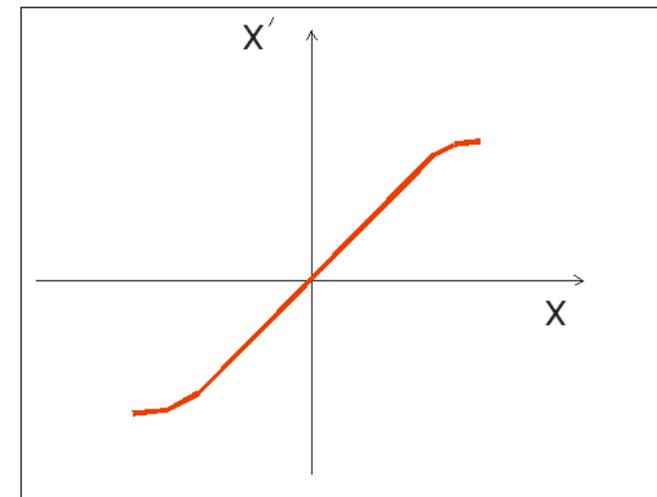
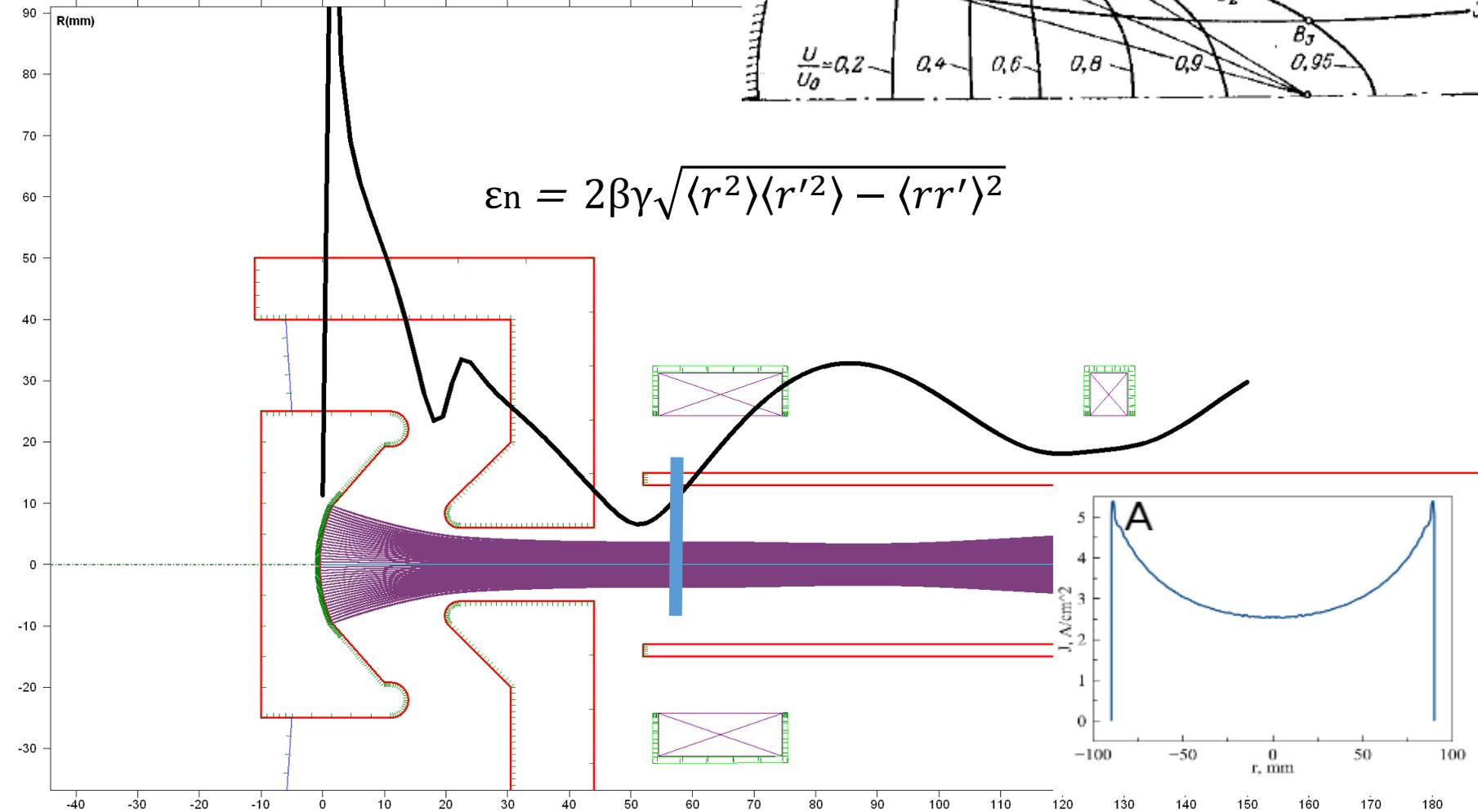


Рис. 1. Кривая эмиттанса в случае уменьшения плотности тока пучка при приближении к его границе - $\frac{\partial \rho(r, z)}{\partial r^2} < 0$

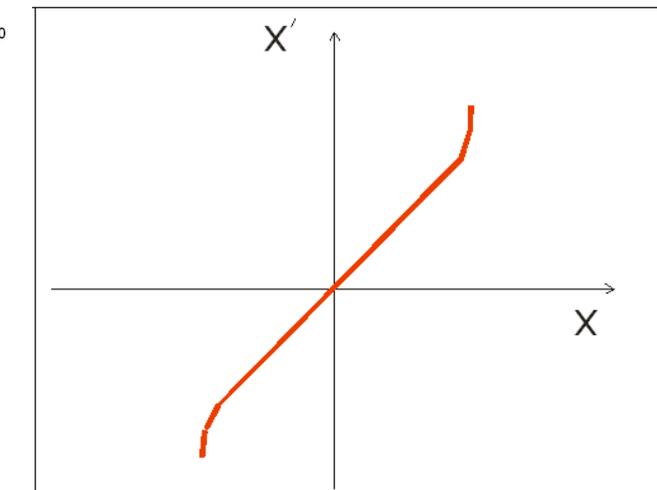


Рис.2. Кривая эмиттанса в случае роста плотности тока пучка при приближении к его границе - $\frac{\partial \rho(r, z)}{\partial r^2} > 0$

Коррекция абберрации в электронной пушке

Аберрация пучка, связанная с неоднородностью плотности тока на катоде, компенсируется аберрацией пучка в анодной линзе; в результате на выходе пушки формируется пучок с минимальным эмиттансом и равномерной плотностью тока:

Z1 = 100 mm R1 = 0 mm Z2 = 100 mm R2 = 3.51107 mm I = 10.4659 A Jmax = 29.203 A/cm² Jmin = 12.0261 A/cm²
Vr/Vz*1000,max = 32.4356 Vt/Vz*1000,max = 22.7314 Emit = 2.31366 mrad*mm Wmax = 56.9237 keV Wmin = 56.2099 keV

