

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИЛЬНОТОЧНОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ЛИУ ДЛЯ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В СХЕМАХ ГЕНЕРАЦИИ МОЩНЫХ ПОТОКОВ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ СУБГИГАВАТТНОЙ МОЩНОСТИ

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия

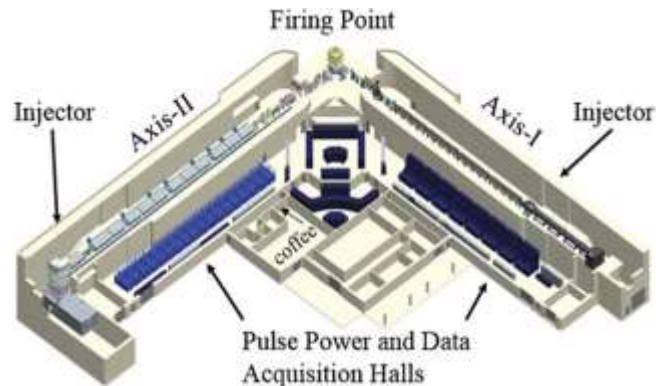
Сандалов Евгений Сергеевич

г. Новосибирск, 2024 год



- Введение и мотивация исследований, основные физические проблемы.
- Радиографический комплекс «ЛИУ». Электронно-оптическая система линейного индукционного ускорителя «ЛИУ».
- Теоретические и экспериментальные исследования устойчивости электронного пучка в ЛИУ.
- Лазер на свободных электронах (ЛСЭ) как источник мощных импульсов когерентного излучения в ТГц диапазоне частот 0.3-1.2 ТГц с субгигаваттной мощностью излучения (~ 0.1-0.5 ГВт).
- Заключение.

Сильноточные электронные пучки ЛИУ являются одним из наиболее эффективных инструментов для создания точечных источников рентгеновского излучения для импульсной рентгенографии быстропротекающих процессов.

DARHT-II

ЛИУ-2

Характерные параметры:

Ток пучка: 2 - 4 кА

Энергия электронов: до 20 МэВ

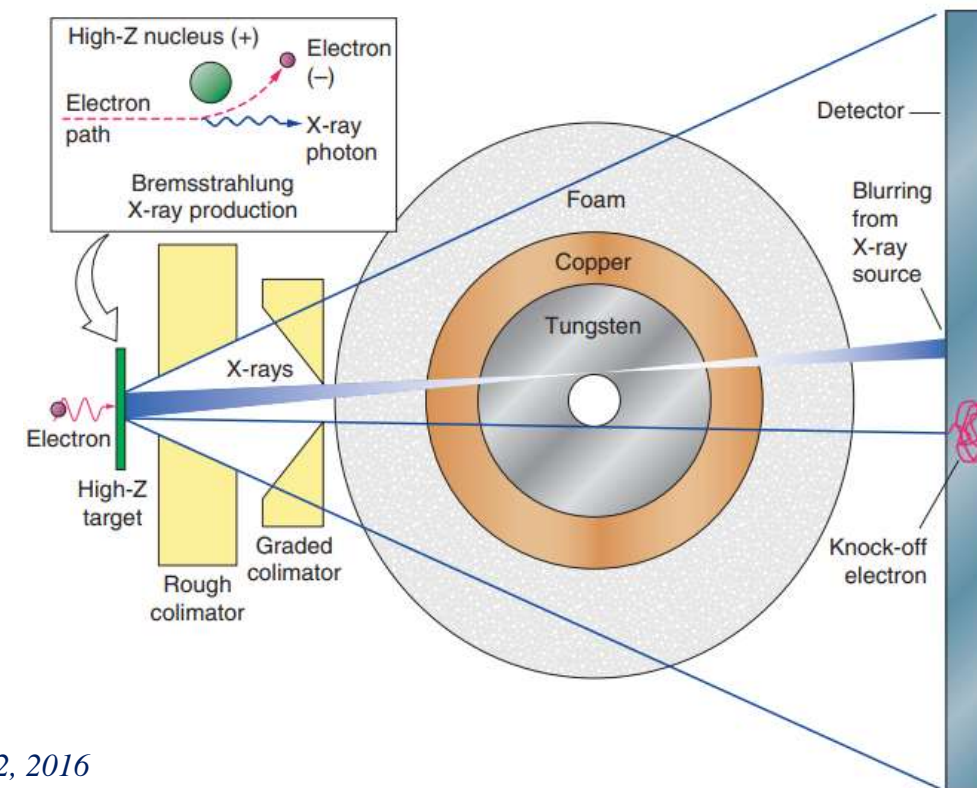
Длительность импульса: 60 – 1600 нс

Число импульсов: 1 - 2

Чем обусловлены указанные параметры?

Просвечивающая и разрешающая способности зависят от характеристик источника гамма-излучения и детектирующей станции. Требования к пучку:

- компромисс между величиной дозы $\sim E^{2,8}$ и фоном от электромагнитных ливней достигается при энергии ~ 20 МэВ;
- требуемая просвечивающая способность обеспечивается при токе пучка 1-3 кА;
- разрешающая способность определяется размером пучка, сфокусированного на мишени (эмиттанс)

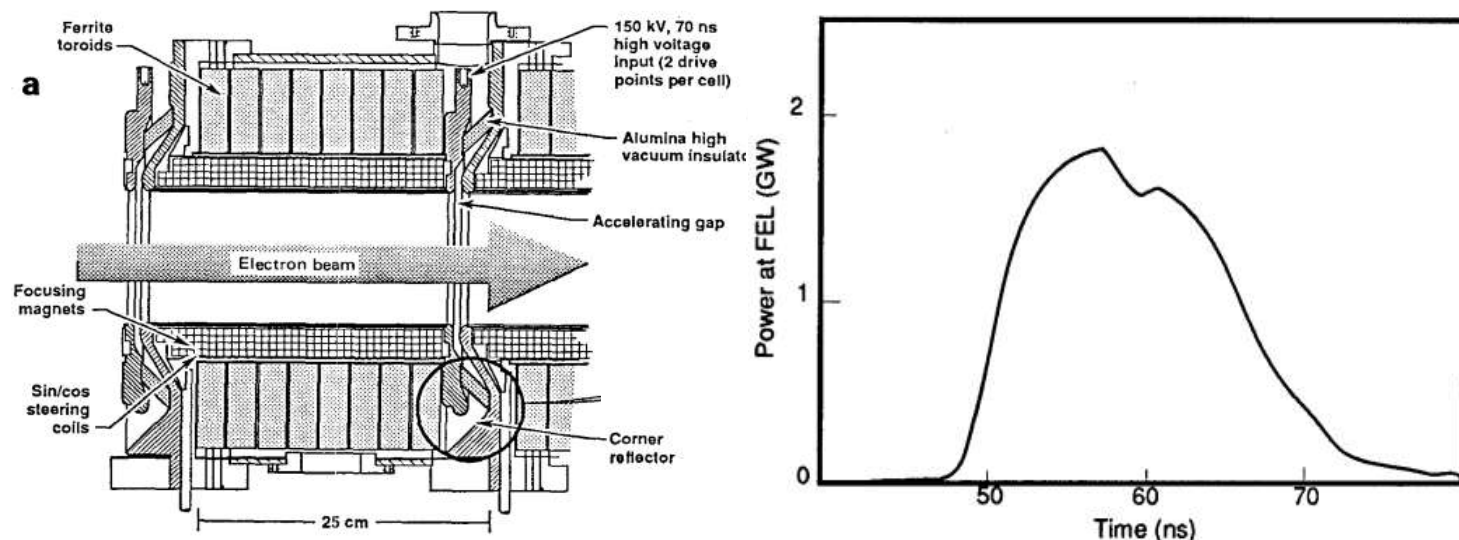


Сильноточные электронные пучки, генерируемые в ЛИУ являются эффективным драйвером для субгигаваттных ЛСЭ в ТГц диапазоне:

Основные требования к источнику электронного пучка:

- Малое значение нормализованного эмиттанса
- Малый разброс энергии электронов пучка
- Малая амплитуда поперечных колебаний пучка на выходе ЛИУ (не более 2 мм)

The Microwave Tokamak Experiment (MTX) at the ETA-II facility:



**** Достигнутые параметры излучения в режиме усилителя:**

140 ГГц с мощностью 1-2 ГВт

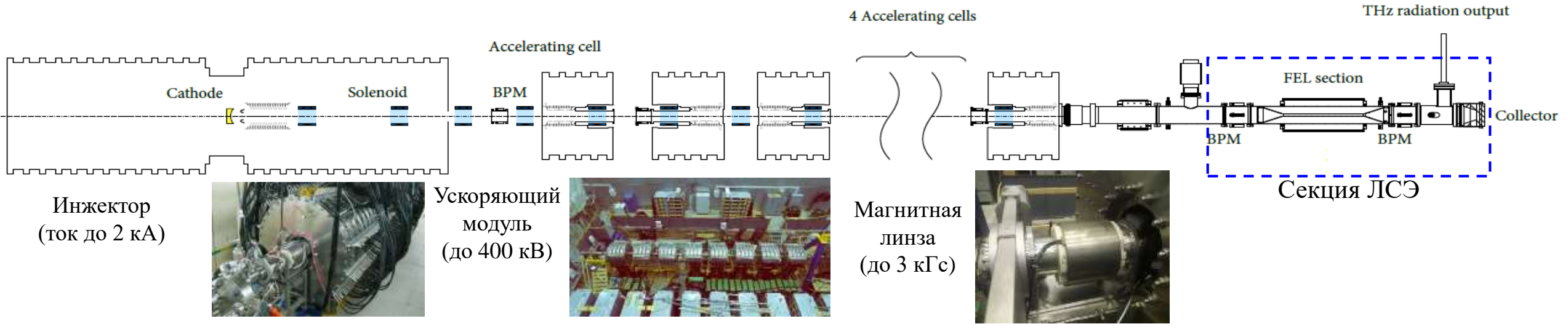
Ссылки:

*Takayama K, Briggs R. *Induction accelerators*. Berlin Heidelberg: Springer; 2011

**S. L. Allen et al., "Generation of high power 140 GHz microwaves with an FEL for the MTX experiment," *Proceedings of International Conference on Particle Accelerators*, Washington, DC, USA, 1993, pp. 1551-1553 vol.2, doi: 10.1109/PAC.1993.308552.

Таблица 1. Характерные параметры ЛИУ*

Установка	Ток, А	Энергия, МэВ	Длительность импульса, нс	Страна
Astron-I	350	3.7-3.8	250	USA, 1963
Astron-II	800	6	300	USA, 1968
ERA	3000	4	30	USA, 1970
ETA	10000	4.5	30	USA, 1977
FXR	3000	17	60	USA, 1980
ATA	10000	45	75	USA, 1983
ETA-II	3000	6.5	50-70	USA, 1989
DARHT-I	2000	19.8	60	USA, 1999
DARHT-II	2100	17	1600	USA, 2003
ARIA (Wagner)	2000	12	200-3000	USA, under development
Scorpius (IVA)	2000	20	340-360	USA, under development
LELIA (CESTA)	1000	3	80	France, ~1990
PIVAIR	3500	8	80	France, 1999
AIRIX	4000	20	80	France, 1999
FEL-KEK	3000	1.6	80	Japan, 1987
RAIDEN	1200	4	100	Japan, 1990
LAX-I	3000	1	100	Japan, 1991
ETIGO-III	5000	8	30	Japan, 1997
Dragon-I	2500-3000	20	90	China, 1997
Dragon-II	2000	20	60-70	China
«ЛИУ»	2000	20	160-200	Россия, 2022

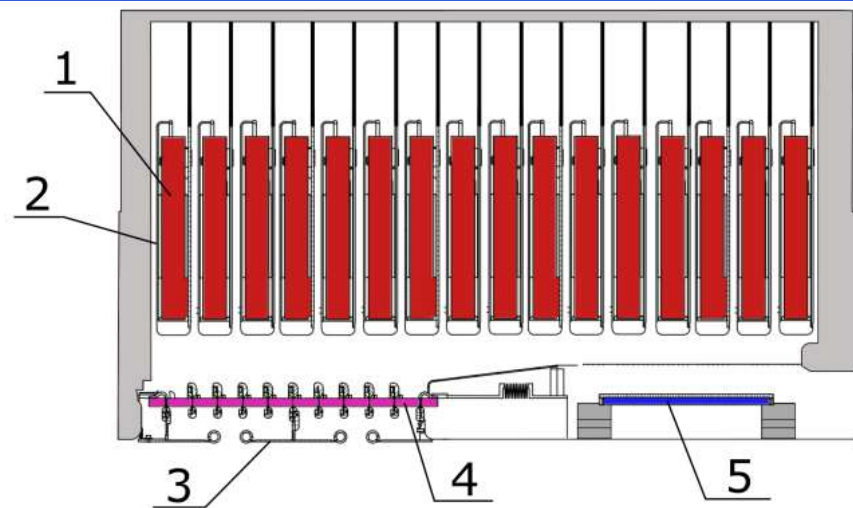


Параметры электронного пучка на выходе ЛИУ

Энергия электронного пучка $-E_{beam}$	5-20 МэВ
Максимальный ток пучка $-I_{beam}$	2 кА
Число ускоряющих модулей $-N_{SAU}$	8-54
Нормализованный эмиттанс	550 п · мм · мрад
Энергетический разброс электронов $-\frac{\Delta E}{E}$	1-2 %

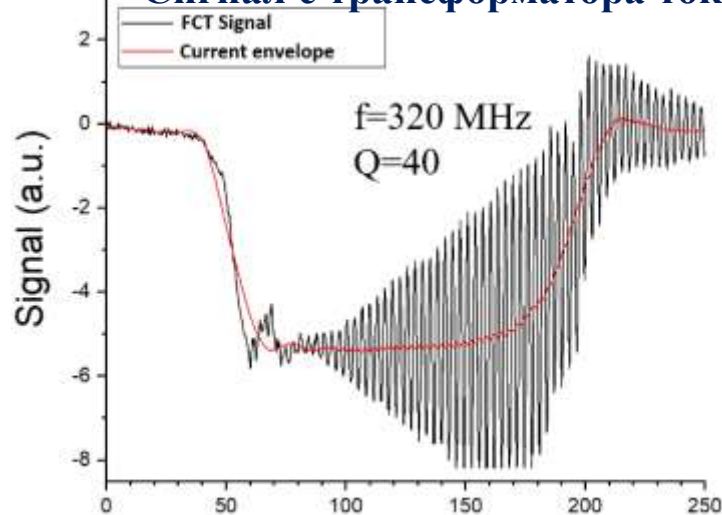
Ссылки:

- *Nikiforov D. A. et al. High-current electron-beam transport in the LIA-5 Linear Induction Accelerator //Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2020. – Т. 17. – С. 197-203.
- **E. S. Sandalov et al., "Electrodynamic System of the Linear Induction Accelerator Module," IEEE TPS, vol. 49, no. 2, pp. 718-728, Feb. 2021.
- ***Видеоматериал взят с информационного портала «Атомная энергия 2.0» <https://www.atomic-energy.ru/video/125877>



Ускоряющий модуль: 1 - индуктор, 2 – первичная обмотка, 3 – экранирующие электроды, 4 – ускорительная трубка, 5 – магнитная линза

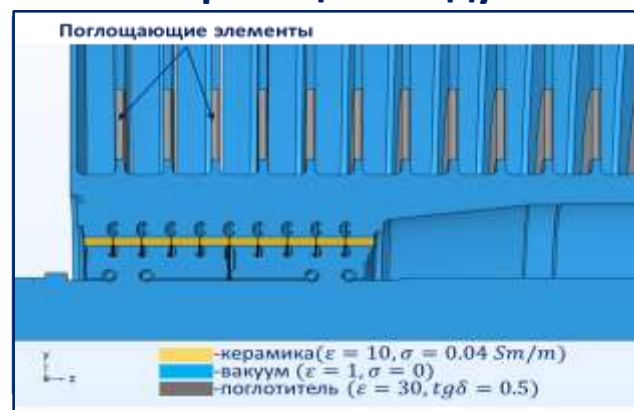
Сигнал с трансформатора тока



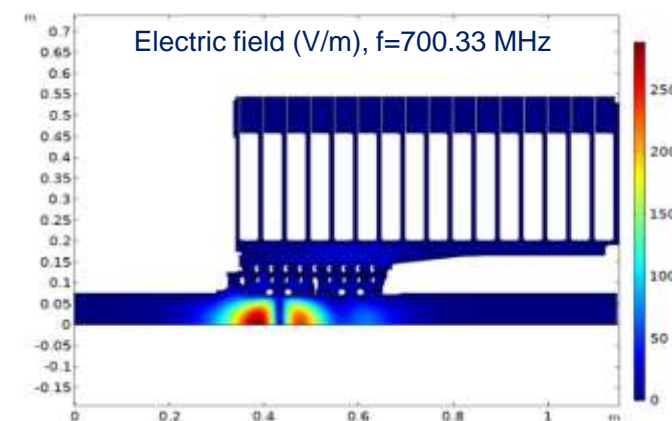
Амплитуда колебаний центра электронного пучка вследствие развития поперечной неустойчивости (VBU):

$$\xi(z) = \xi_0 \left[\frac{\gamma_0}{\gamma(z)} \right]^{1/2} \exp \left[\frac{I_b [kA] N_g Z_{\perp} [\Omega/m]}{3 \cdot 10^4 \langle B [kG] \rangle} \right], \quad Z_{\perp} = Q \cdot \frac{(\int B_{\perp} dz)^2}{2U} \cdot c$$

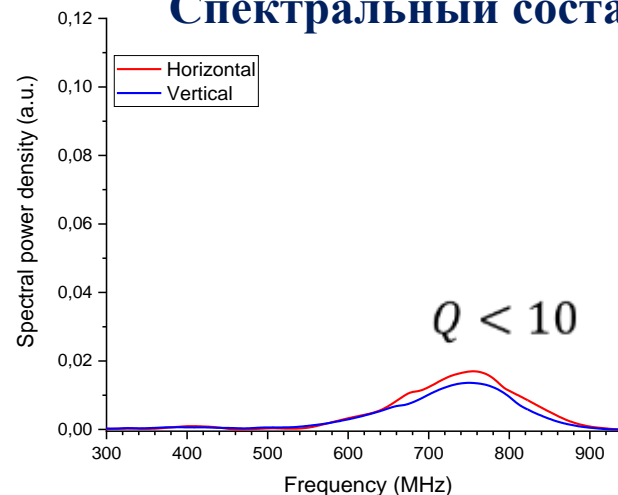
Ускоряющий модуль



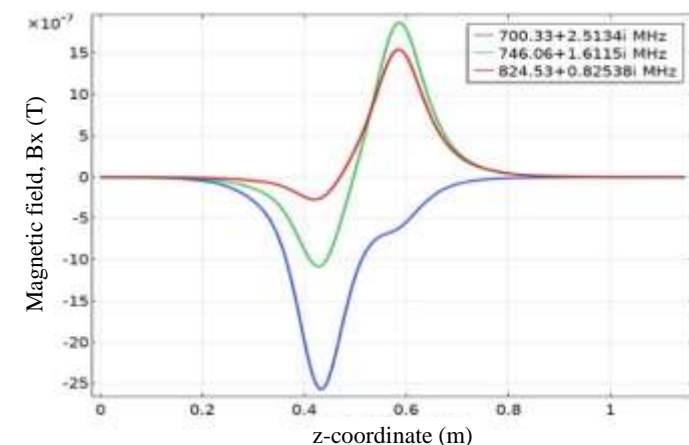
Электрическое поле моды



Спектральный состав



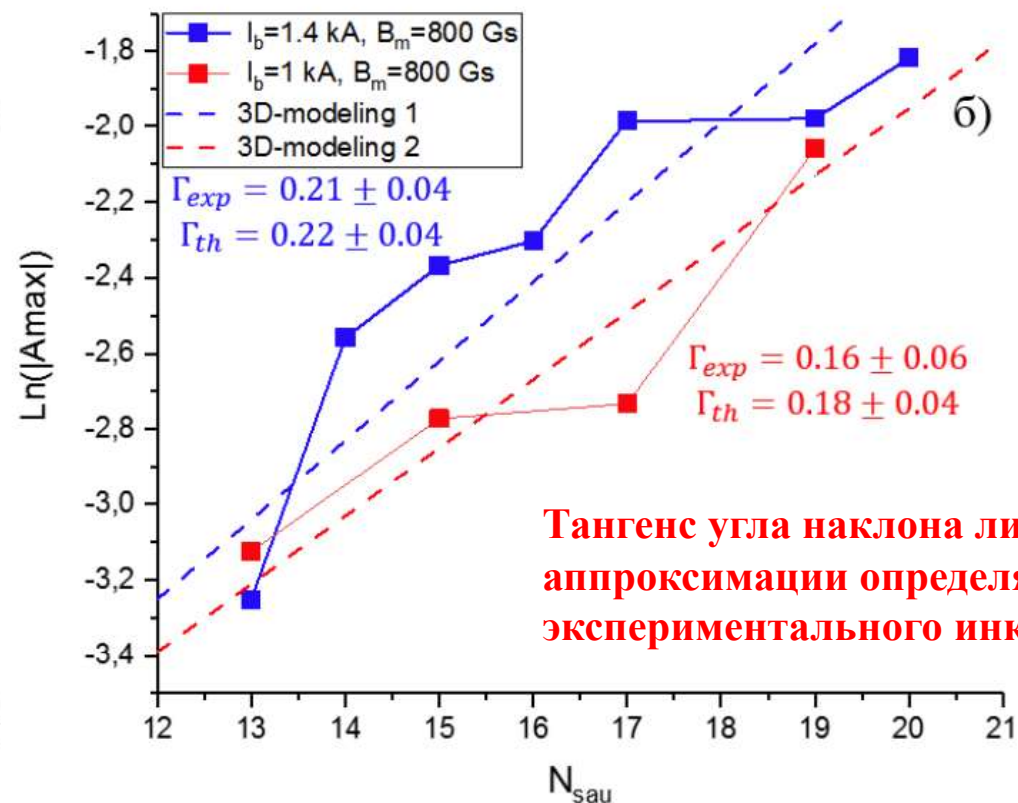
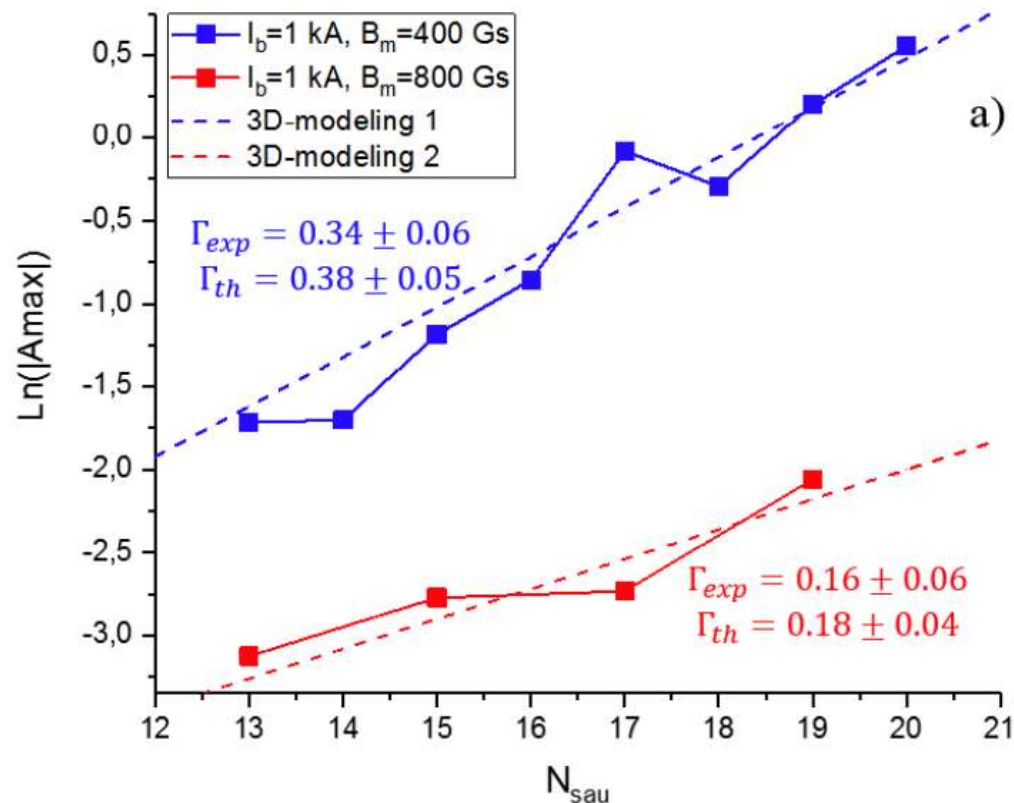
Магнитные поля мод на оси





Инкременты поперечной неустойчивости измерялись в экспериментах по генерации пучка в ЛИУ в следующих режимах:

- $B_m=0.04-0.08$ Тл, $I_b=1000$ А
- $B_m=0.08$ Тл, $I_b=1400$ А

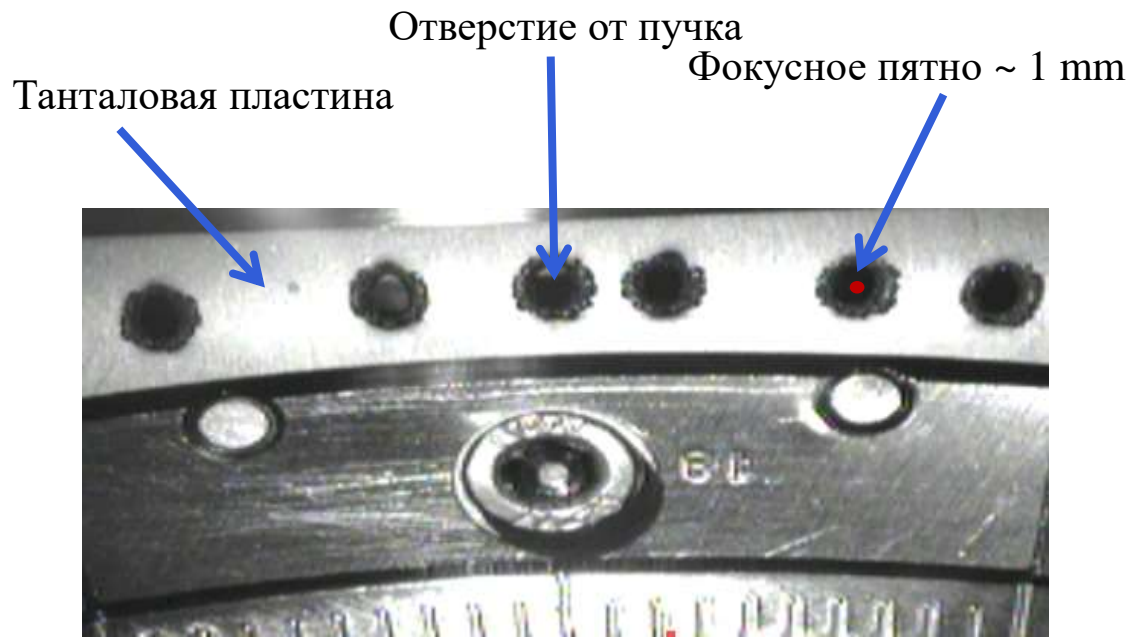


Тангенс угла наклона линейной аппроксимации определяет величину экспериментального инкремента.

Зависимость логарифма максимальной амплитуды колебаний полей дипольных мод от номера модуля ЛИУ в трех режимах его работы. Режимы с одинаковым током пучка 1 кА и разными полями в фокусирующей системе ЛИУ (а): $B_m = 0.04$ Тл и $B_m = 0.08$ Тл; режимы в одинаковом поле $B_m = 0.08$ Тл и разными значениями тока пучка: 1 и 1.4 кА (б). Пунктирной линией показана линейная аппроксимация экспериментальных значений.

С помощью созданного комплекса программ была оптимизирована электродинамическая система ускоряющей структуры ЛИУ для эффективного подавления поперечных колебаний пучка, что позволило осуществить фокусировку пучка на мишени в пятно диаметром 1 мм в различных режимах работы ускорительного комплекса.

Мишенная пластина после воздействия электронного пучка:



Размер фокусного пятна пучка в 5 раз меньше размера отверстия!

Рентгенограмма тестового образца в высоком разрешении:



Специальный «объект» для исследований с эмблемой РОСАТОМ (сталь)

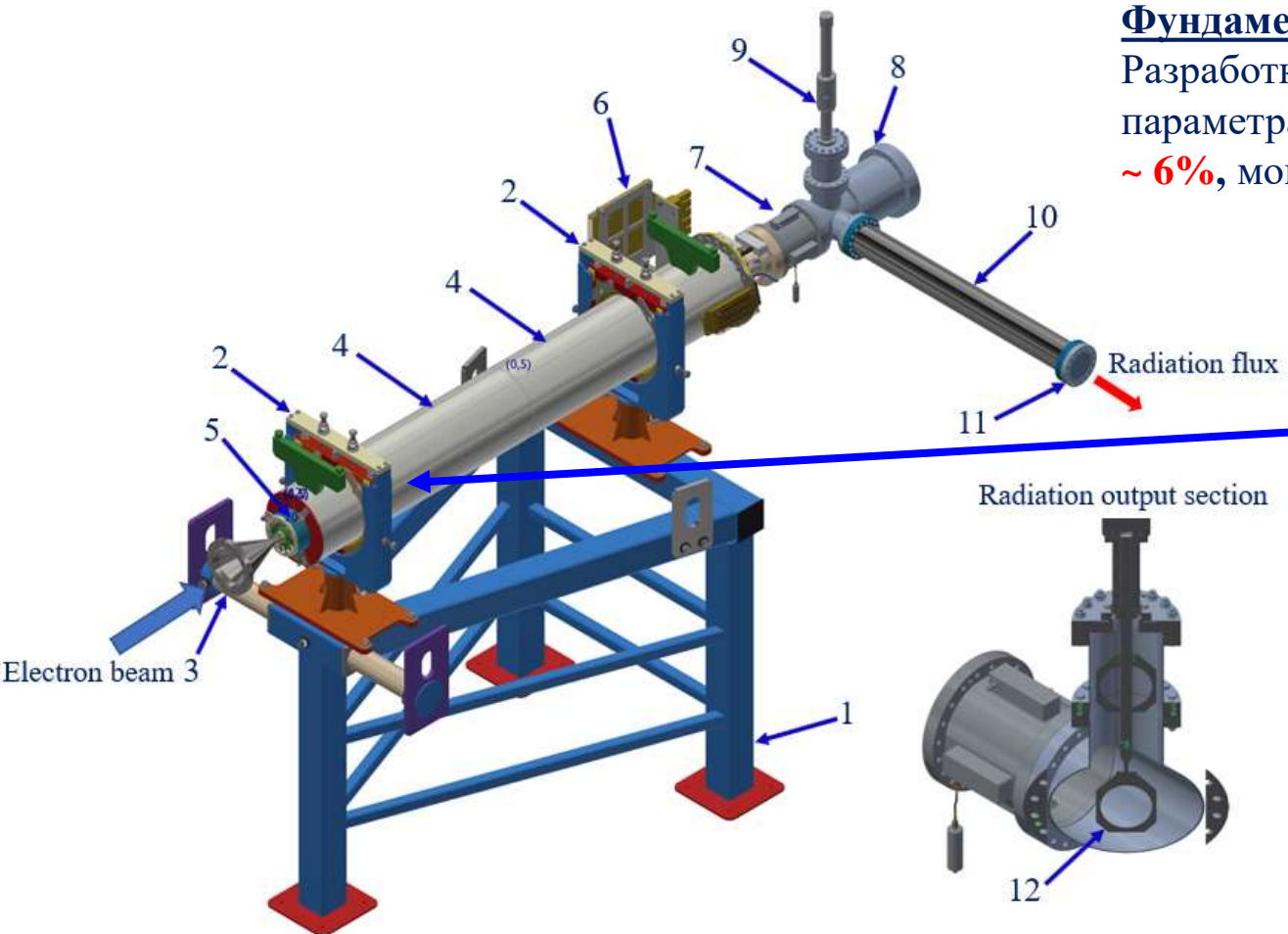
Д.Н. Григорьев и др., данные с детектора

Режим транспортировки пучка:

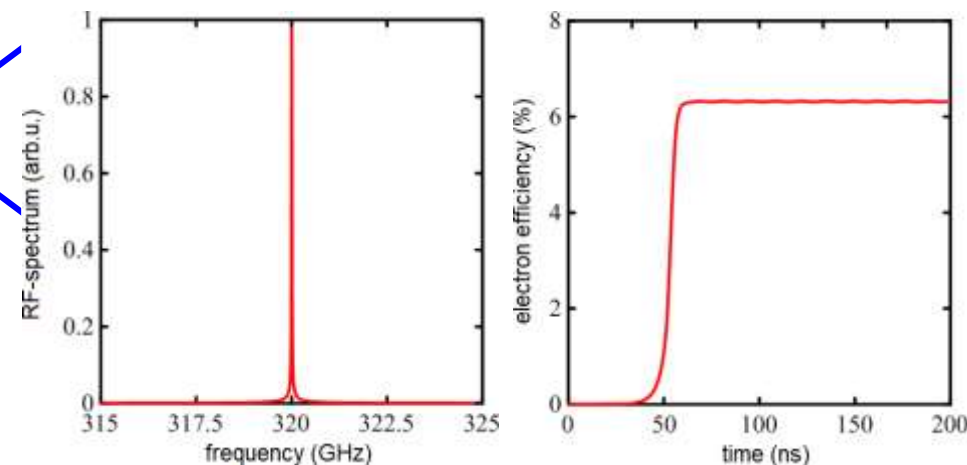
Ток пучка: ~1000 А

Ведущее магнитное поле: 1800 Гс

Характерный размер пучка на мишени (FWHM): ~1.0мм

**Фундаментальная задача:**

Разработка и создание мощного длинноимпульсного ЛСЭ с следующими параметрами: частотный диапазон **0.3-1.2 ТГц**, электронная эффективность **~ 6%**, мощность излучения **~ 0.1-0.5 ГВт**, энергосодержание **~10-100 Дж***.



Параметры пучка: **5 МэВ / 2 кА**

Период ондулятора: **$d_u = 10$ см**

Частота излучения ~0.3 ТГц, Выходная мощность ~ 0.5 ГВт

Электронная эффективность ~ 6%

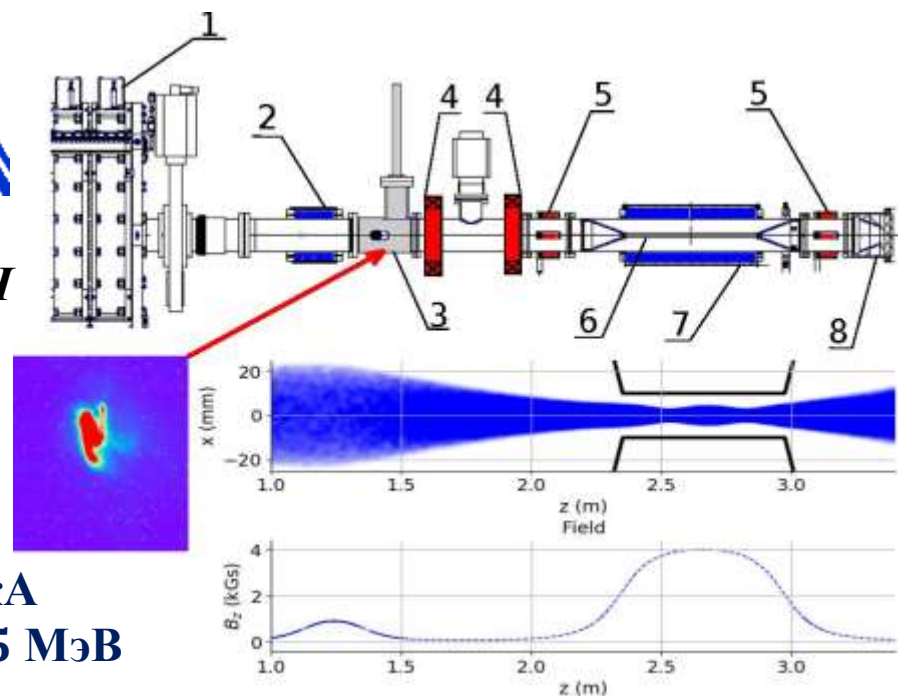
Ссылка Омические потери $\sim 0.2 \times P_{out}$

*Peskov N. Y., S.L. Sinitsky, E.S. Sandalov et al. Powerful Long-Pulse FEL based on Linac LIU: Simulations and Optimization of Parameters for Initial Experiments at 0.3 THz Range //2023 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2023. – С. 1-2.

** E.S. Sandalov, S.L. Sinitsky, A.V. Arzhannikov et al. Kiloampere Electron Beam of a Linear Induction Accelerator as a Driver for a Submillimeter Free Electron Laser. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 87, 573–579 (2023).

Общая схема секции ЛСЭ:

1 – подставка, 2 – система позиционирования, 3 – вакуумный канал, 4 – соленоиды системы компрессии, 5 – винтовой бифилярный ондулятор, 6 – платформа для токовводов, 7 – датчик положения пучка (пикап), 8 – система вывода излучения и коллектор пучка, 9 – вакуумный ввод для установки зеркала с целью отделения потока излучения и пучка, 10 – вакуумный канал для вывода излучения, 11 – барьерное резонансное окно (нитрид бора (NB)), 12 – зеркало .



$I_b = 1 \text{ кА}$
 $E_e = 5 \text{ МэВ}$

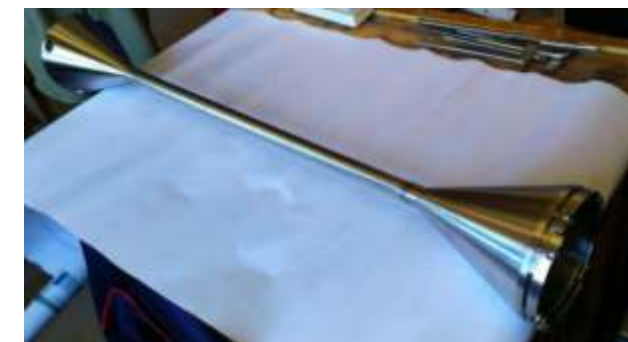
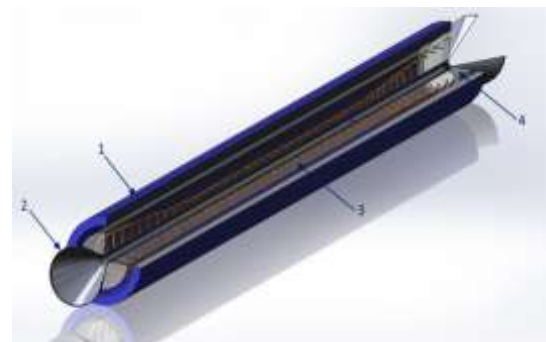
Схема эксперимента по сжатию пучка:

1 – последний ускорительный модуль, 2 – согласующие импульсные магнитные линзы, 3 – экран переходного излучения, 4 – дипольные корректоры, 5 – мониторы пучка (BPM), 6 – вакуумная камера системы компрессии, 7 – длинный импульсный соленоид, 8 – коллектор пучка.

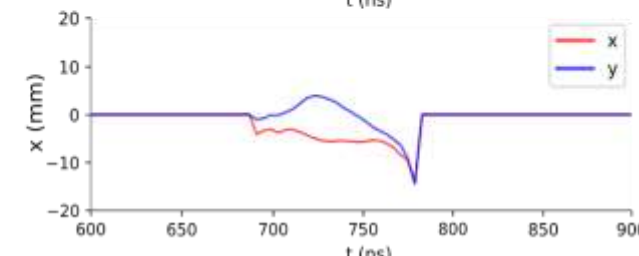
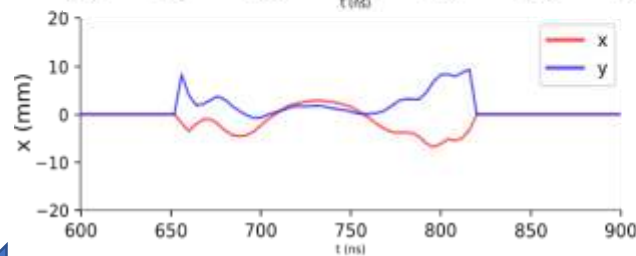
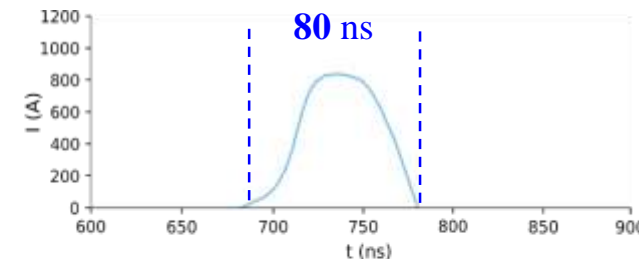
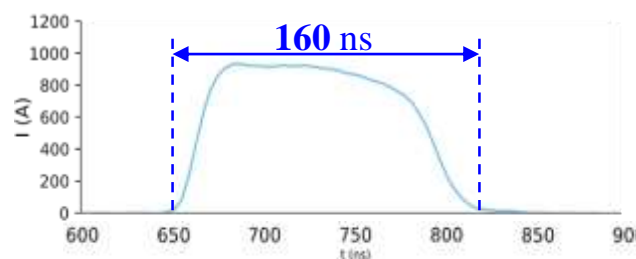
*D.A. Nikiforov, S.L. Sinitsky, E.S. Sandalov et al. JINST 16 P11024

Транспортировка тока пучка через систему компрессии была ограничена штопорным движением во время фронта импульса тока!

Задача: осуществить компрессию электронного пучка с $\varnothing 40 \text{ мм}$ до $\varnothing 10 \text{ мм}$ для транспортировки в секции ЛСЭ



Вакуумная камера системы компрессии пучка: диаметр регулярного сечения- 20 мм, длина 600 мм, длина конических участков на входе и выходе 150 мм.



Сигналы с мониторов положения пучка: токи пучка (вверху) и положение центра пучка (внизу). Левая и правая колонки – до и после системы сжатия.

Результат: около 90% тока пучка транспортируется через канал ЛСЭ.



В ходе экспериментальных и теоретических исследований были успешно решены следующие фундаментально-прикладные задачи:

- 1) С помощью теоретических и экспериментальных методов впервые в мире исследована поперечная неустойчивость сильноточного электронного пучка в ускорительной структуре ЛИУ с **дискретной фокусирующей системой**. В результате этих исследований создана физическая модель, описывающая динамику этой неустойчивости пучка в ЛИУ.
- 2) На основе этих исследований разработаны и реализованы в эксперименте эффективные методы подавления этой неустойчивости, что позволило сформировать в ЛИУ электронный пучок с током до **2 кА**, энергией до **20 МэВ** при рекордно низкой величине нормализованного эмиттанса электронного пучка **~550 п · мм · мрад**. В итоге выполнения данной работы стал возможным запуск комплекса импульсной рентгеновской томографии на базе линейного индукционного ускорителя.
- 3) Разработан проект и начато производство основных узлов уникального длинноимпульсного лазера на свободных электронах на основе сильноточного электронного пучка ЛИУ с рекордными параметрами импульса излучения в частотной области **0.3–1.2 ТГц**: мощность **~ 0.1-0.5 ГВт**, электронная эффективность при **0.3 ТГц ~ 6%**, энергосодержание **~ 10-100 Дж**, монохроматичность излучения $\Delta f/f \sim 10^{-5} - 10^{-4}$.



Спасибо за внимание!



Контактные данные:

Сандалов Евгений Сергеевич,
Канд. физ.-мат. наук,
Старший научный сотрудник лаборатории 10,
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
E-mail: E.S.Sandalov@inp.nsk.su
Phone: +7(383)329-49-24



Ссылки:

1. Electrodynamic system of the linear induction accelerator module / E. S. Sandalov, S. L. Sinitsky, A. V. Burdakov [et al.]. – Текст : электронный // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2021. – Vol. 49, nr 2. – P. 718–728. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9321703>
2. D.A. Nikiforov, A.V. Petrenko, S.L. Sinitsky, P.A. Bak, D.I. Skovorodin, P.V. Logachev, K.I. Zhivankov, E.S. Sandalov, O.I. Meshkov, A.V. Ivanov, V.V. Fuodorov, A.A. Starostenko, O.A. Pavlov, G.I. Kuznetsov, A.A. Krylov, D.A. Starostenko, O.A. Nikitin and A.R. Akhmetov, Investigation of high current electron beam dynamics in linear induction accelerator for creation of a high-power THz radiation source // Journal of Instrumentation.– 2021. – Vol. 16, nr 11. – P. P11024. URL:<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/16/11/P11024>.
3. Исследование поперечной неустойчивости сильноточного релятивистского электронного пучка в линейном индукционном ускорителе / Е. С. Сандалов, С. Л. Синицкий, Д. И. Сковородин [и др.]. – Текст : электронный // Сибирский физический журнал. – 2022. – Т. 17, № 1. – С. 5–22. – URL: <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2022-17-1-5-22>.
4. E. S. Sandalov, S. L. Sinitsky, A. V. Arzhannikov, D. A. Nikiforov, D. I. Skovorodin, V. A. Pavlyuchenko, N. S. Ginzburg, N. Yu. Peskov, R. V. Protas D. Yu. Karasev, Kiloampere Electron Beam of a Linear Induction Accelerator as a Driver for a Submillimeter Free Electron Laser // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2023. – Т. 87. – №. 5. – С. 573-579.
5. Sandalov E.S., Sinitsky S.L., Arzhannikov A.V. et al. Magnetic System of a Sub-Gigawatt Free-Electron Laser of the Terahertz Range Based on a Kiloampere Beam of Relativistic Electrons. Radiophys Quantum El 66, 489–503 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11141-024-10323-w>

Model of the BBU excitation

1) С помощью программного комплекса решается задача Штурма-Лиувилля на собственные частоты и собственные функции резонатора:

$$\text{rot} \left[\frac{\text{rot} \vec{A}_l(\vec{r})}{\mu(\vec{r})} \right] = \frac{\omega_l^2 \varepsilon(\vec{r})}{c^2} \vec{A}_l(\vec{r}) \quad (1)$$

2) Эти функции $\vec{A}_l(\vec{r})$ образуют полный набор ортогональных функций, по которым можно разложить любое поле.

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = - \sum \dot{\sigma}_l(t) \vec{A}_l(\vec{r}) - \nabla \varphi \quad \vec{B}(\vec{r}, t) = \sum \sigma_l(t) \text{rot} \vec{A}_l(\vec{r}) \quad (2)$$

3) Из (2) и уравнения $\text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ при интегрировании его по объему резонатора с весом $\varepsilon(\vec{r})$ с учетом ортогональности функций $\vec{A}_l(\vec{r})$:

$$\int \varepsilon(\vec{r}) (\vec{A}_l(\vec{r}), \vec{A}_m(\vec{r})) dV = \delta_{l,m} \int (\vec{A}_m(\vec{r}), \vec{A}_m(\vec{r})) dV \quad (3)$$

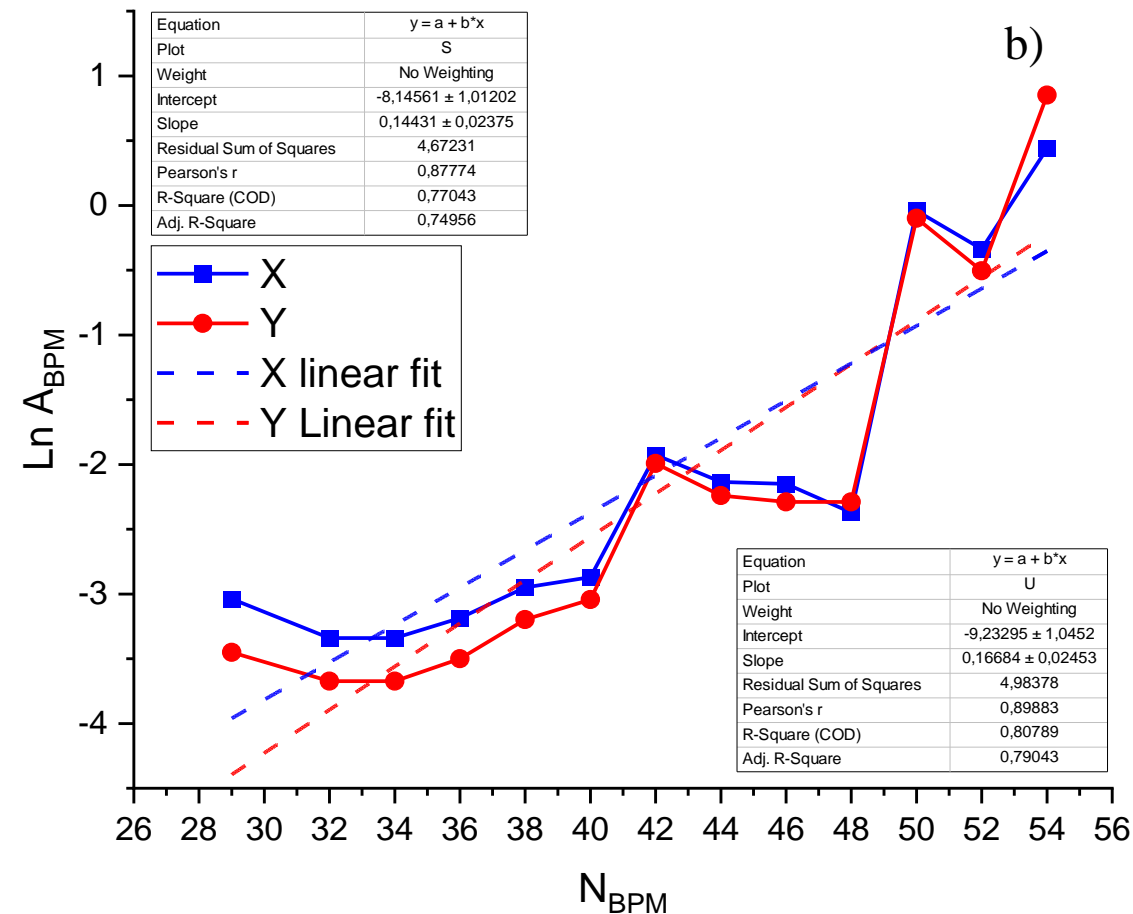
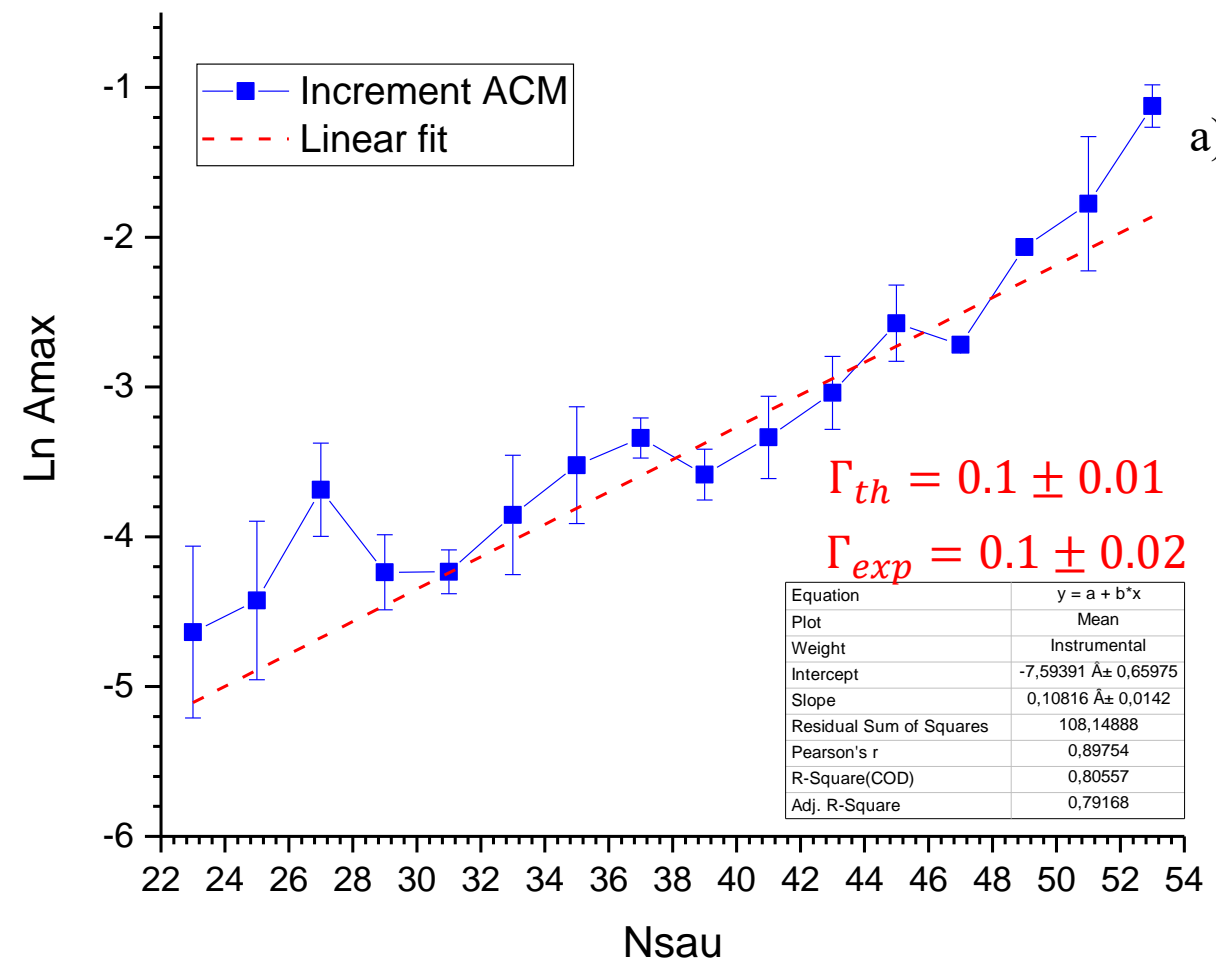
$$\ddot{\sigma}_m + 2\gamma_m \dot{\sigma}_m + |\omega_m|^2 \sigma_m = \frac{-i\omega_m \int (\vec{j}(\vec{r}, t), \vec{E}_m(\vec{r})) dV}{\int \varepsilon(\vec{r}) \varepsilon_0 (\vec{E}_m(\vec{r}), \vec{E}_m(\vec{r})) dV} \equiv \omega_m \alpha_m(t) \quad (4)$$

4) Уравнения (4) для каждой из исследуемых мод во всех модулях необходимо дополнить уравнениями движения частиц пучка

$$\begin{cases} \vec{r}_i = c\vec{\beta}_i \\ \vec{p}_i = q_i(\vec{E} + c[\vec{\beta}_i \times \vec{B}]) \end{cases} \quad (5)$$

$$\vec{E} = \vec{E}_{\text{acc}}(\vec{r}) + \sum \text{Im}(\dot{\sigma}_m \vec{E}_m(\vec{r})/\omega_m) + \vec{E}_b(\vec{r}, t),$$

$$\vec{B} = \vec{B}_{\text{lens}}(\vec{r}) + \sum \sigma_m(t) \vec{B}_m(\vec{r})$$



Dependence of the logarithm of the maximum amplitude of mode field oscillations on the LIA module number and dependence of the logarithm of the maximum amplitude of beam centroid oscillations:

Modes with the same beam current of **2 kA** and in the same fields in the LIA focusing system (**Bm = 0.27 T** and **Bm = 0.27 T**);
 (a) ACM data and (b) BPM data. The dotted line shows linear approximations of the experimental points.



*Sandalov E. S., Sinitsky S.L., Arzhannikov A.V. et al., Magnetic System of a Sub-Gigawatt Free-Electron Laser of the Terahertz Range Based on a Kiloampere Beam of Relativistic Electrons //Radiophysics and Quantum Electronics. – 2023. – T. 66. – №. 7. – C. 489-503.

Separation of the beam from the radiation and output into the SHF window

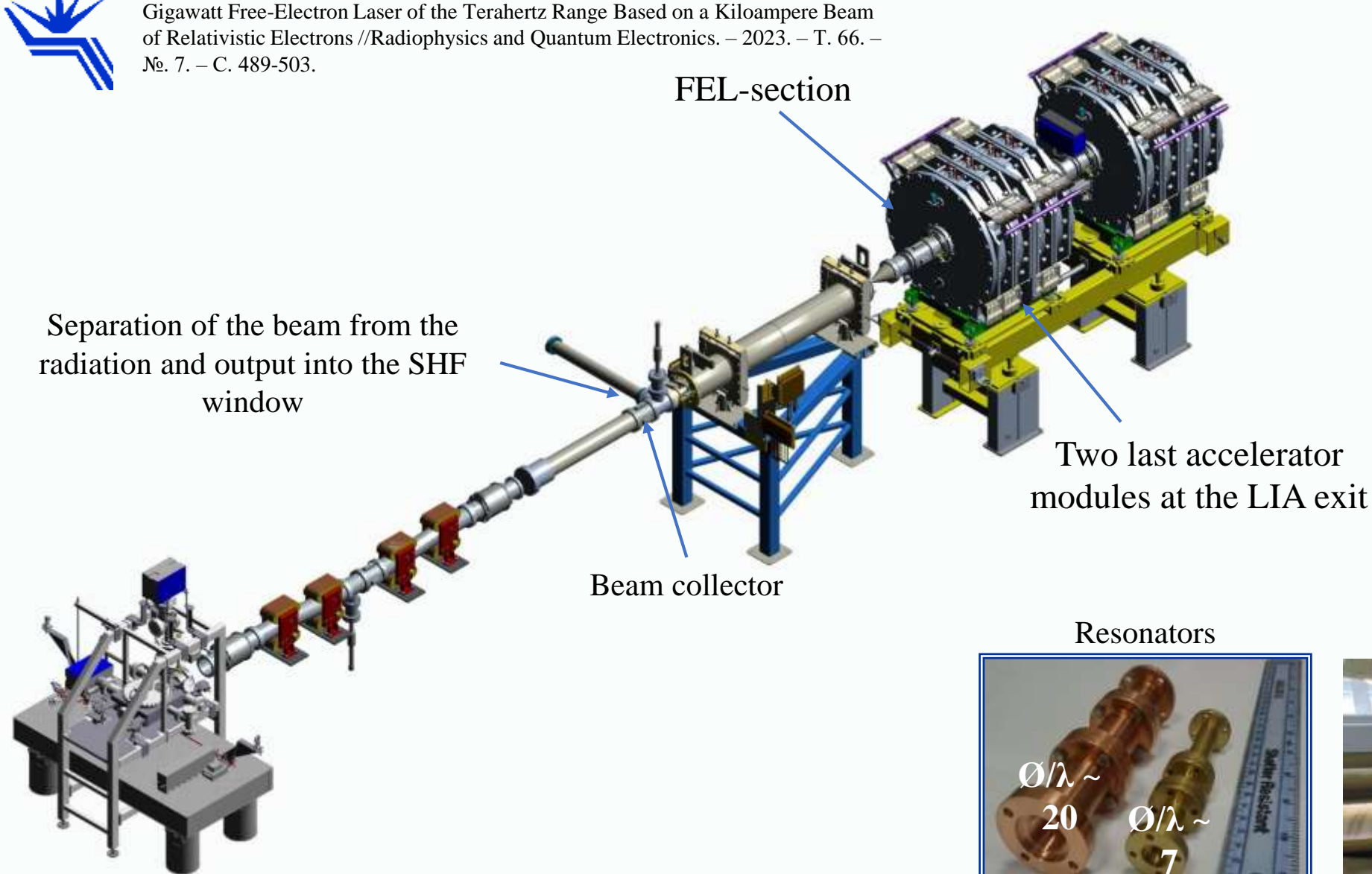
FEL-section

Two last accelerator modules at the LIA exit

Beam collector

Resonators

Helical undulator





Project aims:

1. Creation of the FEL generator of powerful pulses of coherent EM-radiation in the subTHz/THz ranges;
 2. Selection of optimal beam formation modes for pulse generation
-

Main parameters of FELs generator based on the LIA beam (a joint project of the BINP SB RAS & IAP RAS)

Electron energy	5 MeV (in the future 20 MeV)
Beam current	1-2 kA
Beam diameter in the FEL system	10 → 3 → 1 mm
Pulse duration	60 – 200 ns
Undulator period	10 → 5 → 3 cm
Operating frequency	0.3 THz → 1 THz → 10 THz
Radiation power level	~ 0.1 - 0.5 GW
Electron efficiency	3 - 5% → 1 - 2% → 0.1 - 0.2%
Energy content per pulse	~ 10 -100 J

Key problems in creating the FEL generator in the THz range:

- Creation of an electron-optical system that ensures the formation of a compressed electron beam in the channel of FEL generator with low values of energy and angular spread of electrons acceptable for efficient FEL operation;**
- Development, creation and testing of the electrodynamic FEL system based on a highly selective oversized resonator in order to achieve a single-mode and narrow-band generation in THz frequency range.**

Characteristics::

Doppler frequency conversion $\sim \gamma^2$

Velocity of beam electrons $\beta_{\perp} \sim \gamma^{-1}$

E-beam grouping parameter $\mu \sim \gamma^{-2}$

Electron-efficiency $\eta \sim N^{-1}$

References:

Peskov N. Y., Ginzburg N.S., Zaslavskiy V.Yu. et al., Oversized modified Bragg cavities for high-power long-pulse subterahertz Free-Electron Lasers //Radiophysics and Quantum Electronics. – 2020. – T. 63. – C. 440-448.

Sandalov E.S., Sinitsky S.L., Arzhannikov A.V. et al. Kiloampere Electron Beam of a Linear Induction Accelerator as a Driver for a Submillimeter Free Electron Laser. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 87, 573–579 (2023).

EFRE-2024: N.S. Ginzburg, “High-Power Relativistic Generators of Terahertz-Range Radiation”

(The plenary session, 16 September)

Options for the FEL electrodynamic system:

- **Modified Bragg resonator:**

Oversize parameter: $\varnothing/\lambda \sim 20 \div 40$

⇒ operating mode in the sub-THz range: **0.3 THz up to 0.6 THz**

- **Talbot-type quasi-optical resonator :**

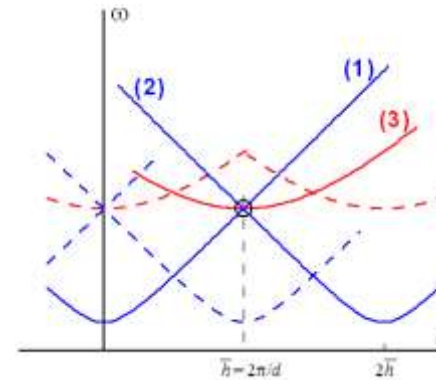
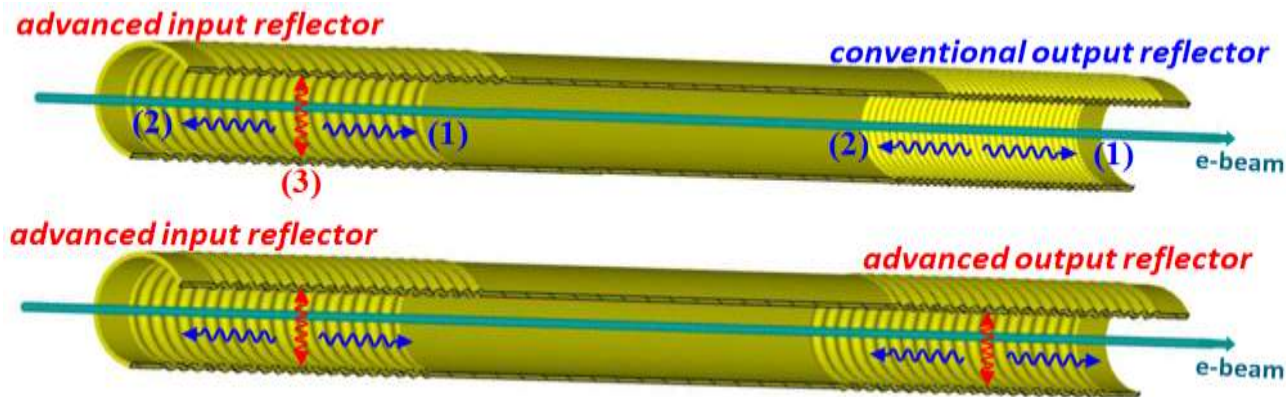
Oversize parameter: $\varnothing/\lambda \geq 50$

⇒ operating mode in the sub-THz range: **1 - 2 THz and higher**

Modified Bragg resonators*

connection between accompanying (1, 2) and quasi-critical (3) waves

$$\bar{h} \approx h_{adv} \quad d \approx \lambda$$



$\varnothing/\lambda \sim 5 - 7$

$\varnothing/\lambda \geq 10$



Corrugation period: 1.05 mm

Corrugation depth: 0.6 mm

$\varnothing_{cavity} \sim 20$ mm

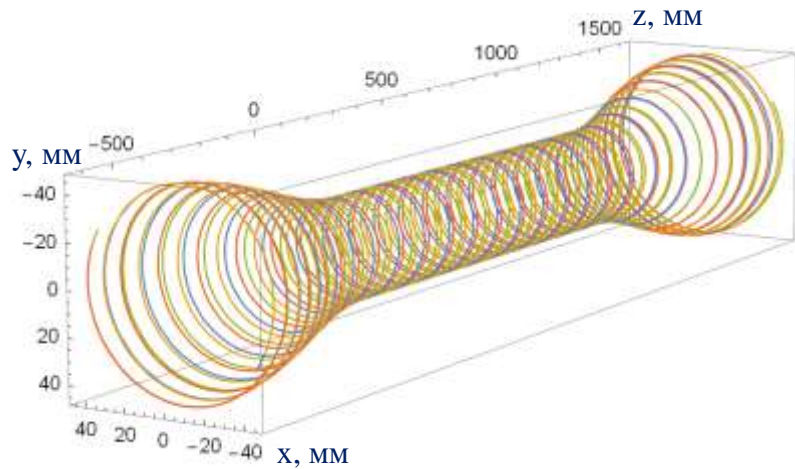
$\varnothing_{cavity} \sim 7$ mm

*Peskov N. Y. et al. Oversized modified Bragg cavities for high-power long-pulse subterahertz Free-Electron Lasers //Radiophysics and Quantum Electronics. – 2020. – T. 63. – C. 440-448.

**Peskov N. Y. et al. Electrodynamic System of a Powerful THz Band Free Electron Laser Based on the LIU Linear Induction Accelerator: Modeling and Cold Tests //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2023. – T. 87. – №. 5. – C. 669-673.

Распределение магнитного поля, формируемого в магнитной системе ЛСЭ*

Обмотки винтового ондулятора

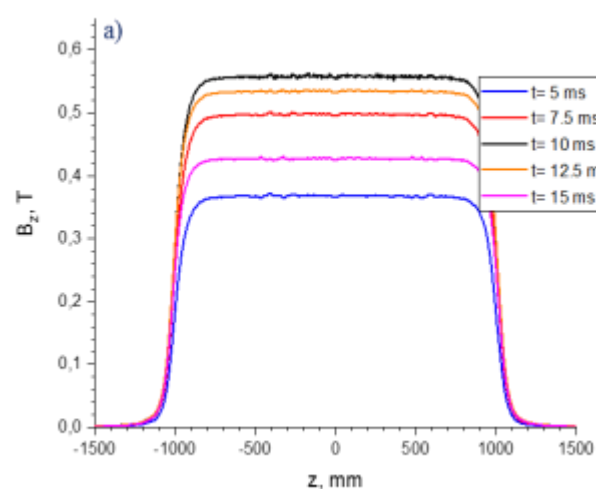


Параметры ондулятора		$d_u = 10$ см	$d_u = 6$ см	$d_u = 3$ см
Рабочий диапазон ЛСЭ [ТГц]		0.3 - 0.4	0.6 - 0.7	1.1 - 1.2
Длина входной/выходной секции L_{in} / L_{out} [см]		60 / 30	36 / 18	18 / 9
Диаметр регулярной секции D_u [мм]		48	28	14
Длина L_{reg} [см]	регулярной секции	120	90	60

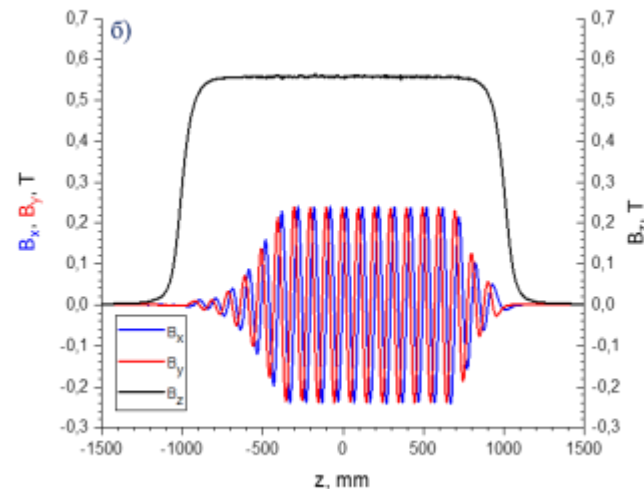
*Sandalov, E.S et al. Kiloampere Electron Beam of a Linear Induction Accelerator as a Driver for a Submillimeter Free Electron Laser. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 87, 573–579 (2023)

** Sandalov E. S. et al. Magnetic System of a Sub-Gigawatt Free-Electron Laser of the Terahertz Range Based on a Kiloampere Beam of Relativistic Electrons //Radiophysics and Quantum Electronics. – 2024. – С. 1-15.

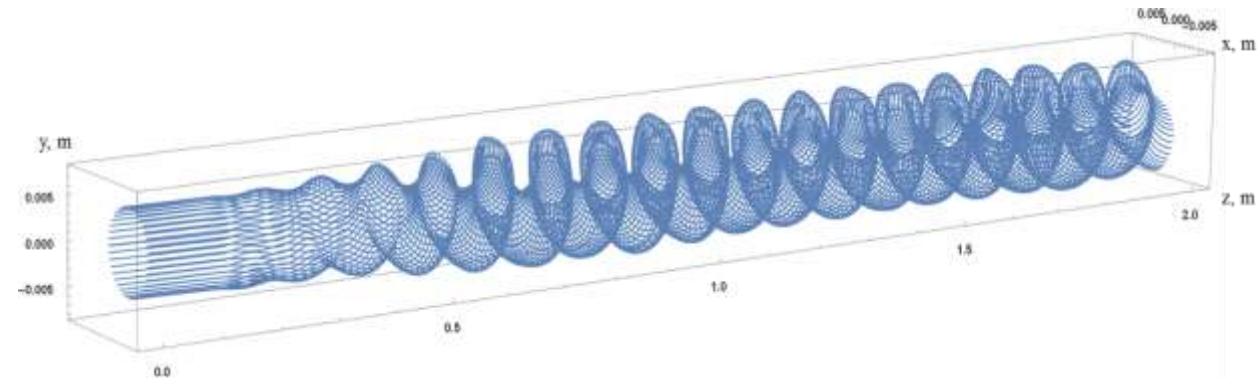
Распределение магнитного поля на оси системы



а) Соленоиды компрессии



б) Винтовой ондулятор $d_u = 10$ см и соленоиды



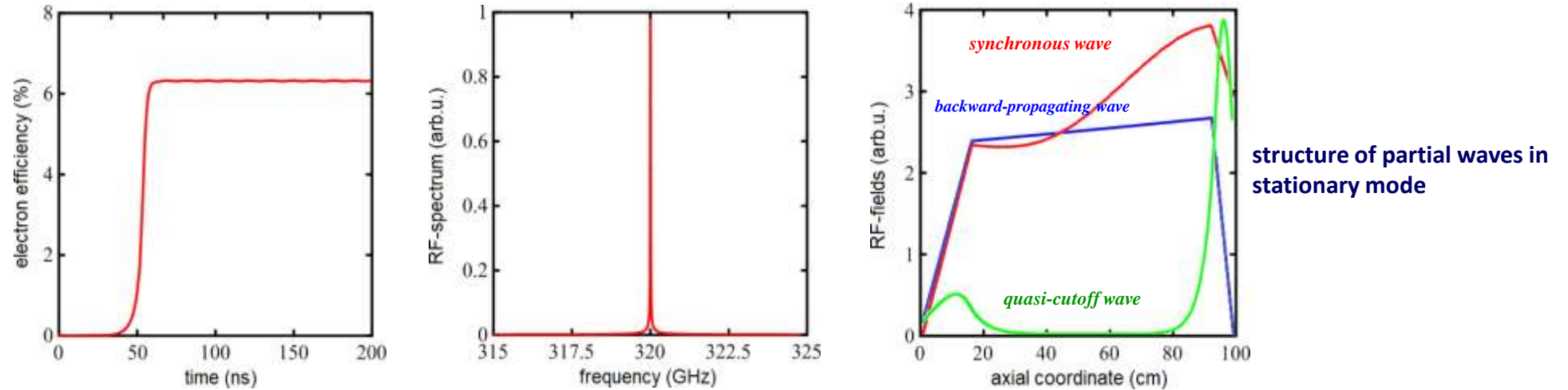
Траектории электронов пучка в оптической системе ЛСЭ с периодом $d_u = 10$ см, амплитудой поперечного поля $B_u = 0.2$ Тл, продольного поля $B_0 = 0.5$ Тл для пучка с $E_e = 6$ МэВ, $I_b = 1$ кА и радиусом пучка $r_b = 0.5$ см

Calculation results for the generation of THz radiation near a frequency of 0.3 THz in the FEL scheme using a modified Bragg resonator with $\varnothing/\lambda \sim 20$

Beam parameters: 5 MeV / 2 kA / 200 ns

Undulator period: $d_u = 10$ cm

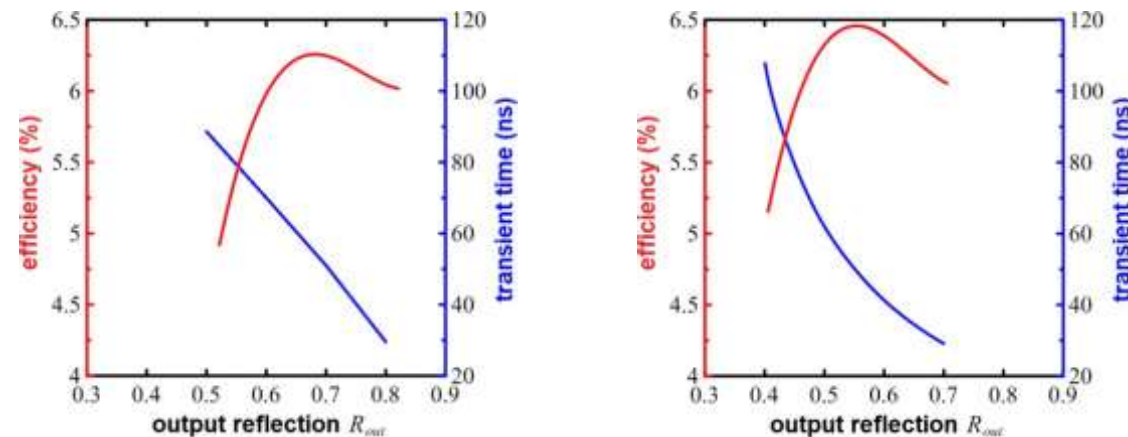
Establishment of a **stationary narrow-band lasing regime** in an “optimal” resonator*



Optimization of parameters of a two-mirror resonator with Bragg reflectors

regular section $L_0 = 70$ cm

regular section $L_0 = 80$ cm



Output power ~ 0.5 GW

Electron efficiency ~ 6%

Ohmic losses ~ $0.2 \times P_{out}$

*Peskov N. Y. et al. Powerful Long-Pulse FEL based on Linac LIU: Simulations and Optimization of Parameters for Initial Experiments at 0.3 THz Range //2023 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2023. – C. 1-2.