



Пучково-плазменный генератор импульсов ТГц
излучения микросекундной длительности мощностью
масштаба 10 МВт

Самцов Д.А.



План доклада

Введение

- Актуальность
- Метод генерации

Полученные результаты

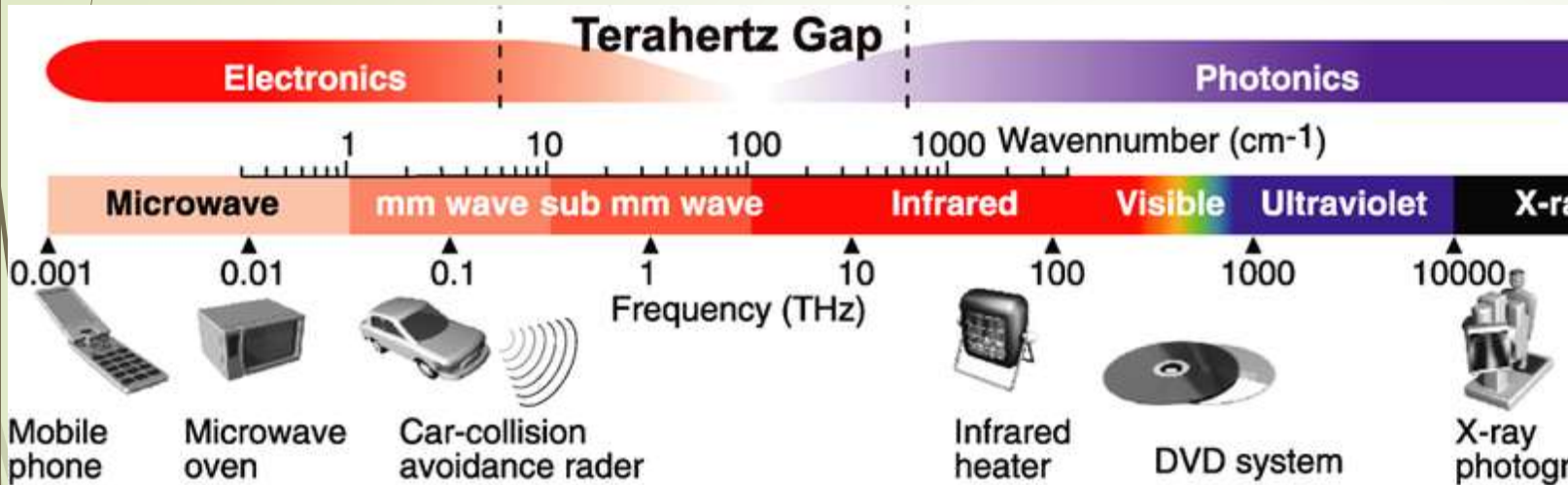
- Спектр излучения
- Мощность генерируемого потока
- Тестовый опыт применительно к сфере приложений
- Направление развития работ

Заключение



Введение: актуальность

3



Особенности излучения ТГц диапазона:

- в области частот лежат резонансы супрамолекулярных структур и молекулярных кристаллов
- потоки излучения распространяются в диэлектриках, полупроводниках, жидких и газообразных средах

Возможные приложения ТГц излучения высокой мощности

- диагностика состояний тканей и органов человека;
- создание систем радиолокации с возможностью визуализации скрытых объектов;
- спектроскопия и возбуждение фононных колебаний в молекулярных кристаллах и супрамолекулярных структурах
- воздействие на вещества с целью изменения их свойств

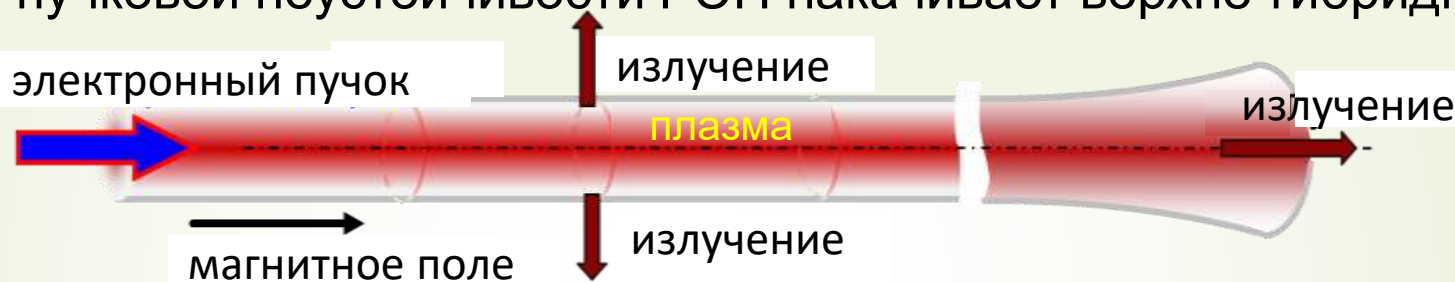
Для реализации этих и других приложений, использующих терагерцовое излучение, необходимо создать источники потоков излучения с необходимыми спектральными и энергетическими характеристиками.

Введение: механизмы генерации излучения в плазме

4

Обсуждаемый метод генерации терагерцового излучения заключается в использовании механизмов конверсии плазменных волн, накачиваемых пучком релятивистских электронов (РЭП), в поток электромагнитного излучения

В процессе развития пучковой неустойчивости РЭП накачивает верхне-гибридные волны с частотой f_h



$$f_h = (f_p^2 + f_c^2)^{1/2}$$

$$f_c = 28 \times 10^9 \times B \text{ [T]}$$

$$B = 0.4 - 4 \text{ T}$$

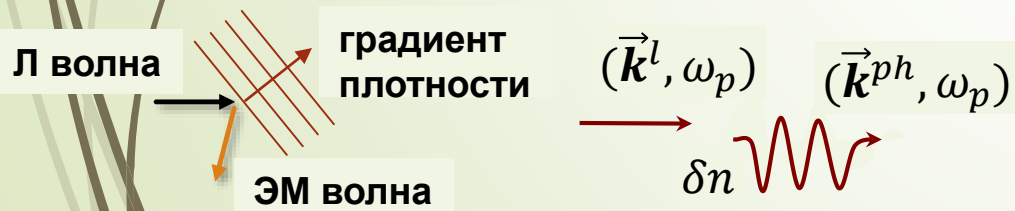
$$f_c = 11 - 110 \text{ GHz}$$

$$f_p = 90 \times 10^2 \times \sqrt{n} \text{ [cm}^{-3}\text{]}$$

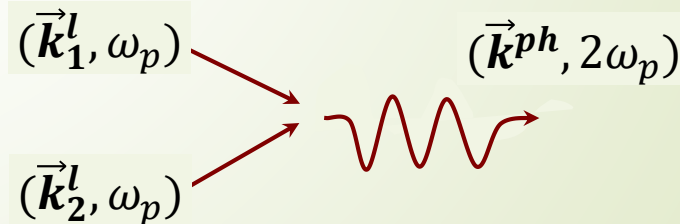
$$n_p = 10^{14} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$


$$f_p = 90 - 900 \text{ GHz}$$

- **прямая конверсия на градиентах плотности**



- **слияние двух верхне-гибридных волн в электромагнитную**





Введение: преимущества плазменно-пучкового генератора по отношению к вакуумным приборам

5

Преимущества плазменных генераторов перед вакуумными :

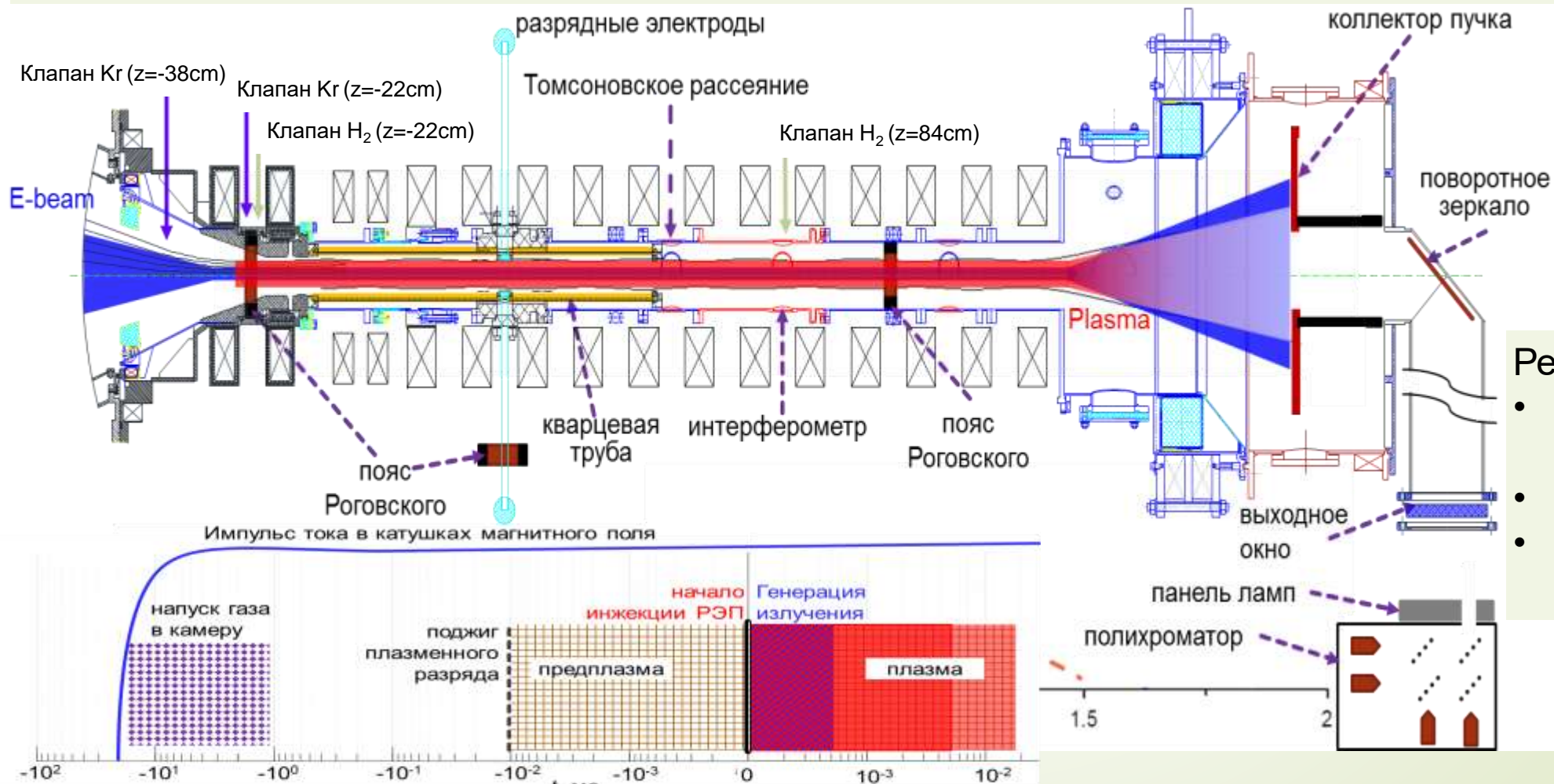
- нейтрализация пучка по заряду и току плазмой в генераторе излучения обеспечивает мощность пучка в нём **мульти-гигаваттного** уровня;
- высокая эффективность накачки пучком плазменных колебаний создаёт условия получения потоков излучения мощностью в **сотни мегаватт**;
- накачка пучком колебаний в плазме с плотностью $n_e \sim (10^{14}-10^{16}) \text{ см}^{-3}$ открывает возможность генерации направленных потоков излучения в интервале частот **$f \sim 0.1 - 1 \text{ ТГц}$ ($\lambda \sim 3 - 0.3 \text{ мм}$)** в условиях быстрой перестройки частоты.



Экспериментальная установка ГОЛ-ПЭТ

6

Возможность и условия эффективной работы пучково-плазменного генератора в указанном интервале частот были выявлены в ходе проведения экспериментальных исследований на установке ГОЛ-ПЭТ.



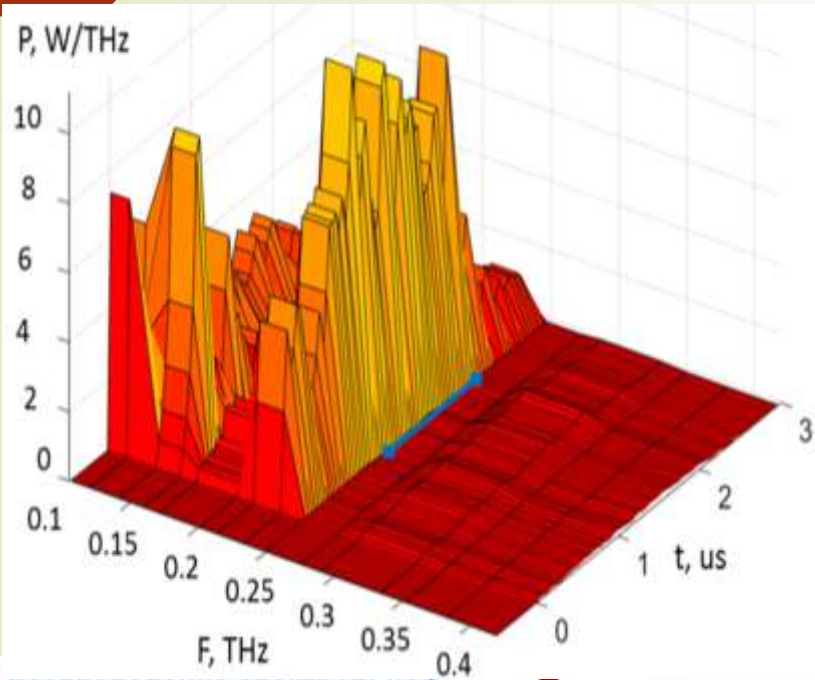
Регистрация излучения:

- 8 канальный полихроматор
- Калориметр
- Панели газоразрядных ламп



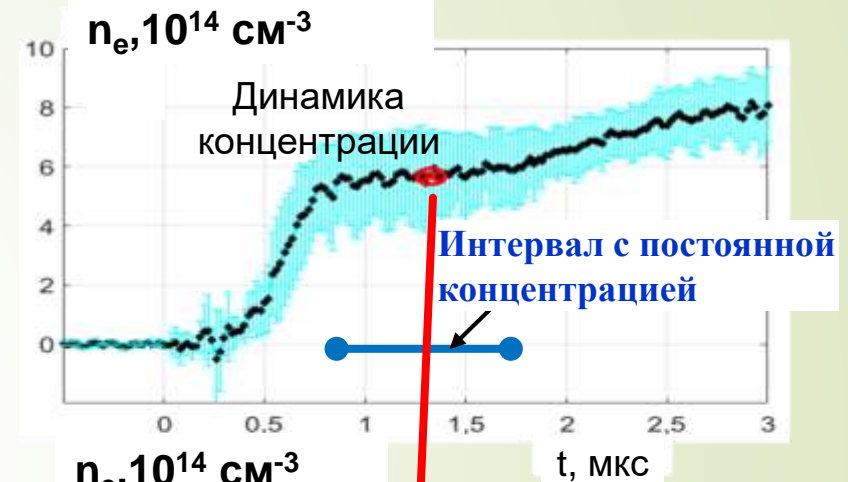
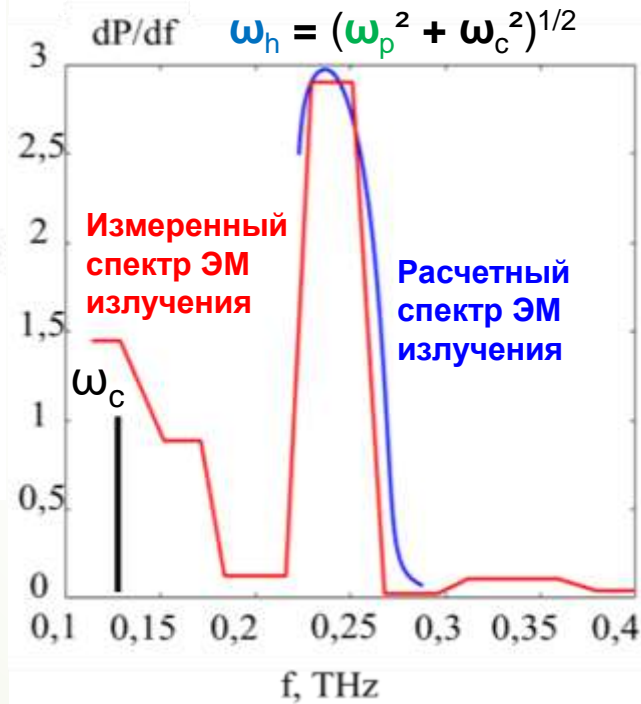
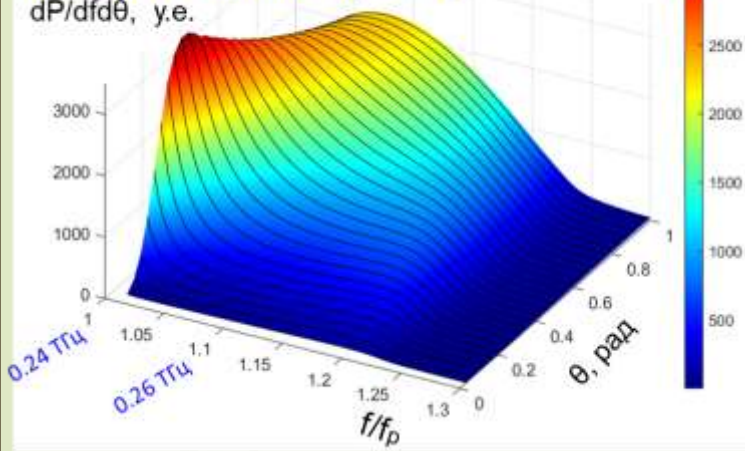
Спектральный состав потока излучения в случае однородной плазмы

7



Угловое распределение спектральной плотности мощности (расчет)

$dP/dfd\theta$, у.е.

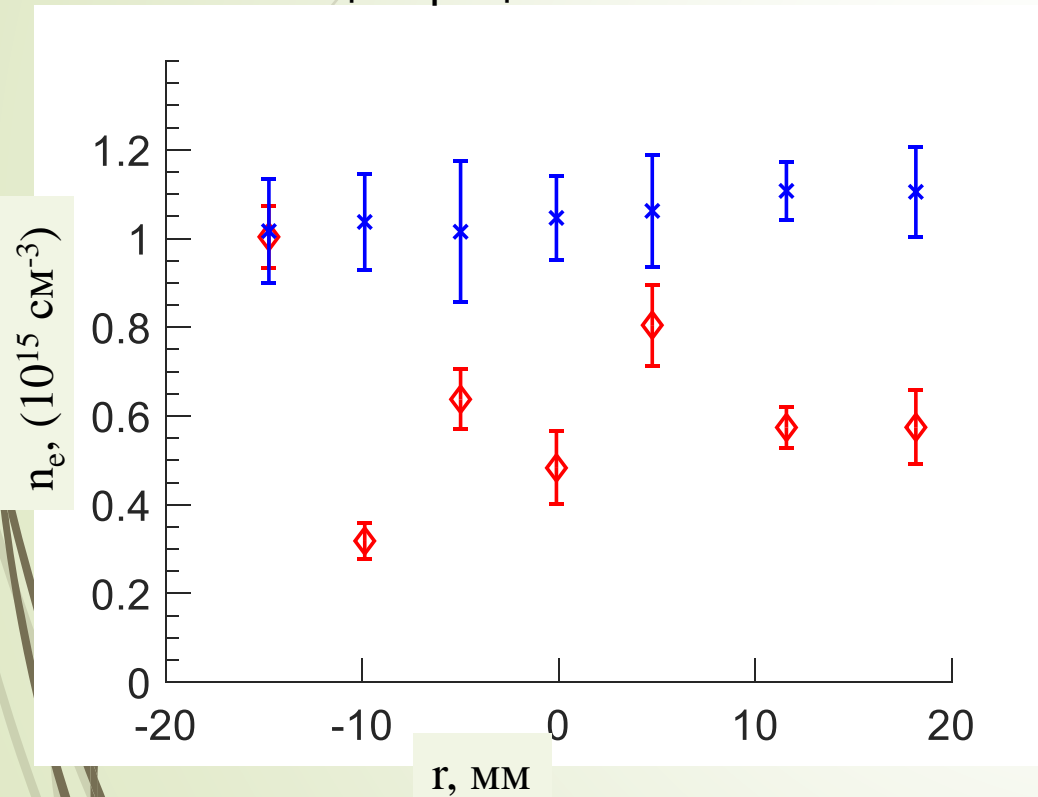


[1] Arzhannikov A. V. et al. The Frequency Spectrum and Energy Content in a Pulse Flux of Terahertz Radiation Generated by a Relativistic Electron Beam in a Plasma Column with Different Density Distributions //Plasma Physics Reports. – 2024. – Т. 50. – №. 3. – С. 331-341.

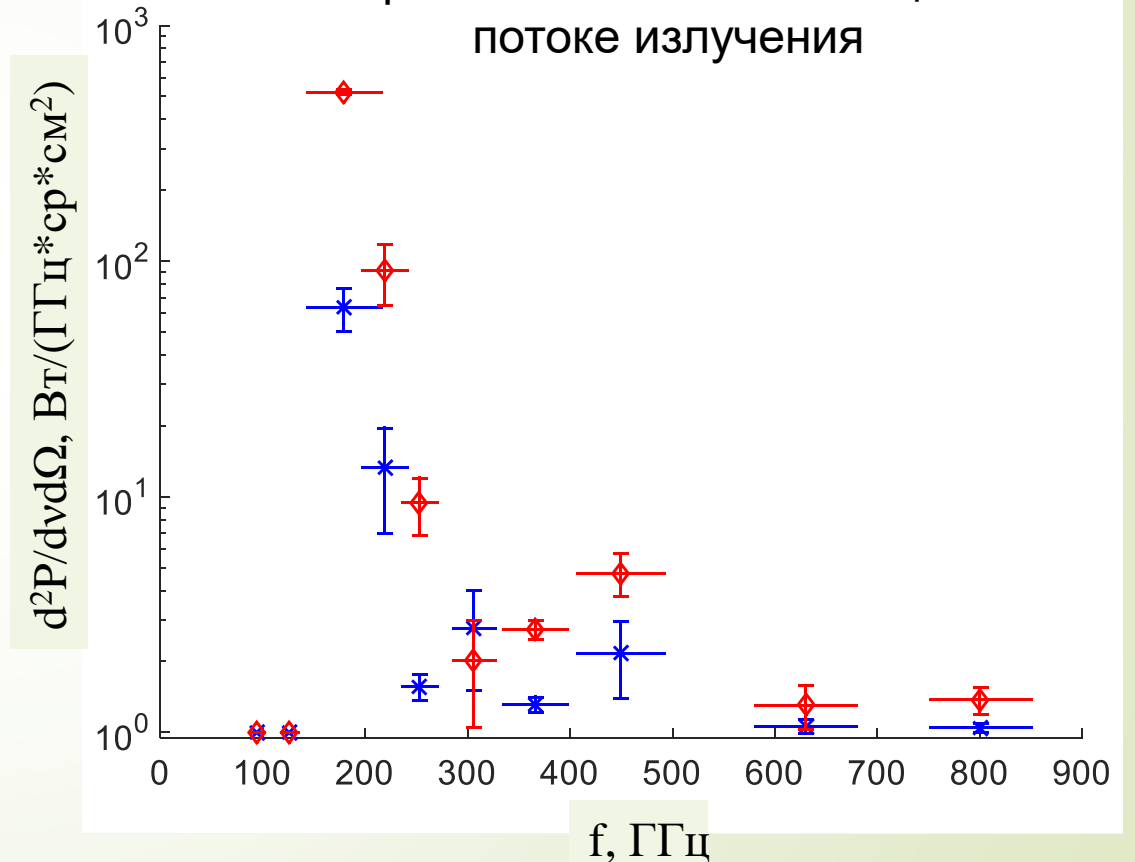


Повышение мощности в потоке излучения при переходе в режим формирования плазмы с заметными градиентами концентрации

Концентрация плазмы



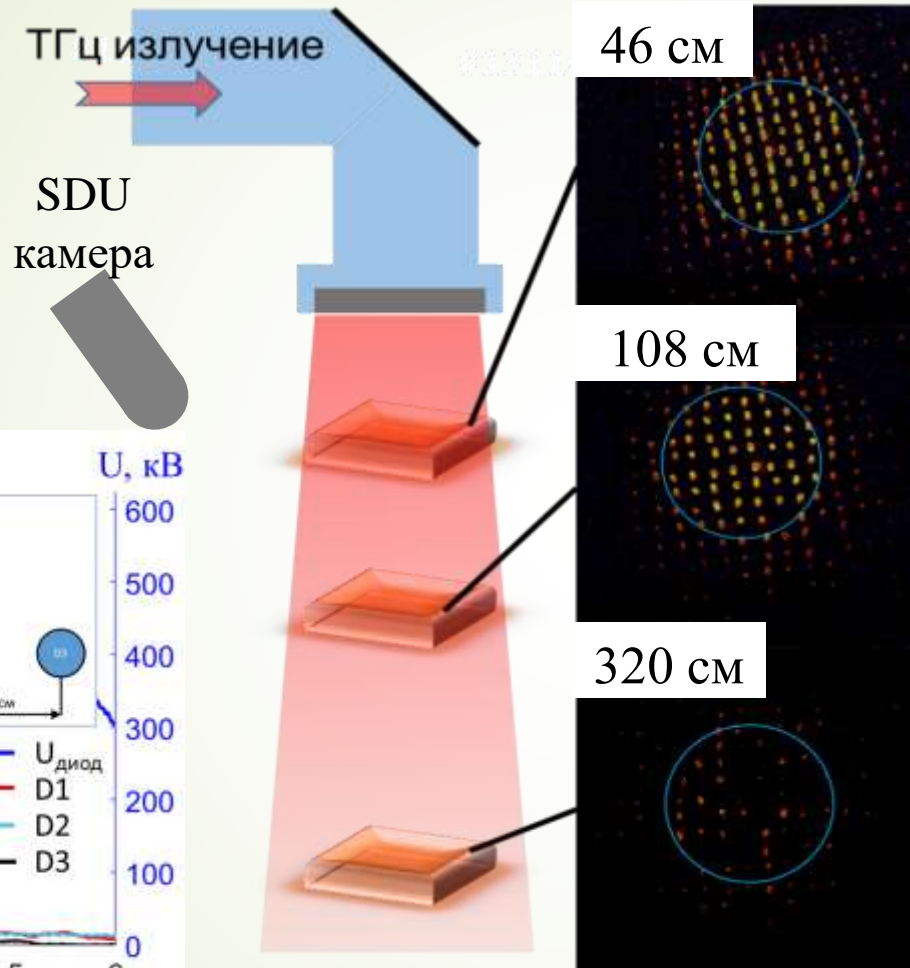
Спектральная плотность мощности в потоке излучения





Распределения плотности мощности излучения по сечению потока

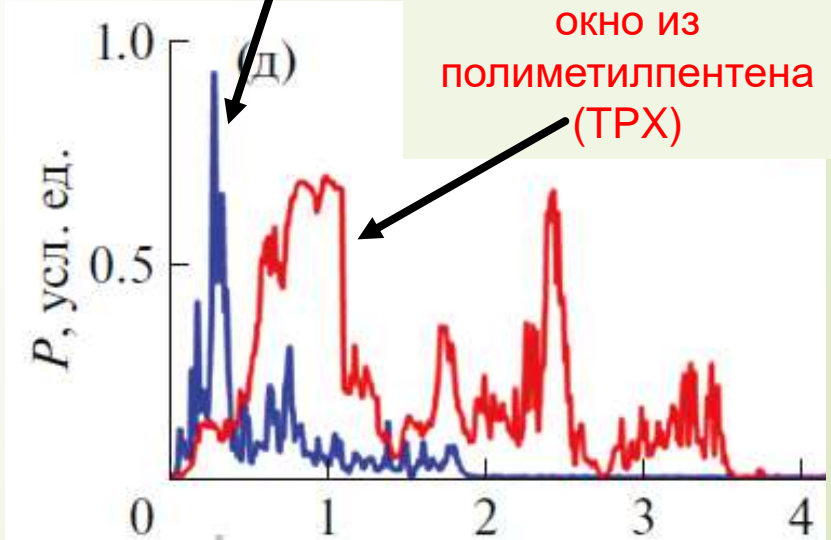
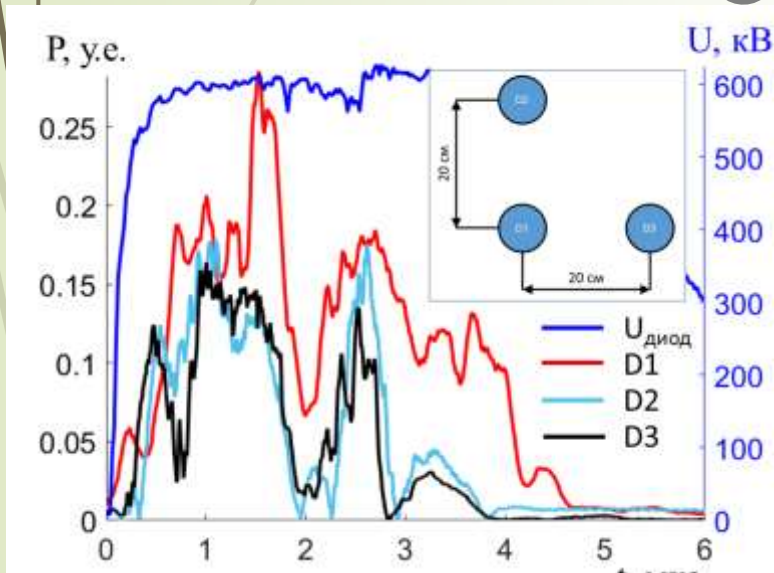
9



фторопластовое окно



ОКНО ИЗ ПОЛИМЕТИЛПЕНТЕНА (TPX)



Получена оценка угловой расходимости потока, величина которой составляет примерно $5-7^\circ$.

[2] А. В. Аржанников, С. Л. Синицкий, Д. А. Самцов, Е. С. Сандалов, С. С. Попов, М. Г. Атлуханов, М. А. Макаров, П. В. Калинин, К. Н. Куклин, А. Ф. Ровенских, В. Д. Степанов. Энергосодержание и спектральный состав потока субмиллиметрового излучения с длительностью 5 мкс, генерируемого в плазме при релаксации РЭП // Физика плазмы. – 2022. – Т. 48. – №. 10. – С. 929-936.

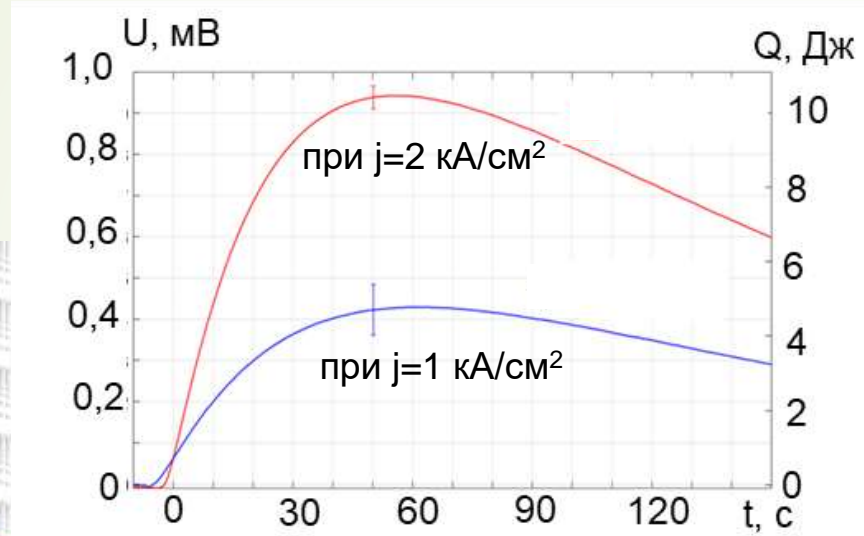
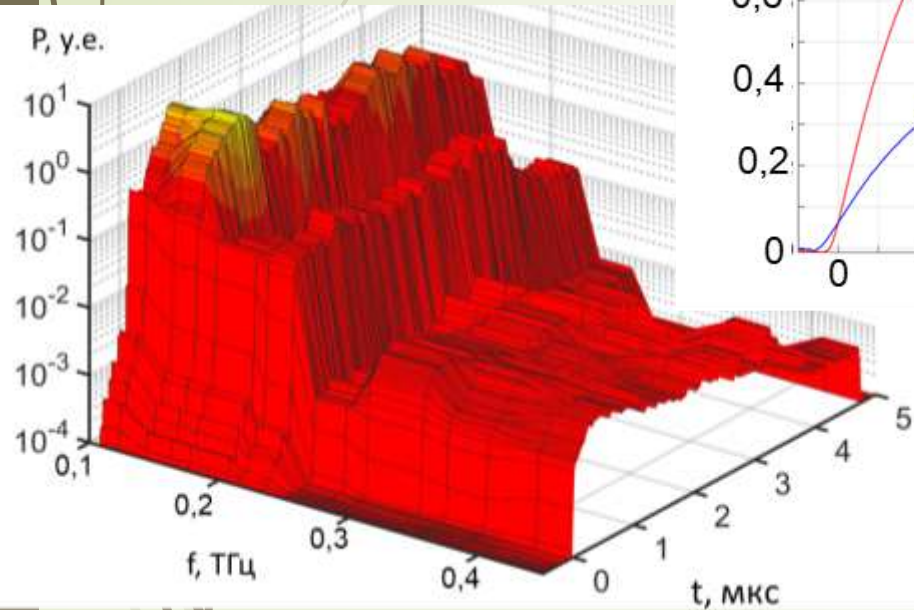


Энергосодержание в потоке излучения

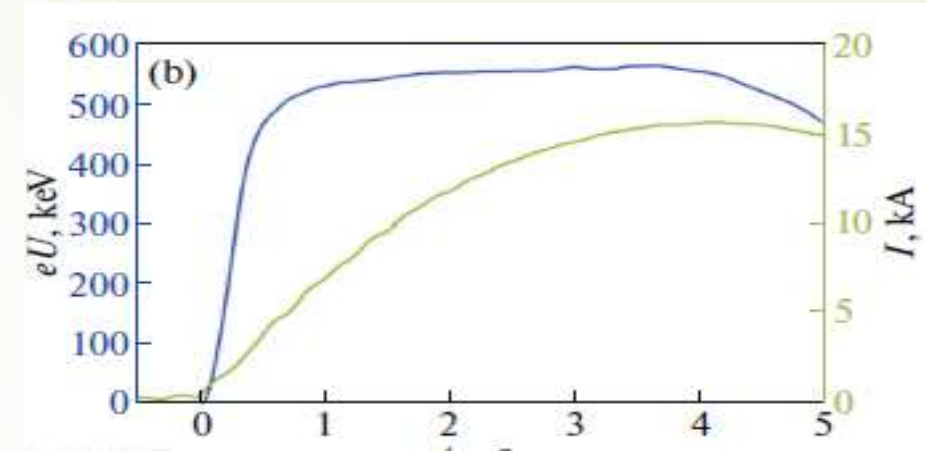
10

Энергосодержание в потоке излучения, выведенном в атмосферу при различной плотности тока РЭП

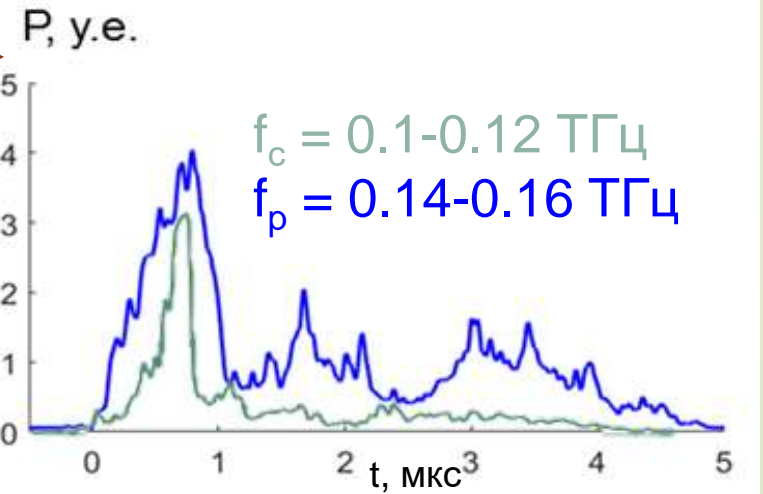
Спектр потока излучения, измеренный при плотности тока пучка 1 кА/см^2



Осциллограммы энергии электронов и тока пучка, инжектируемого в плазму



Осциллограммы сигналов с каналов полихроматора соответствующие циклотронной и верхне-гибридной частотам

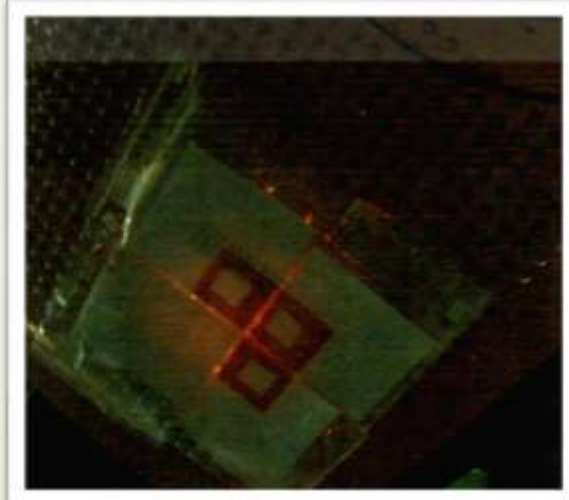
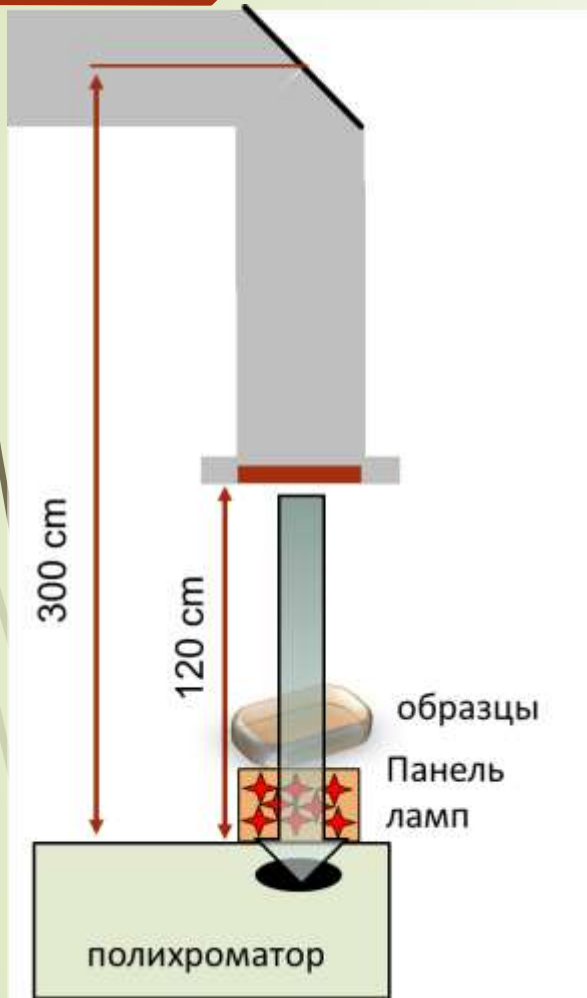


[3] Самцов Д.А., Аржанников А.В., Синицкий С.Л., и др. Частотный спектр потока излучения в интервале частот 0,1-0,6 ТГц, генерируемого на установке ГОЛ-ПЭТ в различных условиях // Изв. вузов. Радиофизика. 2022. Т. 65, № 5-6. С. 342–352.

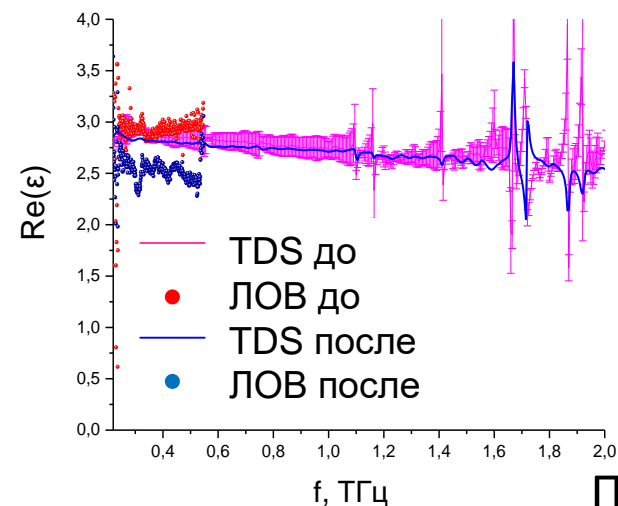
[4] Arzhannikov, A.V., Sinitsky, S.L., Samtsov, D.A., et al. The Frequency Spectrum and Energy Content in a Pulse Flux of Terahertz Radiation Generated by a Relativistic Electron Beam in a Plasma Column with Different Density Distributions. Plasma Phys. Rep. 50, 331–341 (2024).



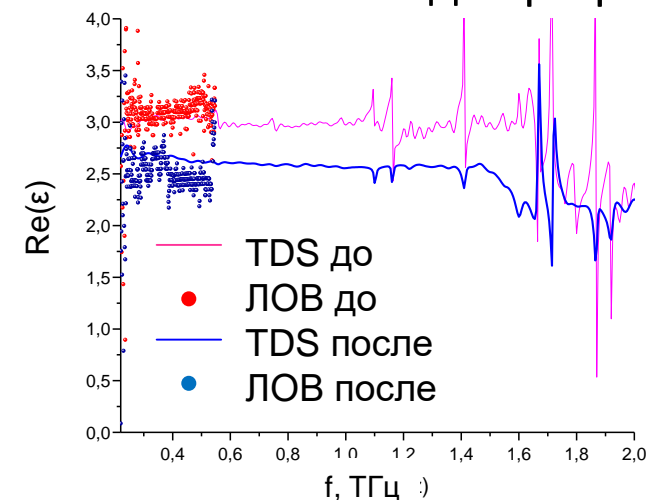
Тестовые эксперименты по воздействию на материалы применительно к сфере приложений



Поливинилхлорид



Поливинилиденфторид



Доклад Аржанников и др. «Изменение спектральных характеристик некоторых полимерных материалов в интервале частот от 0,2 до 2 ТГц в результате воздействия мегаваттным потоком субмм-излучения микросекундной длительности», представленный на конференции СИ и ЛСЭ 2024, 24 – 28 июня 2024, Новосибирск.

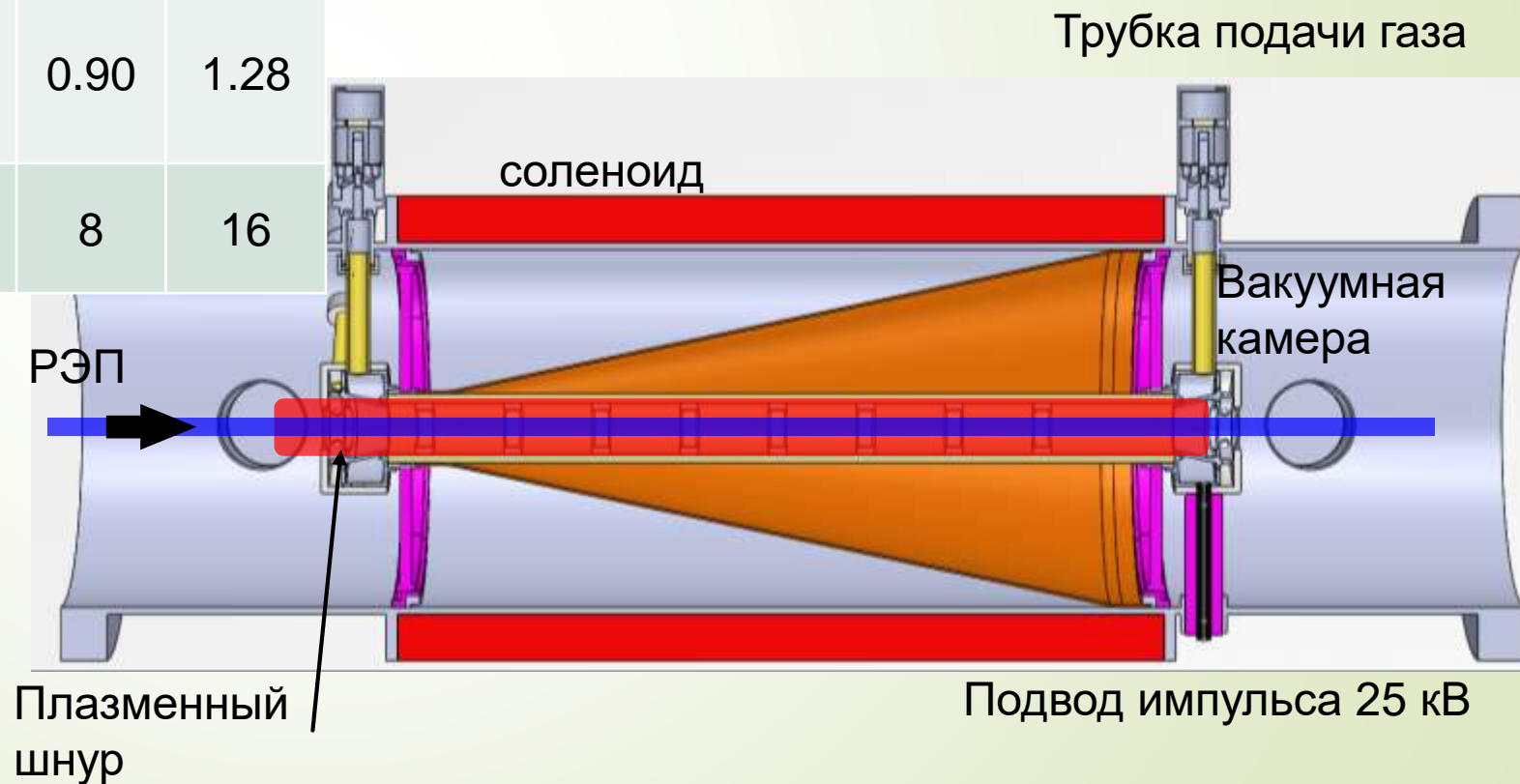
Проект импульсно-периодического генератора мощного ТГц излучения в диапазоне 0.1-1 ТГц

12

Концентрация плазмы 10^{15} см^{-3}	0.4	1.6	3.2	6.4
Плазменная частота, ТГц	0.16	0.32	0.45	0.64
Удвоенная плазменная частота, ТГц	0.32	0.64	0.90	1.28
Требуемая плотность тока пучка, кА/см ²	1	4	8	16

$$f_p [\text{Гц}] = 9.0 \times 10^3 \times n^{1/2} [\text{см}^{-3}]$$

Схема плазменной секции нового импульсно-периодического генератора



Осциллограммы тока в прототипе системы плазменного разряда



Заключение

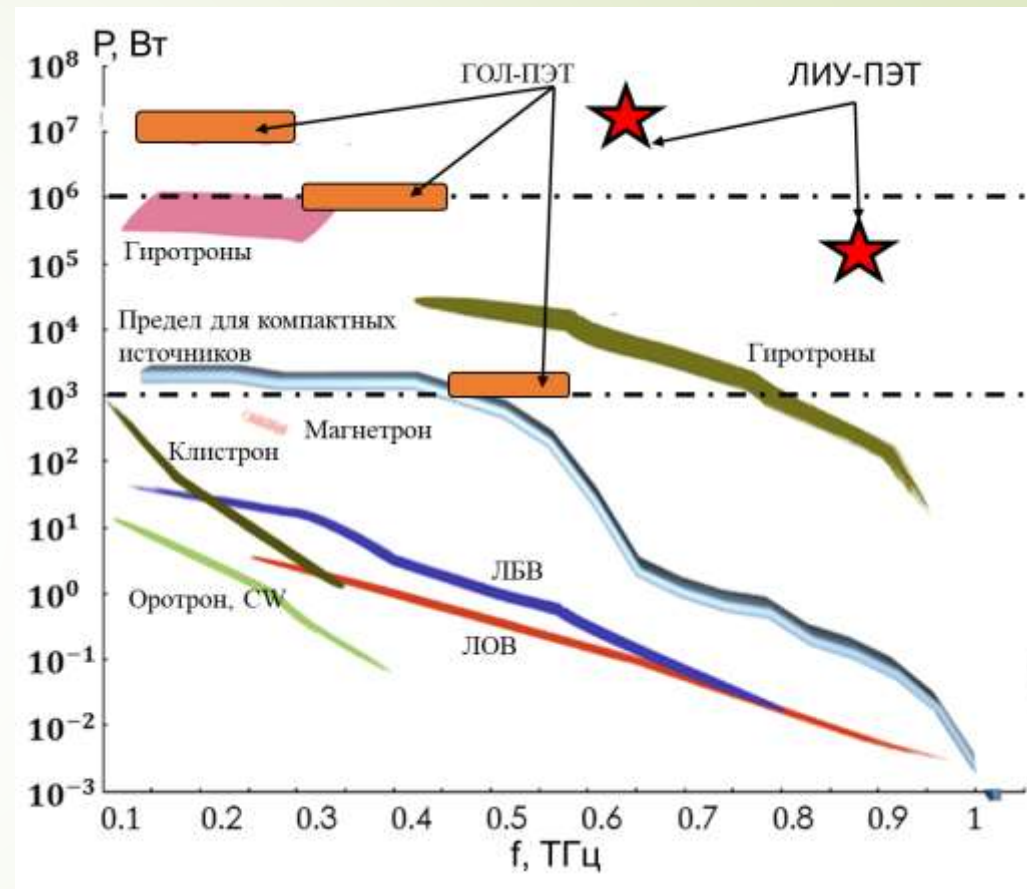
13

В эксперименте реализованы условия эффективной работы пучково-плазменного генератора в интервале частот 0.1-0.5 ТГц. Обеспечена генерация, вывод в атмосферу и транспортировка на расстояние масштаба нескольких метров потока ТГц излучения с параметрами ($\tau = 1-3$ мкс / $P = 30-10$ МВт / $Q = 10$ Дж / $\Delta\theta < 10^\circ$) приемлемыми для проведения экспериментов по воздействию на материалы.

Генерируемый поток использован в тестовых экспериментах по воздействию на материалы

Установлена связь характеристик выведенного в атмосферу потока излучения с пространственным распределением концентрации плазмы, показано соответствие экспериментальных результатов теоретическими оценками

Полученные результаты подтверждают корректность теоретической модели, описывающей механизмы генерации в пучково-плазменной системе, что позволяет использовать эту модель при разработке пучково-плазменного генератора ТГц излучения с использованием килоамперного РЭП, получаемого из линейного индукционного ускорителя.



Список статей, опубликованных с соавторами

- 1) Самцов Д.А., Аржанников А.В., Синицкий С.Л., Калинин П.В., Попов С.С., Сандалов Е.С., Атлуханов М.Г., Куклин К.Н., Макаров М.А., Степанов В.Д., Ровенских А.Ф. **Импульсная мощность и спектральный состав выходящего из плазменного столба потока терагерцового излучения при прохождении в нём релятивистских электронных пучков с различной плотностью тока (эксперименты ГОЛ-ПЭТ) // Изв. вузов. Радиофизика. 2023. Т. 66, № 7-8. С. 595–605.**
- 2) *А. В. Аржанников, С. Л. Синицкий, Д. А. Самцов, Е. С. Сандалов, С. С. Попов, М. Г. Атлуханов, М. А. Макаров, П. В. Калинин, К. Н. Куклин, А. Ф. Ровенских, В. Д. Степанов. Энергосодержание и спектральный состав потока субмиллиметрового излучения с длительностью 5 мкс, генерируемого в плазме при релаксации РЭП // Физика плазмы. – 2022. – Т. 48. – №. 10. – С. 929-936.*
- 3) Самцов Д.А., Аржанников А.В., Синицкий С.Л., Попов С.С., Калинин П.В., Сандалов Е.С., Атлуханов М.Г., Морозов О.П., Куклин К.Н., Макаров М.А., Ровенских А.Ф., Степанов В.Д. **Частотный спектр потока излучения в интервале частот 0,1-0,6 ТГц, генерируемого на установке ГОЛ-ПЭТ в различных условиях // Изв. вузов. Радиофизика. 2022. Т. 65, № 5-6. С. 342–352.**
- 4) Arzhannikov, A.V., Sinitsky, S.L., Samtsov, D.A., Timofeev, I. V.; Sandalov, E. S.; Popov, S. S.; Atlukhanov, M. G.; Makarov, M. A.; Kalinin, P. V.; Kuklin, K. N.; Rovenskikh, A. F.; Stepanov, V. D. **The Frequency Spectrum and Energy Content in a Pulse Flux of Terahertz Radiation Generated by a Relativistic Electron Beam in a Plasma Column with Different Density Distributions. *Plasma Phys. Rep.* 50, 331–341 (2024).**
<https://doi.org/10.1134/S1063780X24600051>

Об авторском вкладе

Участие автора заявки в получении научных результатов, изложенных в представленном цикле работ, и определении оптимальных условий работы пучково-плазменного генератора импульсов ТГц излучения микросекундной длительности является определяющим.

- Проведена калибровка частотно-селективных характеристик 8 канальной радиометрической диагностики на специализированном стенде в интервале частот 0.1-0.8 ТГц
- В диапазоне частот 0.1-0.5 ТГц с использованием данной диагностики измерена спектральная плотность мощности потока излучения на установке ГОЛ-ПЭТ
- Проведены измерения энергосодержания в потоке ТГц излучения в различных условиях эксперимента, включая варьирование плотности плазмы и плотности тока пучка
- Создан плазменный столб с параметрами необходимыми для генерации излучения
- Установлено соответствие измеренных характеристик ТГц излучения с параметрами пучково-плазменной системы и теоретическими представлениями о генерации излучения в этой системе

В результате работы автора заявки были определены параметры пучково-плазменной системы, обеспечивающие генерацию импульсов ТГц излучения микросекундной длительности и мощностью масштаба 10 МВ

Спасибо за внимание!