Научная статья

УДК 621.3.095, 621.384 DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-1-28-42

# Пучково-плазменный генератор ТГц-излучения на основе индукционного ускорителя (проект ЛИУ-ПЭТ)

Андрей Васильевич Аржанников<sup>1</sup>, Станислав Леонидович Синицкий<sup>2</sup>, Дмитрий Анатольевич Старостенко<sup>3</sup>, Павел Владимирович Логачев<sup>4</sup>, Петр Алексеевич Бак<sup>5</sup>, Данила Алексеевич Никифоров<sup>6</sup>, Сергей Сергеевич Попов<sup>7</sup>, Петр Валерьевич Калинин<sup>8</sup>, Денис Алексеевич Самцов<sup>9</sup>, Евгений Сергеевич Сандалов<sup>10</sup>, Магомедризы Гаджимурадович Атлуханов<sup>11</sup>, Александр Николаевич Григорьев<sup>12</sup>, Семен Олегович Воробьев<sup>13</sup>, Дмитрий Витальевич Петров<sup>14</sup>, Роман Викторович Протас<sup>15</sup>

<sup>1–10</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН Новосибирск, Россия

<sup>12–15</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е. И. Забабахина» Снежинск, Россия

<sup>1</sup>A.V.Arzhannikov@inp.nsk.su, https://orcid.org/0000-0002-8074-9737
<sup>2</sup>S.L.Sinitsky@inp.nsk.su, https://orcid.org/0000-0002-8634-5346
<sup>3</sup>D.A.Starostenko@inp.nsk.su
<sup>4</sup>P.V.Logatchov@inp.nsk.su, https://orcid.org/0000-0002-3238-8703
<sup>5</sup>P.A.Bak@inp.nsk.su
<sup>6</sup>D.A.Nikiforov@inp.nsk.su, https://orcid.org/0000-0002-6034-5778
<sup>7</sup>S.S.Popov@inp.nsk.su
<sup>8</sup>P.V.Kalinin@inp.nsk.su
<sup>9</sup>D.A.Samtsov@inp.nsk.su
<sup>10</sup>E.S.Sandalov@inp.nsk.su, https://orcid.org/0000-0003-0126-7519
<sup>11</sup>M.G.Atlukhanov@inp.nsk.su
<sup>12</sup>alex\_nick@mail.ru
<sup>13</sup>s.vorobiov2010@yandex.ru
<sup>14</sup>vniitf@vniitf.ru
<sup>15</sup>romanprotas@mail.ru

Аннотация

В ИЯФ СО РАН совместно с РФЯЦ-ВНИИТФ ведутся исследования в области создания новых источников электромагнитного излучения ТГц-диапазона. В рамках данной статьи представлен проект пучково-плазменного генератора ТГц-излучения на основе электронного пучка, генерируемого линейным индукционным ускорителем. В статье приведена схема такого генератора, а также описаны основные элементы системы формирования электронного пучка. Помимо этого, представлены результаты моделирования транспортировки и сжатия сечения пучка с током до 1 кА и энергией до 1 МэВ для последующей его инжекции в плазменную секцию с плотностью плазмы до 10<sup>15</sup>–10<sup>16</sup> см<sup>-3</sup>. В статье также проведен анализ результатов предшествующих экспериментальных исследований пучково-плазменного взаимодействия при различных параметрах пучка и плазмы. На основе этого анализа сформулировано требование к соотношению электронных плотностей пучка и плазмы, которое необ-

© Аржанников А. В., Синицкий С. Л., Старостенко Д. А., Логачев П. В., Бак П. А., Никифоров Д. А., Попов С. С., Калинин П. В., Самцов Д. А., Сандалов Е. С., Атлуханов М. Г., Григорьев А. Н., Воробьев С. О., Петров Д. В., Протас Р. В., 2023

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2023. Том 18, № 1 Siberian Journal of Physics, 2023, vol. 18, no. 1

29

ходимо удовлетворить при создании пучково-плазменного генератора ЭМ-излучения для диапазона 0,1–1 ТГц с импульсной мощностью в несколько МВт.

### Ключевые слова

линейный индукционный ускоритель, релятивистский электронный пучок, пучково-плазменное взаимодействие, накачка верхнегибридных волн в плазме

### Благодарности

Работы, описанные в разделах 1, 4, 5, частично выполнены за счет средств гранта Российского научного фонда № 19-12-00250.

### Для цитирования

Аржанников А. В., Синицкий С. Л., Старостенко Д. А., Логачев П. В., Бак П. А., Никифоров Д. А., Попов С. С., Калинин П. В., Самцов Д. А., Сандалов Е. С., Атлуханов М. Г., Григорьев А. Н., Воробьев С. О., Петров Д. В., Протас Р. В. Пучково-плазменный генератор ТГц-излучения на основе индукционного ускорителя (проект ЛИУ-ПЭТ) // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 1. С. 28–42. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-1-28-42

# Beam-Plasma Generator of the THz Radiation Based on an Induction Accelerator (LIA-PET Project)

Andrey V. Arzhannikov<sup>1</sup>, Stanislav L. Sinitsky<sup>2</sup>, Dmitry A. Starostenko<sup>3</sup>
Pavel V. Logachev<sup>4</sup>, Petr A. Bak<sup>5</sup>, Danila A. Nikiforov<sup>6</sup>, Sergei S. Popov<sup>7</sup>
Petr V. Kalinin<sup>8</sup>, Denis A. Samtsov<sup>9</sup>, Evgeniy S. Sandalov<sup>10</sup>
Magomedrizy G. Atlukhanov<sup>11</sup>, Aleksandr N. Grigoriev<sup>12</sup>
Semyon O. Vorobyov<sup>13</sup>, Dmitry V. Petrov<sup>14</sup>, Roman V. Protas<sup>15</sup>

<sup>1–10</sup>Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS Novosibirsk, Russian Federation

<sup>12–15</sup>Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics Snezhinsk, Russian Federation

<sup>1</sup>A.V.Arzhannikov@inp.nsk.su, https://orcid.org/0000-0002-8074-9737
<sup>2</sup>S.L.Sinitsky@inp.nsk.su, https://orcid.org/0000-0002-8634-5346
<sup>3</sup>D.A.Starostenko@inp.nsk.su
<sup>4</sup>P.V.Logatchov@inp.nsk.su, https://orcid.org/0000-0002-3238-8703
<sup>5</sup>P.A.Bak@inp.nsk.su
<sup>6</sup>D.A.Nikiforov@inp.nsk.su, https://orcid.org/0000-0002-6034-5778
<sup>7</sup>S.S.Popov@inp.nsk.su
<sup>8</sup>P.V.Kalinin@inp.nsk.su
<sup>9</sup>D.A.Samtsov@inp.nsk.su
<sup>9</sup>D.A.Samtsov@inp.nsk.su
<sup>10</sup>E.S.Sandalov@inp.nsk.su, https://orcid.org/0000-0003-0126-7519
<sup>11</sup>M.G.Atlukhanov@inp.nsk.su
<sup>12</sup>alex\_nick@mail.ru

<sup>13</sup>s.vorobiov2010@yandex.ru <sup>14</sup>vniitf@vniitf.ru <sup>15</sup>romanprotas@mail.ru

Abstract

BINP SB RAS together with RFNC-VNIITF carry out a research in the field of creating new sources of electromagnetic radiation in the THz range. Within the framework of this article, a project of the THz beam-plasma generator based on an electron beam generated by a linear induction accelerator is presented. The article provides generator scheme and describes the main elements of the electron beam formation system. In addition, the results of modeling the beam transport and its cross-section compression are presented. These calculations were performed under the current up to 1 kA and energy up to 1 MeV for the subsequent injection of the beam into the plasma section with plasma density up to  $10^{15} - 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>. The article also contains the analysis of previous experimental studies results which are connected with the beam-plasma interaction for various beam and plasma parameters. Based on this analysis, a requirement for the ratio of the beam and plasma electron densities was formulated. This requirement should be satisfied for creation of the beam-plasma generator of EM radiation for the range of 0.1-1 THz with a pulse power of several MW.

Keywords

Linear induction accelerator, relativistic electron beam, beam-plasma interaction, pumping of upper hybrid waves in plasma

Funding

The work described in Sections 1, 4, 5 was partly supported by the Russian Science Foundation, grant No. 19-12-00250. *For citation* 

Arzhannikov A. V., Sinitsky S. L., Starostenko D. A., Logachev P. V., Bak P. A., Nikiforov D. A., Popov S. S., Kalinin P. V., Samtsov D. A., Sandalov E. S., Atlukhanov M. G., Grigoriev A. N., Vorobyov S. O., Petrov D. V., Protas R. V. Beam-Plasma Generator of the THz Radiation Based on an Induction Accelerator (LIA-PET Project). *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 1, pp. 28–42. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-1-28-42

#### Введение

Необходимость генерации потоков терагерцевого излучения с длиной волны ниже 1,5 мм вплоть до 0,1 мм при высоком уровне импульсной мощности связана с широким спектром их возможного применения. К таким применениям относятся: обнаружение и визуализация скрытых объектов в рамках систем безопасности [1–3], подавление рабочего состояния скрытых радиоэлектронных средств, регистрация изображения объектов в пучках ТГц-излучения в дополнение к оптическому [4; 5], ускорение частиц кильватерным полем в диэлектрической трубке (DWA) в условиях черенковского резонанса с распространяющейся волной [6–8], анализ и модификация состояний твердого тела со сложной супрамолекулярной структурой (см., например, [9; 10]) и др. В качестве источников излучения с длинами волн диапазона 1–0,3 мм при умеренной мощности (до 200 кВт), которая приемлема в сфере исследовательских работ, могут применяться импульсные гиротроны с сильным (до 50 Тл) магнитным полем [11]. Необходимость использования магнитного поля с таким уровнем индукции для генерации в субмм-диапазоне вызвана тем, что частота излучения, генерируемого по гиротронному механизму, прямо пропорциональна индукции магнитного поля. Импульс тока пучка электронов в таком гиротроне ТГц-диапазона имеет величину масштаба 10–15 А, что с учетом КПД прибора на уровне 20 % ограничивает мощность излучения на отмеченном выше уровне. Отсутствие инженерных решений для устройств, обеспечивающих более мощные потоки субмм-излучения, стимулирует исследования по поиску новых механизмов генерации с использованием электронных пучков с килоамперным током. Таким механизмом является интенсивное взаимодействие релятивистского электронного пучка (РЭП) с плазмой на черенковском резонансе между электронами пучка и ветвью верхнегибридных электронных колебаний в плазме [12; 13]. Теоретическое описание возможности использования такого механизма взаимодействия в пучково-плазменной системе для получения электромагнитного излучения субмм-диапазона дано в работах [14–16]. Его реализация в эксперименте на пути реального получения потоков субмм-излучения мощностью около десяти мегаватт осуществлена на установке ГОЛ-ПЭТ, на которой для накачки плазменных колебаний в режиме единичных импульсов используется килоамперный пучок микросекундной длительности [17]. Для использования таких потоков излучения в сфере практических применений представляется рациональным переход к многоимпульсному режиму генерации. Такой режим генерации, по нашему мнению, осуществим с использованием последовательности импульсов, поступающих от линейного индукционного ускорителя (ЛИУ), созданного в ИЯФ (см. описание ЛИУ в [18–22]. В работе представлены результаты разработки проекта пучково-плазменного генератора ЛИУ-ПЭТ, в котором планируется реализовать генерацию мегаваттного потока субмм-излучения в рамках указанного выше пучково-плазменного взаимодействия.

### 1. Общая схема пучково-плазменного эксперимента по генерации субмм-излучения

На рис. 1 представлено схематическое изображение структуры пучково-плазменного эксперимента по генерации ТГц-излучения с использованием пучка, инжектируемого в плазменный шнур из ускорителя ЛИУ. В соответствии с этой схемой генерируемый в ЛИУ сильноточный релятивистский электронный пучок (РЭП), сжатый по сечению в нарастающем магнитном поле, направляется в плазменный шнур, где реализуется интенсивное пучково-плазменное взаимодействие. После прохождения через плазму этот пучок поступает в вакуумный объем, в котором происходит отделение пучка от генерируемого в плазме потока ТГц-излучения.



Puc. 1. Общая схема пучково-плазменной системы для генерации потока ТГц-излучения *Fig. 1.* General scheme of a beam-plasma system for generating a THz radiation flux

В этих экспериментах плазменный шнур диаметром 12 мм и длиной около 30 см с плотностью электронов масштаба  $5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> создается в продольном магнитном поле с индукцией до 1,5–2 Тл до начала инжекции пучка. В эту плазму инжектируется пучок с током до 0,5 кА, длительностью ~70 нс. Диаметр электронного пучка внутри плазменного шнура составляет 4 мм. Генерируемое излучение распространяется вдоль оси пучково-плазменной системы и выходит вместе с пучком из плазменного столба в случае, когда на торце шнура обеспечен резкий спад плотности плазмы. Вышедший из плазмы в вакуум поток излучения отделяется от электронного пучка и направляется в перпендикулярном к оси направлении с помощью специальной разделительной фольги. Уходящий перпендикулярно поток излучения выводится через окно в атмосферу для анализа его характеристик. Распространяющийся далее вдоль оси отработавший электронный пучок принимается коллектором.

## 2. Получение исходного РЭП в ЛИУ и трансформация его сечения для инжекции в плазму

Исходный электронный пучок генерируется в ускорительном вакуумном диоде без магнитного поля в условиях аксиально-симметричной геометрии ускорительного промежутка (см. [18]). Схема диодного узла представлена на рис. 2. Эмитирующий электроны катод с заданной геометрией поверхности 1 закреплен на катододержателе 2. Фиксация расположения катододержателя в заданном месте на оси системы задает необходимое расстояние между катодом и фокусирующим электродом 3. Термоэмиссионный диспенсерный катод способен обеспечить плотность тока с эмитирующей поверхности на уровне 10 А/см<sup>2</sup>. Необходимое ускоряющее напряжение вырабатывается совокупностью магнитных индукторов и подается на ускоритель-



*Рис. 2.* Схематическое изображение диодного узла: 1 – термоэмиссионная поверхность; 2 – катододержатель; 3 – фокусирующий электрод; 4 – ускорительная трубка; 5 – электронный пучок
*Fig. 2.* Schematic representation of the diode node: 1—thermal emission surface; 2—cathode holder; 3—focusing electrode; 4—accelerating tube; 5—electron beam



Puc. 3. Схематическое изображение конструкции линейного индукционного ускорителя *Fig.* 3. The linear induction accelerator design. Blue arrow shows the direction of the electron beam

ную трубку 4, которая представляет собой секционированный высоковольтный изолятор, рассчитанный на приложение мегавольтного импульса напряжения с длительностью нескольких сотен наносекунд. Электронный поток, выходящий с эмитирующей поверхности 1, сжимается в пучок 5 с малой угловой расходимостью и далее распространяется на расстояние в несколько метров с сохранением поперечного эмиттанса. Сохранение этой характеристики пучка обеспечивается правильным подбором конфигурации магнитного поля фокусирующих линз.

Конструкция индукционного ускорителя, в котором используется описанный ускорительный диод, представлена на рис. 3. Ускоритель представляет собой импульсный высоковольтный трансформатор индукторного типа, состоящий из двух частей. В центральной его части расположен корпус катода с четырьмя откачными портами для получения высокого вакуума.



*Рис. 4.* Осциллограммы импульсов напряжения на ускорительном диоде (синяя линия на верхнем рисунке) и на элементах ускорительной трубки (красная и зеленая линии на верхнем рисунке), а также импульса тока на выходе из ЛИУ (красная линия на нижнем рисунке)

*Fig. 4.* Oscillograms of voltage pulses on the accelerating diode (blue line on the upper figure) and on the elements of the accelerating tube (red and green lines on the upper figure), as well as the current pulse at the LIA output (red line on the lower figure)

К корпусу примыкают два высоковольтных секционированных изолятора. На первом изоляторе при помощи системы высоковольтного импульсного питания формируется импульс отрицательного напряжения, который подается на катод. Ко второму изолятору прикладывается положительный импульс напряжения, создающий продольное ускоряющее электрическое поле. В результате прохождения сформированным в катод-анодном зазоре пучком этих двух ускоряющих промежутков его электроны набирают энергию до 1 МэВ и далее транспортируется по вакуумному каналу в сопровождении полей импульсных соленоидов, выполняющих функции фокусирующих линз. Малая угловая расходимость электронов пучка, генерируемого

в диоде ускорителя, обеспечивает возможность сжатия его сечения до диаметра в несколько миллиметров, что позволяет применить сжатый таким образом пучок для эффективной накачки плазменных волн в пучково-плазменном генераторе.

На рис. 4 представлены осциллограммы напряжений на диоде и ускорительной трубке, а также тока электронного пучка на выходе из ускорителя, зарегистрированные в типичном эксперименте. Из рисунка видно, что длительность импульса тока пучка на его полувысоте имеет величину более 150 нс, а амплитуда достигает 1 кА. При этом энергия электронов пучка, набираемая при движении в ускорительном диоде и последующем ускорительном промежутке, достигает уровня 1 МэВ.

Следует отметить, что в экспериментах, описанных в [12; 13; 17], генерация терагерцевого излучения в пучково-плазменной системе осуществлялась при микросекундной длительности импульса инжектируемого пучка. В этом отношении длительность импульса электронного пучка, генерируемого в ЛИУ, масштаба 150 нс, на первый взгляд, может показаться недостаточной для развития процесса накачки плазменных колебаний. Однако это не так. В экспериментах на установке ИНАР [23; 24] уже доказана возможность развития двухпотоковой неустойчивости с относительной потерей энергии электронами пучка в плазме на уровне выше 30 % в условиях длительности инжектируемого пучка 50–100 нс.

# 3. Анализ возможности генерации ТГц-излучения в пучково-плазменной системе при длительности импульса пучка масштаба 0.1 мкс

В работах [23; 24] описаны результаты экспериментов на установке ИНАР по релаксации в плазме с плотностью  $n_p = 4 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> пучка МэВ-ных электронов с плотностью тока около 1.5 кА/см<sup>2</sup> (плотность электронов в пучке  $n_b = 3 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>) при различном угловом разбросе инжектируемых электронов. Этот разброс задавался толщиной титановой фольги, отделяющей ускорительный диод от плазменного столба, через которую инжектировался пучок. Длительность импульса тока пучка на полувысоте в этих экспериментах имела величину 50 нс. В этих работах было показано, что с уменьшением углового разброса инжектируемых электронов с 24° до 7° энерговыделение пучка на расстоянии 20 см от входа его в плазменный столб возрастает с 0,3 · 10<sup>18</sup> до 3 · 10<sup>18</sup> эВ см<sup>-1</sup> (см. рис. 5). При этом характерный пространственный масштаб – длина релаксации пучка, на котором происходит снижение энерговыделения пучка в 2-3 раза по мере его продвижения по плазменному столбу, резко уменьшается от полутора метров до нескольких сантиметров. Зависимость длины релаксации пучка от углового разброса электронов, определенная по результатам данного эксперимента, хорошо совпадала с оценками ее величины в рамках теоретической модели, в которой предполагалось ограничение на амплитуду плазменных колебаний из-за развития сильной турбулентности в режиме «плато» [25; 26]. Детальное сопоставление результатов, отмеченных выше экспериментов, с различными теоретическими моделями проведено в работах [27; 28].

Возможность продвижения в исследованиях интенсивного взаимодействия РЭП с плазмой при повышенной ее плотности была продемонстрирована в последующих экспериментах на этой установке [24]. Их целью было сопоставление энерговыделения пучка в плазме на первых двух десятках сантиметров плазменного столба при инжекции в нее РЭП с малым угловым разбросом (менее 10°). Эти эксперименты проводились в условиях, когда плотность исходной плазмы варьировалась в пределах от  $n_p = 5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> до  $n_p = 5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, а электронная температура была на уровне 2–3 эВ. Результаты этих исследований представлены на рис. 5. Из представленных результатов следует, что при плотности электронов в пучке  $n_b = 2 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup> (1 кА/см<sup>2</sup>) эффективная релаксация РЭП реализуется при плотности плазмы  $n_p$  от  $10^{13}$  см<sup>-3</sup> до  $(2-3) \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> в то время как при повышенной плотности электронов в пучке  $n_b = 10^{12}$  см<sup>-3</sup> (5 кА/см<sup>2</sup>) эффективность этого процесса остается высокой вплоть до плотности  $n_p = 4 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Здесь уместно напомнить, что длительность импульсов пучка на уста-



*Рис. 5.* Распределение поперечной энергии плазмы по длине плазменного столба с плотностью  $n_p = 4 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> при релаксации пучка с плотностью электронов  $n_b = 2 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup> при различных величинах углового разброса в условиях продольного ведущего магнитного поля  $B_0 = 2,5$  Тл

*Fig. 5.* Distribution of the transverse energy of plasma along the length of the plasma column with a density of  $n_p = 4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  during the beam relaxation with electron density of  $n_b = 2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  at various values of angular spread under the conditions of longitudinal leading magnetic field  $B_0 = 2.5 \text{ T}$ 



*Рис. 6.* Зависимость эффективности взаимодействия мощного РЭП с плазмой от величины ее плотности  $n_p$  для двух значений плотности электронов в пучке  $n_b = 2 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup> и  $1 \cdot 10^{12}$  см<sup>3</sup>

*Fig. 6.* Dependence of the efficiency of high-power REB interaction with plasma on its density np for two values of electron density in the beam  $n_b = 2 \cdot 10^{11}$  cm<sup>-3</sup> and  $1 \cdot 10^{12}$  cm<sup>-3</sup>

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2023. Том 18, № 1 Siberian Journal of Physics, 2023, vol. 18, no. 1 новке ИНАР имела масштаб 50 нс и плотность тока пучка на уровне 5 кА/см<sup>2</sup> в то время, как ЛИУ обеспечивает длительность генерации пучка 150 нс и плотность тока сжатого пучка ~ 10 кА/см<sup>2</sup>. Следовательно, в планируемых экспериментах на установке ЛИУ-ПЭТ можно рассчитывать на релаксацию пучка с торможением электронов, обеспечивающую потерю ими не менее 30 % от их исходной энергии на раскачку плазменных колебаний в плазме с плотностью вплоть до  $n_p = 4 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>.

Принимая во внимание результаты исследований на установке ИНАР, можно планировать эксперименты на установке ЛИУ-ПЭТ по получению импульсов излучения на плазменной частоте при плотности плазмы  $n_p = 4 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> только если плотность тока пучка будет масштаба 5 кА/см<sup>2</sup> и выше. В связи с этим требуется решить задачи по транспортировке пучка, выходящего из ускорительного диода, до плазменного шнура, удерживаемого в соленоиде, и по сжатию сечения пучка для достижения необходимой плотности тока.

# 4. Транспортировка пучка и сжатие его сечения применительно к инжекции в плазменный шнур

Поиск необходимых условий для осуществления эффективной транспортировки и сжатия пучка по сечению осуществлялся с помощью моделирования в компьютерном коде UltraSAM [29]. Результат этого моделирования для случая генерации в диоде пучка с током 0.5 кА при напряжении на ускорительном диоде 1 МВ представлен на рис. 7. Он свидетельствует о том, что генерируемый в ЛИУ пучок устойчиво транспортируется на расстояние масштаба двух метров и далее может быть сжат до диаметра, необходимого для ввода его в плазменный шнур диаметром 12 мм.



Рис. 7. Схема транспортировки пучка и сжатие его по сечению для инжекции в плазменный шнур. Цифрами указаны: 1 – ускорительный диод; 2 – соленоиды транспортного канала; 3 – соленоид с плазменным шнуром; 4 – огибающая сильноточного РЭП. Расчет выполнен с использованием UltraSAM для тока пучка 0,5 кА при энергии электронов 1 МэВ

Fig. 7. Scheme of beam transportation and its compression over the cross section for injection into the plasma column. The numbers indicate: 1—accelerating diode; 2—solenoids of the transport channel; 3—solenoid with a plasma filament; 4—high-current REB envelope. The calculation was performed using UltraSAM for a beam current of 0.5 kA at an electron energy of 1 MeV

Возможность сжатия электронного пучка до диаметра 4 мм в области плазменного шнура подтверждается моделированием с помощью K-V envelope code [30], что соответствует плотности тока пучка более 10 кА/см<sup>2</sup>. Этот результат представлен на рис. 8.



*Рис. 8.* Характерный вид огибающей пучка в плазменной секции, предназначенной для генерации ТГц-излучения. Ток пучка – 1 кА, энергия электронов – 1 МэВ, диаметр соленоида – 12 см, длина соленоида – 50 см
*Fig. 8.* Typical view of the beam envelope in plasma section designed to generate THz radiation. The beam current is 1 kA, the electron energy is 1 MeV, the solenoid diameter is 12 cm, and the solenoid length is 50 cm

Таким образом, по результатам компьютерного моделирования транспортировки пучка и сжатия его сечения продемонстрирована возможность достижения параметров пучка, необходимых для накачки плазменных верхнегибридных колебаний при плотности плазмы  $n_p = (4-5) \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Пример возможных вариантов проведения экспериментов по генерации терагерцевого излучения в плазменном столбе с использованием для инжекции пучка, поступающего от ЛИУ, приведен в таблице.

Возможные параметры экспериментов с использованием пучка из инжектора ЛИУ

Плотность плазмы, · 10 <sup>15</sup> см <sup>-3</sup>	0,4	1,6	3,2	6,4
Основная гармоника, ТГц $f_p [\Gamma \mu] = 9,0 \cdot 10^3 \cdot n^{1/2} [cm^{-3}]$	0,16	0,32	0,45	0,64
Удвоенная частота (2 f <sub>p</sub> ), ТГц	0,32	0,64	0,90	1,28
Требуемая плотность тока, кА/см <sup>-2</sup>	1	4	8	16

Possible parameters of the experiments on generation of THz radiation using a beam from a LIA

Столб плазмы с необходимой плотностью  $n_p = (2-5) \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> и длиной около 30 см планируется создавать с помощью высоковольтного (до 20 кВ) разряда в газовом облаке, сформированном импульсным напуском газа в вакуумной камере. Полученная в расчетах плотность тока сжатого пучка около 10 кА/см<sup>2</sup> вполне приемлема для эффективной накачки верхнегибридных плазменных колебаний в таком плазменном столбе, что, в свою очередь, должно обеспечить генерацию мощного потока излучения с частотой ~ 0.5 ТГц. С другой стороны, малая плотность тока пучка в областях его распространения вне плазменного столба позволяет отделить эти области от плазмы достаточно тонкими фольгами, чтобы существенно не увеличить угловой разброс электронов пучка.

### Заключение

В экспериментах на установке ГОЛ-ПЭТ [17] при инжекции килоамперного пучка микросекундной длительности в плазменный столб, имеющий резкую границу по плотности на его торце, мощность в потоке терагерцевого излучения на верхнегибридной частоте плазменных колебаний, выведенном вдоль магнитного поля через окно в атмосферу, достигает уровня 10 МВт. Угловая расходимость потока имеет величину ~ 5°. Это дает основу для разработки генератора терагерцевого излучения мегаваттной мощности на основе пучково-плазменного взаимодействия.

Линейный индукционный ускоритель обеспечивает генерацию электронного пучка с малым эмиттансом при энергии электронов до 1 МэВ, токе пучка до 1 кА и длительностью импульса на полувысоте около 150 нс. Расчеты и опыты по компрессии такого пучка продемонстрировали возможность сжатия сечения этого пучка до диаметра 4 мм, что означает достижимость плотности тока свыше 10 кА/см<sup>2</sup>.

С высокой вероятностью можно ожидать, что такой пучок применим для накачки плазменных колебаний в плазменном шнуре с плотностью  $n_p = (2-5) \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Подтверждением возможности высокоэффективного торможения электронов такого пучка с длительностью импульса масштаба 100 нс служат результаты проведенных ранее экспериментов на установке ИНАР, которые осуществлены в условиях инжекции пучка с плотностью тока около 10 кА/см<sup>2</sup> при такой же длительности импульса. Исходя из описанных выше результатов исследований ведется разработка и изготовление узлов пучково-плазменного генератора ЛИУ-ПЭТ для генерации мощных потоков излучения в интервале частот 0.5–1.5 ТГц на основе пучка, генерируемого в линейном индукционном ускорителе.

### Список литературы

- ThruVision T5000 T-Ray Camera sees through Clothes (http://www.i4u.com/article15314.html). I4u.com. Retrieved 17 May 2012.
- Parascandola, Bruno (23 January 2013). NYPD Commissioner says department will begin testing a new high-tech device that scans for concealed weapons (http://www.nydailynews.com/ new-york/nypdreadies-scan-and-frisk-article-1.1245663). NYDailyNews.com. Retrieved 10 April 2013.
- 3. Parascandola, Rocco (22 February 2017). NYPD's pricey, controversial 'T-Ray' gun sensors sit idle, but that's OK with cops. New York Daily News. Retrieved 22 February 2017.
- P. Hillger, J. Grzyb, R. Jain and U. R. Pfeiffer, Terahertz Imaging and Sensing Applications With Silicon-Based Technologies, in IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, vol. 9, no. 1, pp. 1-19, Jan. 2019, doi: 10.1109/TTHZ.2018.2884852.
- 5. Ghavidel A. et al. A sensing demonstration of a sub THz radio link incorporating a lens antenna //Prog. Electromagn. Res. Lett. 2021. T. 99. C. 119–126.
- Nanni E. A. et al. Terahertz-driven linear electron acceleration //Nature communications. 2015. T. 6. №. 1. C. 8486.
- 7. Jing C. Dielectric wakefield accelerators //Reviews of Accelerator Science and Technology. 2016. T. 9. C. 127–149.
- 8. Thompson M. C. et al. Breakdown limits on gigavolt-per-meter electron-beam-driven wakefields in dielectric structures //Physical review letters. 2008. T. 100. №. 21. C. 214801.

- 9. Aree T. et al. Low-frequency lattice vibrations from atomic displacement parameters of α-FOX-7, a high energy density material //Acta Crystallographica Section B: Structural Science, Crystal Engineering and Materials. 2022. T. 78. №. 3.
- Аржанников А. В., Логачев П. В., Бак П. А. и др. Проект пучково-плазменного генератора ТГц-излучения на килоамперном пучке линейного индукционного ускорителя // Международная звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу ICPAF-2023. 2023. С. 251–251.
- 11. Глявин М. Ю., Лучинин А. Г., Богдашов А. А. и др. Экспериментальное исследование импульсного терагерцевого гиротрона с рекордными значениями мощности и эффективности // Известия вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56. №. 8–9. С. 550.
- 12. Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Kalinin P.V. et al. Subterahertz generation by strong langmuir turbulence at two-stream instability of high current 1-MeV REBs. 2010.
- Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Kuznetsov S. A. et al. Subterahertz emission at strong REB-plasma interaction in multimirror trap GOL-3 //Fusion Science and Technology. 2011. T. 59. №. 1T. C. 74–77.
- 14. Arzhannikov A. V., and Timofeev I. V. Generation of powerful terahertz emission in a beam-driven strong plasma turbulence. Plasma Physics and Controlled Fusion 54.10 (2012): 105004.
- Аржанников А. В., Тимофеев И. В. Интенсивное пучково-плазменное взаимодействие как источник субмиллиметрового излучения. Вестник НГУ. Серия: Физика, 11(4), pp.78– 104, 2016.
- 16. Глинский В. В., Тимофеев И. В., Анненков В. В., Аржанников А. В. // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14, № 4. С. 5–16. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-4-5-16.
- A. V. Arzhannikov, S. L. Sinitsky, S. S. Popov et al. Energy Content and Spectral Composition of a Submillimeter Radiation Flux Generated by a High-Current Electron Beam in a Plasma Column With Density Gradients, in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 50, no. 8, pp. 2348-2363, Aug. 2022, doi: 10.1109/TPS.2022.3183629.
- D. A. Starostenko, P. V. Logachev, A. V. Akimov et al. Results of operating LIA-2 in radiograph mode, Phys. Part. Nuclei Lett., Vol.11, no.5, pp.660–664, 2014. https://doi org/10.1134/ S1547477114050264.
- E. S. Sandalov, S. L. Sinitsky, A.V. Burdakov et al. Electrodynamic System of the Linear Induction Accelerator Module, in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 49, no. 2, pp. 718-728, Feb. 2021, doi: 10.1109/TPS.2020.3045345.
- 20. Сандалов Е. С., Синицкий С. Л., Сковородин Д. И. и др. Исследование поперечной неустойчивости сильноточного релятивистского электронного пучка в линейном индукционном ускорителе // Сибирский физический журнал. 2022;17(1):5-22. https://doi. org/10.25205/2541-9447-2022-17-1-5-22
- 21. Сандалов Е. С., Синицкий С. Л., Сковородин Д. И. и др. Исследование инкремента поперечной неустойчивости килоамперного электронного пучка в ЛИУ для его применения в терагерцевом ЛСЭ // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 2. С. 16–29. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-16-29
- 22. Nikiforov D. A., Petrenko A.V., Sinitsky S.L. et al. Investigation of high current electron beam dynamics in linear induction accelerator for creation of a high-power THz radiation source. Journal of Instrumentation 16.11 (2021): P11024.
- 23. Аржанников А. В., Бурдаков А. В., Койдан В. С. и др. Письма в ЖЭТФ, 1978, Т. 227, вып. 3, стр. 173–177.
- 24. Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Burmasov V. S. et al. Plasma heating in a solenoid by relativistic electron beam. Proc. of the 3rd Inter. Conf. on High Power Elec. and Ion Beam Res. and Tech., Novosibirsk, 1979, pp. 29–42.
- 25. Brejzman B. N., Ryutov D. D. Nuclear Fusion. 1974. Vol. 14. N6. P. 873–907.

- 26. Галеев А. А., Сагдеев Р. З., Шапиро В. Д., Шевченко В. И. Релаксация сильточных электронных пучков и модуляционная неустойчивость. ЖЭТФ, 1977, Т. 72. С. 507–517.
- Аржанников А. В. Макроскопические характеристики взаимодействия релятивистского электронного пучка с плазмой в магнитном поле: дисс....канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 1980.
- 28. Аржанников А. В., Синицкий С. Л. Килоамперные электронные пучки для накачки колебаний в вакууме и плазме. НГУ. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2016. 258 с. С. 66–75.
- 29. Ivanov A. V., Tiunov M. A. ULTRASAM-2D code for simulation of electron guns with ultra high precision, in Proceeding of EPAC-2002, Paris, 2002, pp. 1634–1636.
- 30. KV-envelope code, https://github.com/fuodorov/kenv

### References

- ThruVision T5000 T-Ray Camera sees through Clothes (http://www.i4u.com/article15314.html). I4u.com. Retrieved 17 May 2012.
- Parascandola, Bruno (23 January 2013). NYPD Commissioner says department will begin testing a new high-tech device that scans for concealed weapons (http://www.nydailynews. com/new-york/nypdreadies-scan-and-frisk-article-1.1245663). NYDailyNews.com. Retrieved 10 April 2013.
- 3. **Parascandola, Rocco** (22 February 2017). NYPD's pricey, controversial 'T-Ray' gun sensors sit idle, but that's OK with cops. New York Daily News. Retrieved 22 February 2017.
- P. Hillger, J. Grzyb, R. Jain and U. R. Pfeiffer, Terahertz Imaging and Sensing Applications With Silicon-Based Technologies, in IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, vol. 9, no. 1, pp. 1-19, Jan. 2019, doi: 10.1109/TTHZ.2018.2884852.
- 5. Ghavidel A. et al. A sensing demonstration of a sub THz radio link incorporating a lens antenna // Prog. Electromagn. Res. Lett. 2021. T. 99. C. 119–126.
- Nanni E. A. et al. Terahertz-driven linear electron acceleration //Nature communications. 2015. T. 6. №. 1. C. 8486.
- 7. **Jing C.** Dielectric wakefield accelerators //Reviews of Accelerator Science and Technology. 2016. T. 9. C. 127–149.
- 8. **Thompson M. C. et al.** Breakdown limits on gigavolt-per-meter electron-beam-driven wakefields in dielectric structures //Physical review letters. 2008. T. 100. №. 21. C. 214801.
- 9. Aree T. et al. Low-frequency lattice vibrations from atomic displacement parameters of α-FOX-7, a high energy density material //Acta Crystallographica Section B: Structural Science, Crystal Engineering and Materials. 2022. T. 78. №. 3.
- Arzhannikov A. V., Logachev P. V., Bak P. A. etal. Theproject of a beam-plasmagenerator of THzradiation on the kiloamperebeam of a linear induction accelerator// 50th International Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion(ICPAF-2023). 2023. P. 251–251.
- 11. GlyavinM. Yu., LychininA. G., BogdashovA. A. et al. Experimental investigation of the pulsed terahertz gyrotron with record-breaking power and efficiency parameters // Radiophysics and Quantum Electronics. 2013. vol. 56., no. 8–9, P. 550.
- 12. Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Kalinin P.V. et al. Subterahertz generation by strong langmuir turbulence at two-stream instability of high current 1-MeV REBs. 2010.
- Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Kuznetsov S. A. et al. Subterahertz emission at strong REB-plasma interaction in multimirror trap GOL-3 //Fusion Science and Technology. 2011. T. 59. №. 1T. C. 74–77.
- 14. Arzhannikov A. V. and Timofeev I. V. Generation of powerful terahertz emission in a beamdriven strong plasma turbulence. Plasma Physics and Controlled Fusion 54.10 (2012): 105004.
- 15. Arzhannikov A. V. and Timofeev I. V. Intense beam-plasma interaction as a source of sub-mm radiation. Bulletinof NGU. Series: Physics, 11(4), pp.78–104, 2016.

- 16. GlinskyV. V., TimofeevI. V., AnnekovV. V., ArzhannikovA. V. // Siberian Journal of Physics.2019. v. 14, no. 4. P. 5–16. DOI 10.25205/2541-9447-2019-14-4-5-16.
- A. V. Arzhannikov, S. L. Sinitsky, S. S. Popov et al. Energy Content and Spectral Composition of a Submillimeter Radiation Flux Generated by a High-Current Electron Beam in a Plasma Column With Density Gradients, in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 50, no. 8, pp. 2348-2363, Aug. 2022, doi: 10.1109/TPS.2022.3183629.
- D. A. Starostenko, P. V. Logachev, A. V. Akimov et al. Results of operating LIA-2 in radiograph mode, Phys. Part. Nuclei Lett., Vol.11, no.5, pp.660–664, 2014. https://doi.org/10.1134/ S1547477114050264.
- E. S. Sandalov, S. L. Sinitsky, A.V. Burdakov et al. Electrodynamic System of the Linear Induction Accelerator Module, in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 49, no. 2, pp. 718-728, Feb. 2021, doi: 10.1109/TPS.2020.3045345.
- Sandalov E. S., Sinitsky S. L., Skovorodin D. I. et al. Investigation of Transverse Instability of a High-Current Relativistic Electron Beam in a Linear Induction Accelerator. Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 5–22. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-5-22
- SandalovE. S., SinitskyS. L., SkovorodinD. I. et al. Investigation of the Increment of Transverse Instability of a Kiloampere Electron Beam in a Linear Induction Accelerator for Its Use in a Terahertz FEL. Siberian Journal of Physics. 2022. vol. 17, no. 2, pp. 16–29. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-16-29
- 22. Nikiforov D. A., Petrenko A. V., Sinitsky S. L. et al. Investigation of high current electron beam dynamics in linear induction accelerator for creation of a high-power THz radiation source. Journal of Instrumentation 16.11 (2021): P11024.
- 23. ArzhannikovA. V., BurdakovA. V., KoidanV. S. et al. JETP Letters, 1978, vol. 227, no. 3, pp. 173–177.
- 24. Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Burmasov V. S. et al. Plasma heating in a solenoid by relativistic electron beam. Proc. of the 3rd Inter. Conf. on High Power Elec. and Ion Beam Res. and Tech., Novosibirsk, 1979, pp. 29–42.
- 25. BrejzmanB. N., RyutovD. D. NuclearFusion. 1974. Vol. 14. N6. P. 873–907.
- 26. Galeev A. A., Sagdeev R. Z., Shapiro V. D., Shevchenko V. I. Relaxation of high-current electron beams and modulation instability. JETP, 1977, V. 72. P. 507–517.
- 27. ArzhannikovA. V. Macroscopic characteristics of the interaction of a relativistic electron beam with a plasma in a magnetic field: diss. ...cand. Phys.-Math. Sciences. Novosibirsk, 1980.
- 28. ArzhannikovA. V., SinitskyS. L. Kiloampere electron beams for pumping oscillations in vacuum and plasma. NSU. Novosibirsk: IPTs NSU, 2016. 258 p. pp. 66–75.
- 29. Ivanov A. V., Tiunov M. A. ULTRASAM-2D code for simulation of electron guns with ultra high precision, in Proceeding of EPAC-2002, Paris, 2002, pp. 1634–1636.
- 30. KV-envelope code, https://github.com/fuodorov/kenv

## Информация об авторах

Аржанников Андрей Васильевич, доктор физико-математических наук

Синицкий Станислав Леонидович, кандидат физико-математических наук

Старостенко Дмитрий Анатольевич, научный сотрудник

Логачев Павел Владимирович, доктор физико-математических наук, академик РАН

Бак Петр Алексеевич, старший научный сотрудник

Никифоров Данила Алексеевич, научный сотрудник

Попов Сергей Сергеевич, кандидат физико-математических наук

Калинин Петр Валерьевич, научный сотрудник

Самцов Денис Алексеевич, младший научный сотрудник

Сандалов Евгений Сергеевич, научный сотрудник

- Атлуханов Магомедризы Гаджимурадович, младший научный сотрудник
- Григорьев Александр Николаевич, кандидат технических наук

Воробьев Семен Олегович, инженер-исследователь

**Петров Дмитрий Витальевич,** доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН

Протас Роман Викторович, кандидат технических наук

### Information about the Authors

Andrey V. Arzhannikov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Stanislav L. Sinitsky, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Dmitry A. Starostenko, researcher

Pavel V. Logachev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician RAS

Petr A. Bak, senior researcher

Danila A. Nikiforov, researcher

Sergei S. Popov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Petr V. Kalinin, researcher

Denis A. Samtsov, junior researcher

Evgeniy S. Sandalov, researcher

Magomedrizy G. Atlukhanov, junior researcher

Aleksandr N. Grigoriev, Candidate of Technical Sciences

Semyon O. Vorobyov, research engineer

Dmitry V. Petrov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Corresponding Member RAS

Roman V. Protas, Candidate of Technical Sciences

Статья поступила в редакцию 27.02.2023; одобрена после рецензирования 14.03.2023; принята к публикации 14.03.2023

*The article was submitted 27.02.2023; approved after reviewing 14.03.2023; accepted for publication 14.03.2023*