

**РЕЛЯТИВИСТСКАЯ  
ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

УДК 533.9

**ЭНЕРГОСОДЕРЖАНИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ПОТОКА  
СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ 5 мкс,  
ГЕНЕРИРУЕМОГО В ПЛАЗМЕ ПРИ РЕЛАКСАЦИИ РЭП**

© 2022 г. А. В. Аржанников<sup>a, b</sup>, С. Л. Синицкий<sup>a, b</sup>, Д. А. Самцов<sup>a, \*</sup>, Е. С. Сандалов<sup>a, b</sup>,  
С. С. Попов<sup>a, b</sup>, М. Г. Атлуханов<sup>a</sup>, М. А. Макаров<sup>a</sup>, П. В. Калинин<sup>a, b</sup>,  
К. Н. Куклин<sup>a</sup>, А. Ф. Ровенских<sup>a</sup>, В. Д. Степанов<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup> Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>b</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

\*e-mail: D.A.Samtsov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 13.05.2022 г.

После доработки 15.06.2022 г.

Принята к публикации 20.06.2022 г.

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера (ИЯФ СО РАН) проводятся экспериментальные и теоретические исследования процесса генерации субмиллиметрового электромагнитного излучения с характерными частотами 0.1–0.5 ТГц в условиях интенсивного пучково-плазменного взаимодействия. Генерация излучения осуществляется на специализированной установке ГОЛ-ПЭТ при коллективной релаксации импульсного релятивистского электронного пучка (РЭП с параметрами: энергия электронов 0.6 МэВ, ток пучка 15 кА, длительность импульса 5 мкс) в плазменном столбе с плотностью плазмы  $(0.5–1) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , в условиях его удержания в вакуумной камере с гофрированным магнитным полем (отношение максимального и минимального значений магнитной индукции в гофрах  $B_{\max}/B_{\min} = 4.5/3.2$  Тл). Важной особенностью проводимых исследований является наличие в плазменном столбе специально созданных неоднородностей по радиусу в сечении и по длине. В ранее проведенных экспериментах при этих условиях достигнут высокий уровень мощности (около 10 МВт) в потоке субмиллиметрового излучения, выведенном в атмосферу. Достигнута величина энергии излучения 7 Дж при длительности импульса 0.5 мкс, которая ограничена высокочастотным пробоем на вакуумной стороне выходного окна. Данная статья посвящена решению задачи по увеличению длительности импульса, генерируемого субмиллиметрового излучения такой высокой мощности. Это достигается подавлением ВЧ-пробоя у поверхности окна, через которое поток излучения выводится в атмосферу, и наращиванием длительности импульса мегавольтного напряжения, прикладываемого к ускорительному диоду, где генерируется РЭП.

*Ключевые слова:* РЭП, плазма, пучково-плазменное взаимодействие, волны в плазме, субмиллиметровое излучение, мегаваттный поток излучения

**DOI:** 10.31857/S0367292122600418

### ВВЕДЕНИЕ

Значительный научно-практический интерес представляют исследования коллективного взаимодействия электронного пучка с плазмой с позиции формирования потоков субмиллиметрового электромагнитного излучения (длина волны  $\lambda = 2–0.1$  мм, частота  $f = 0.15–3$  ТГц) в такой системе. Также, такие лабораторные исследования могут быть полезны для объяснения механизмов генерации радиоизлучения в окрестности некоторых звезд и планет [1]. К тому же продолжается рост числа возможных приложений излучения данного частотного диапазона. В этой части спектра лежат вращательные уровни некоторых молекул в газах и колебания кристаллических решеток

в твердом теле [2]. Однако до сих пор полностью не решена проблема генерации мощного субмиллиметрового излучения, поскольку ни приборы вакуумной электроники, хорошо зарекомендовавшие себя в области СВЧ, ни лазерные методы генерации такого излучения, работающие на инфракрасных и оптических частотах, не могут эффективно применяться в этом частотном диапазоне.

В данной статье описаны экспериментальные исследования процесса генерации мегаваттного потока субмиллиметрового излучения (0.1–0.6 ТГц) при пучково-плазменном взаимодействии и выведении этого потока в атмосферу. Эксперименты проводятся на специализирован-

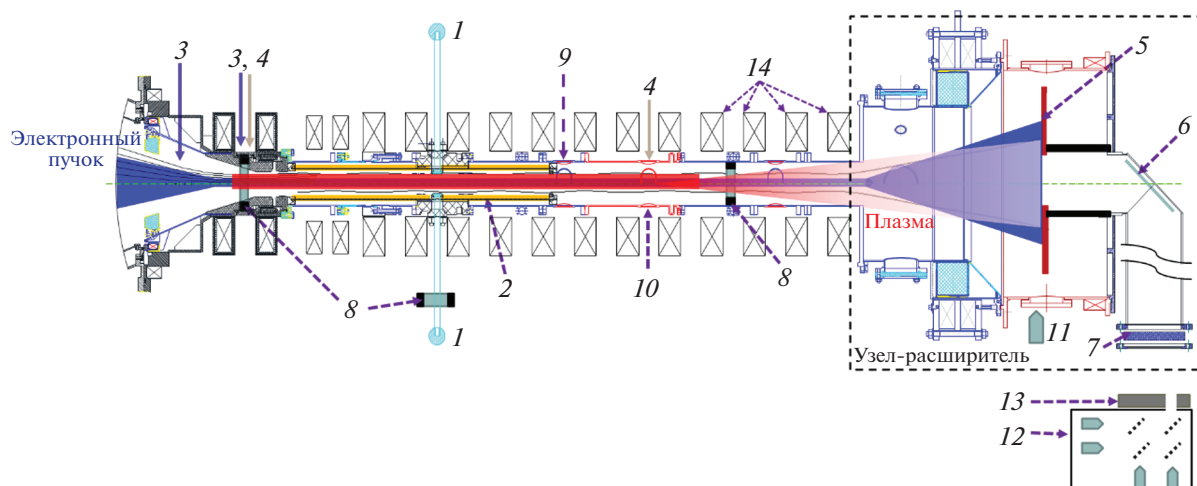
ной установке ГОЛ-ПЭТ в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера (ИЯФ СО РАН). Генерация осуществляется в процессе коллективной релаксации релятивистского электронного пучка (РЭП с параметрами: энергия электронов 0.6 МэВ, ток пучка 15 кА, длительность импульса 5 мкс) в плазменном столбе с заданным профилем плотности по его сечению и длине, в условиях его удержания в магнитном поле. За время инжекции РЭП происходит возбуждение и накачка в столбе плазменных колебаний, которые далее трансформируются в электромагнитные волны (ЭМ), выходящие из плазмы в виде потоков электромагнитного излучения. Характерные для данного эксперимента механизмы накачки плазменных колебаний и их трансформации в электромагнитные волны подробно описаны в работах [3, 4]. В соответствии с этими механизмами, частоты в спектре выходящего из плазмы ЭМ-излучения должны быть кратны основной плазменной частоте. Эксперименты в условиях наличия радиальных градиентов плотности плазмы по сечению столба позволили достигнуть уровня мощности 4 МВт в потоке излучения, выведенном в атмосферу [5]. Подчеркнем, что, согласно работе [5], высокая эффективность генерации на основной плазменной частоте должна достигаться в условиях квазипериодического возмущения плотности плазмы, которое создано под углом к направлению силовых линий магнитного поля. В дополнение к этому, увеличению мощности в потоке ЭМ-излучения, выводимого в атмосферу, способствует созданию области с резким понижением плотности плазмы на том конце плазменного столба, где сильноточный пучок выходит из него и поглощается в коллекторе. Однако подъем мощности ЭМ-излучения до высокого уровня привел к резкому ограничению длительности импульса до величины около 0.5 мкс, что вызвано развитием ВЧ-разряда с вакуумной стороны у выходного окна. Калориметрические измерения энергии в выведенном в атмосферу потоке ЭМ-излучения показали, что в этих условиях энергосодержание в нем достигает величины 7 Дж при длительности 0.5 мкс, что соответствует уровню средней импульсной мощности  $\approx 10$  МВт [6]. Повышение длительности выводимого в атмосферу потока субмиллиметрового излучения с такой высокой мощностью явилось главной задачей исследований на установке ГОЛ-ПЭТ, описанных ниже в данной статье.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка ГОЛ-ПЭТ состоит из двух основных модулей — из ускорителя У-2, генерирующего сильноточный релятивистский электронный пучок (РЭП) [7] с отмеченными выше параметрами и формирователя плазменного столба в соленоиде с гофрированным магнитным полем [8].

Схема плазменной секции установки представлена на рис. 1. Проведение эксперимента осуществляется в следующей последовательности. Вначале, в вакуумной камере создается магнитное поле с помощью охватывающего ее соленоида. Затем, с помощью системы импульсного напуска газа 3, 4 производится заполнение вакуумной камеры водородом  $H_2$  и криптоном Кг так, чтобы получить требуемое распределение газов по ее длине за время 14 мс. Водород используется в качестве основного рабочего газа при создании плазмы. Криптон обеспечивает зарядовую нейтрализацию электронного пучка в системе магнитного сжатия и препятствует распространению водорода в ускорительный диод генератора электронного пучка У-2. Далее по времени, в созданном газовом облаке инициируется квазипериодический высоковольтный (26 кВ) разряд, который создает столб предварительной плазмы в условиях продольного гофрированного поля с отношением максимального и минимального значений магнитной индукции в гофрах  $B_{max}/B_{min} = 4.5/3.2$  Тл. Инжекция РЭП начинается через 20 мкс после инициирования высоковольтного пробоя в газе, когда разрядный ток, имеющий амплитуду колебаний 20 кА, обращается в ноль после одного периода колебаний. Для измерения тока высоковольтного разряда и тока РЭП в различных сечениях вакуумной камеры используется набор поясов Роговского  $\delta$ . Энергия пучка электронов определяется по напряжению, прикладываемому к ускорительному диоду, и может варьироваться в диапазоне 0.4–0.8 МэВ. Для измерения плотности плазмы применяются оптические диагностики: интерферометр Майкельсона 10 на длине волны 10.5 мкм и система томсоновского рассеяния 9 на длине волны 1.053 мкм.

Описываемые эксперименты по генерации субмиллиметрового ЭМ-излучения в пучково-плазменной системе были сосредоточены на достижении максимального энергосодержания за импульс в потоке излучения, распространяющегося вдоль оси установки и, далее, выходящем в атмосферу. Для достижения этой цели использован специально созданный в установке узел-расширитель, дополняющий вакуумную камеру там, где РЭП выходит из торца плазменного столба. Резкое понижение плотности плазмы на этом конце плазменного столба обеспечивает беспрепятственный выход потока электромагнитного излучения вдоль оси установки. В то же время электронный пучок распространяется далее в вакуумной полости этого узла, работающего в качестве расширителя сечения пучка в условиях сильно понижающейся индукции магнитного поля. Это приводит, соответственно, к снижению плотности тока РЭП в том месте, где он попадает на графитовый коллектор 5. В итоге оказывается,

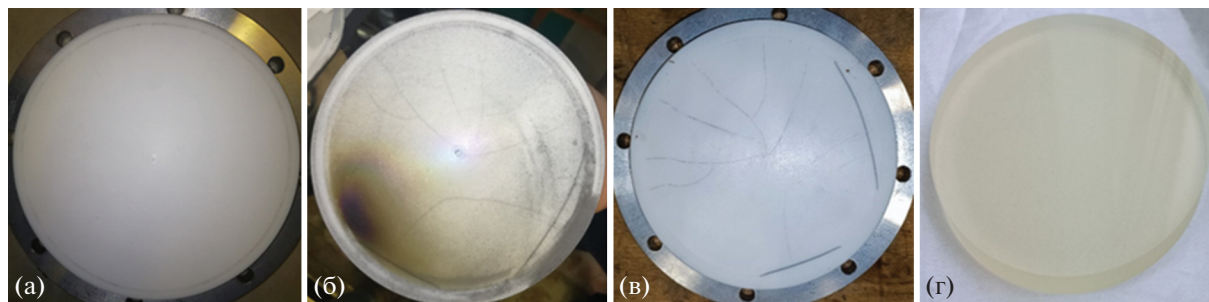


**Рис. 1.** Схема плазменной секции установки ГОЛ-ПЭТ. Высоковольтные электроды 1, кварцевая труба 2, клапаны системы напуска газов: криптона 3, водорода 4, графитовый коллектор 5, поворотное зеркало 6, выходное окно 7, пояса Роговского 8, узел Томсоновского рассеяния 9, интерферометр 10, ТГц детектор 11, полихроматор 12, панель газоразрядных ламп 13, катушки соленоида, создающие гофрированное магнитное поле 14.

что основная доля электронов РЭП поглощается на графитовом коллекторе большой площади, и лишь небольшая часть пучка поникает через отверстие в нем диаметром 16 см. При этом, вышедший из торца плазменного столба поток субмиллиметрового излучения также проходит через это отверстие. На выходе из отверстия поток оказывается захваченным в стальной трубе этого же диаметра, которая установлена непосредственно за этим коллектором. При дальнейшем распространении этого потока ЭМ-излучения по трубе, он отражается от поворотного зеркала 6, установленного под углом  $45^\circ$  к оси установки. Роль зеркала выполняет плоская полированная поверхность пластины из нержавеющей стали, имеющая эллиптическую форму, которая соответствует сечению при соединении двух одинаковых труб под углом  $90^\circ$ . Поток ЭМ-излучения, отраженный от зеркала, распространяется по стальной трубе и выводится в атмосферу через выходное окно 7, которое изготовлено из полимерного материала, хорошо пропускающего субмиллиметровое излучение.

Для регистрации характеристик генерируемого потока субмиллиметрового излучения используются детекторы на основе диодов с барьером Шоттки (ДБШ), которые дополнены частотно-селективными полосовыми фильтрами. Регистрация выполняется как отдельными детекторами 11, так и целым набором детекторов, входящим в состав восьмиканального полихроматора 12, предназначенного для анализа спектрального состава ЭМ-излучения [9]. Для измерения энергосодержания в потоке ЭМ-излучения используется специализированный калориметр,

предоставленный нам авторами работы [10]. Процесс измерения энергии излучения с помощью калориметра основан на поглощении энергии электромагнитного излучения в тонкостенной цилиндрической металлокерамической оболочке и регистрации изменения ее температуры при помощи большого числа (около 1000) последовательно включенных термопар. Для направления потока ЭМ-излучения, приходящего вдоль оси цилиндрической оболочки калориметра, именно на ее поверхность, авторами был установлен внутри нее навстречу потоку металлический конус с углом при вершине  $32^\circ$ . По частному сообщению создателей калориметра, его чувствительность, измеренная на частоте около 100 ГГц, имеет величину 90 мкВ/Дж. Эта величина незначительно отличается от чувствительности калориметра на частоте 10 ГГц (70 мкВ/Дж), которая была указана в [10]. Для целенаправленного использования этого калориметра при проведении измерений энергии импульса ЭМ-излучения в интервале частот 200–300 ГГц, мы заменили указанный выше конус на новый конус с углом при вершине  $23^\circ$ . Учитывая уменьшение толщины скин-слоя в материале цилиндрической оболочки с ростом частоты ЭМ-излучения, мы считаем, что чувствительность калориметра не может сильно измениться при смещении регистрации энергии излучения в окрестность частоты 300 ГГц. Описание экспериментов и результаты измерения энергосодержания в импульсном потоке ЭМ-излучения приведены в статье [11]. Исходя из представленного выше комментария по используемому калориметру, можно считать, что в ходе экспериментов достоверно измеряется энергия потока субмиллиметрового излучения за



**Рис. 2.** Фотографии выходного окна в различных условиях: а) поверхность фторопластового окна до проведения экспериментов; б) поврежденная поверхность этого окна после серии экспериментов по генерации субмиллиметрового потока с мощностью масштаба 10 МВт; в) поврежденная поверхность после удаления с нее тонкого загрязняющего слоя; г) окно из полиимидпентена (англ. – TRX), до использования в эксперименте.

импульс, а, с учетом измеряемой длительности сигнала излучения, и абсолютная величина импульсной субмиллиметровой мощности. Для визуальной индикации распределения плотности мощности по сечению потока применяются панели газоразрядных ламп 13 [12].

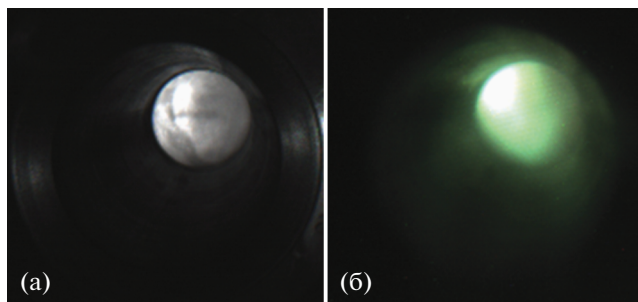
## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### *Мероприятия, обеспечившие увеличение длительности импульса субмиллиметрового излучения*

В предшествующих сериях экспериментов на установке ГОЛ-ПЭТ, при выведении в атмосферу потока субмиллиметрового излучения с мощностью до нескольких мегаватт через фторопластовое выходное окно диаметром 140 мм и толщиной 20 мм обеспечивалась длительность импульса до 3-х мкс [5]. Указанная толщина материала обеспечила необходимые механические характеристики окна, выдерживающего перепад давления от вакуума до атмосферы. При переходе к пучково-плазменным экспериментам с резким спадом плотности плазмы на выходном торце плазменного столба, когда мощность субмиллиметрового потока поднялась до уровня выше 10 МВт, оказалось, что длительность импульса излучения, выведенного в атмосферу, упала ниже 1 мкс. Наблюдение интенсивности излучения в вакуумной камере на участке узла-расширителя пучка с помощью отдельного детектора (см. 11 на рис. 1) показало, что здесь импульс излучения имеет длительность до 4-х мкс. Это означает, что укорочение импульса потока излучения, выходящего в атмосферу, происходит из-за препятствия к его распространению, возникающего именно на выходном окне. Осмотры выходного окна показали наличие характерных повреждений поверхности фторопласта со стороны вакуума, свидетельствующие о горении высокочастотного разряда (см. рис. 2). Поглощение оставшейся доли пучка элект-

тронов на металлической поверхности зеркала приводит к наработке пристеночной плазмы. Возникновение ВЧ-пробоя на внутренней поверхности окна может быть вызвано последующим распространением этого паразитного разряда вдоль поверхности металлической трубы, искажением фронта волны и образованием пиков плотности мощности в сечении субмиллиметрового потока излучения, которые превышают предел по электрической прочности при заданных вакуумных условиях.

Для предотвращения развития ВЧ-пробоя на выходном окне были внесены изменения в конструкцию вакуумной камеры на участке вывода субмиллиметрового излучения в атмосферу. Прежде всего необходимо было увеличить расстояние между поворотным зеркалом и выходным окном. С этой целью была изготовлена и смонтирована металлическая труба, которая позволила отодвинуть выходное окно от поворотного зеркала от исходного расстояния 60 см до 210 см. Увеличение расстояния обеспечивало резкое понижение плотности в водородном облаке у выходного окна, которое возникает в результате подхода потока газа, распространяющегося вдоль вакуумной камеры при его импульсном напуске перед началом создающего плазму высоковольтного разряда. Сохранение хороших вакуумных условий у поверхности выходного окна должно предотвращать ВЧ-пробой в этой пространственной области. Кроме того, при распространении потока электромагнитного субмиллиметрового излучения после его отражения от зеркала происходит размывание областей с высокой плотностью мощности излучения в его сечении, которое тем больше, чем больше прошел поток ЭМ-излучения по трубе. Таким образом, удлинение трубы должно приводить к понижению пиков плотности мощности в сечении потока, приходящего на выходное окно, что также понижает вероятность возникновения ВЧ-пробоя у его поверхности. В дополнение к увеличению расстояния между зер-



**Рис. 3.** Фотографии поверхности поворотного зеркала через окно, изготовленное из ТРХ, в случае подсветки зеркала с помощью лампочки со стороны распространения потока субмиллиметрового излучения (а), и во время прохождения РЭП через плазму (б).

калом и окном, была осуществлена замена в выходном окне фторопластового диска из полиметилпентена (ТРХ). Данный материал (ТРХ) обладает хорошим пропусканием потока субмиллиметрового излучения в диапазоне длин волн 0.1–2 мм и прозрачен в оптическом диапазоне (см. рис. 3) [13]. Это позволило нам осуществлять вывод через окно потока субмиллиметрового излучения при одновременной регистрации с помощью скоростной SDU-камеры изображения поверхности поворотного зеркала во время процессов, сопровождающихся свечением плазмы. Отметим, что для предотвращения возможных повреждений окна диаметром 140 мм, приводящих к прорыву атмосферного воздуха в вакуумную камеру, нами использован диск из полиметилпентена необходимой толщины 15 мм.

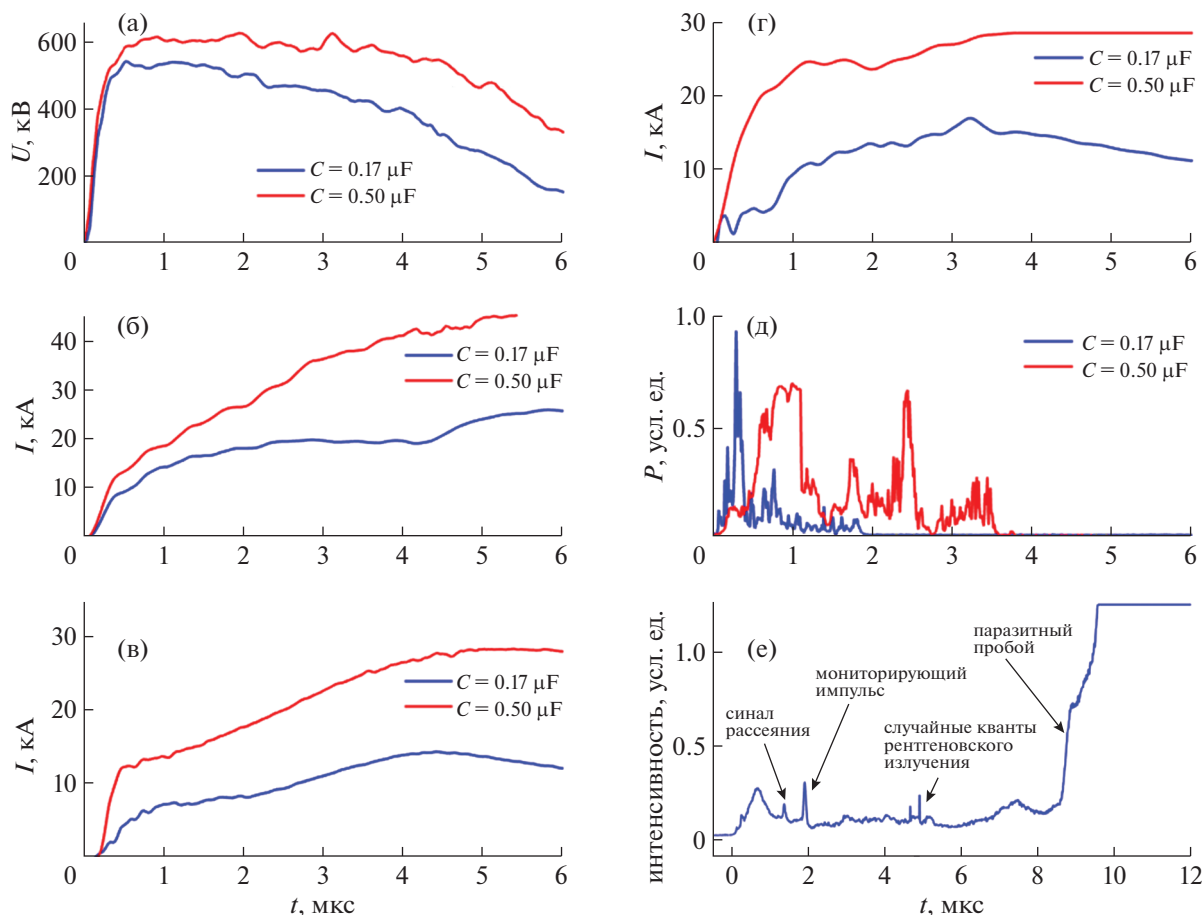
Чтобы обеспечить подъем длительности импульса генерируемого в плазме излучения, была увеличена продолжительность генерации РЭП в диоде ускорителя У-2 за счет трехкратного увеличения накопительной емкости в ГИНе ускорителя с 0.17 мкФ до 0.5 мкФ [7]. На рис. 4 приведены осциллограммы сигналов напряжения на диоде ускорителя и токов пучка на различных участках вакуумной камеры установки.

Результаты регистрации сигналов в случае использования ГИНа с емкостью 0.17 мкФ представлены линиями синего цвета (выстрел № 13774); сигналы от датчиков, когда емкость ГИНа была увеличена до 0.5 мкФ (выстрел № 14146), представлены красным цветом. Как видно из осциллограмм, увеличение емкости накопителя привело к тому, что напряжение на ускорительном диоде возросло до 600 кВ, и это напряжение удерживается на неизменном уровне около 4-х мкс. При таком напряжении на диоде возрос ток пучка электронов, как в диоде ускорителя, так и на участке камеры, где он проходит через плазменный столб. Отметим, что на начальном участке импульса РЭП величина полного то-

ка, измеряемого в сечении вакуумной камеры поясом Роговского на входе в плазменный столб (см. рис. 4в) меньше величины полного тока, измеряемого поясом Роговского на выходе плазменного столба (см. рис. 4г).

Такая разница в сигналах поясов Роговского вызвана нейтрализацией тока РЭП на входе в плазменный столб индуцированным в плазме током и низким уровнем нейтрализации тока пучка на выходе из столба из-за наличия вакуумного промежутка между торцом столба и графитовым коллектором, принимающим пучок. Как отмечалось выше, этот вакуумный промежуток с резким понижением плотности плазмы на торце формировался при создании столба предварительной плазмы с целью достижения максимального вывода генерируемого потока излучения вдоль оси установки. В условиях с таким вакуумным промежутком, ток высоковольтного разряда с электродов 1 замыкается главным образом в сторону ускорителя с амплитудой около 20 кА. Только его малая часть (около 2 кА) протекает в противоположную сторону вдоль внутренней поверхности кварцевой трубы и далее на ее конце стекает на металлическую камеру. Укажем, что зазор между кварцевой трубой и металлической камерой на этом участке около 0.5 см. Таким образом, в момент начала инжекции пучка торец плазменного столба имеет резкую границу с вакуумным объемом на участке камеры, где расположен конец кварцевой трубы, обращенный к коллектору. В этих условиях, обратный ток, генерируемый пришедшим на коллектор электронным пучком, протекает от этого коллектора по внутренней поверхности металлической камеры и далее переходит на торце кварцевой трубы в плазму, покрывающую внутреннюю поверхность этой трубы. Безусловно, такой переход обеспечивается электрическим пробоем по поверхности на торце кварцевой трубы, но этот пробой не мешает поддержанию резкой границы с понижением плотности на торце плазменного столба в течение времени 8 мкс, как это демонстрирует сигнал в канале томсоновского рассеяния (см. рис. 4е). Сигналы в каналах томсоновского рассеяния показали, что с началом инжекции пучка подрастание плотности плазмы до уровня  $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$  происходит в течение времени около 1 мкс. Далее по времени, величина плотности плазмы остается неизменной в течение около пяти микросекунд, что обеспечивает устойчивую генерацию субмиллиметрового излучения на таком временном интервале. Возвращаясь назад к вопросу о соотношении сигналов полного тока, измеряемого в камере на входе в плазменный столб и тока, измеряемого на выходе из него, можно заключить следующее.

Вполне естественно, что во время инжекции пучка с течением времени обратный плазменный



**Рис. 4.** Осциллограммы сигналов, характеризующие генерацию РЭП в ускорительном диоде при двух вариантах емкости накопителя в ГИНе (выстрел № 13774,  $C = 0.17$  мкФ; выстрел № 14146,  $C = 0.50$  мкФ). Напряжение на диоде  $U$  (а); ток  $I$  в ускорительном диоде (б); ток  $I$  на входе в плазменный столб (в); ток  $I$  на выходе из плазменного столба (г); сигнал с канала полихроматора на частоте 150 ГГц (д); сигнал в канале томсоновского рассеяния, регистрирующего плотность плазмы на расстоянии 1.8 см от центра плазменного столба (е).

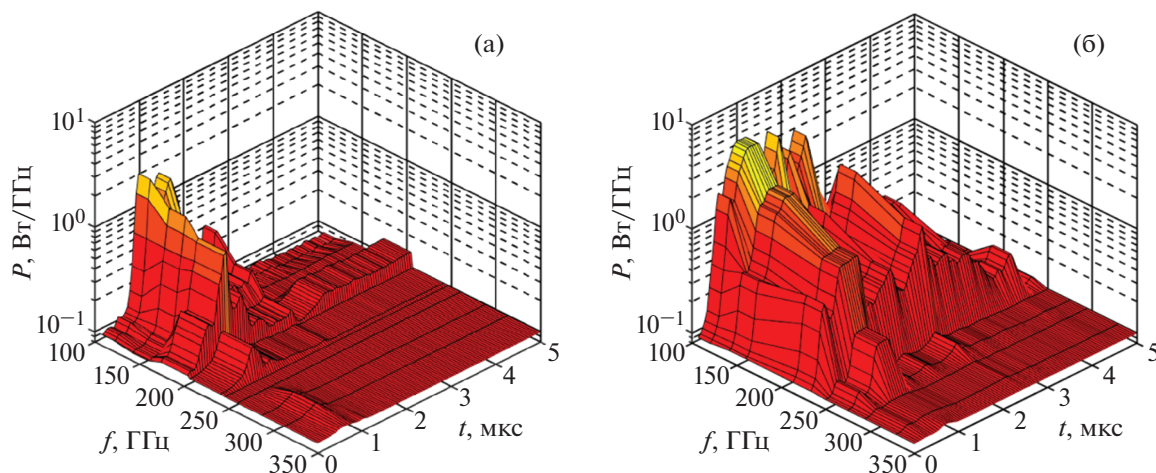
ток затухает, и магнитное поле электронного пучка выходит из сечения плазменного столба к стенке вакуумной камеры, что сопровождается подъемом сигнала полного тока на входе плазменного столба до уровня сигнала на выходе. При этом замыкание обратного плазменного тока, как было указано выше, происходит в результате его перетекания со стенки металлической вакуумной камеры на слой плазмы, локализованный у внутренней поверхности кварцевой трубы.

#### *Спектральный состав потока субмиллиметрового излучения длительностью 5 мкс*

В результате реконструкции узла вывода субмиллиметрового излучения и увеличения энергоемкости ГИНа удалось увеличить длительность импульса потока субмиллиметрового излучения в атмосферу. На рис. 5 сопоставлена динамика спектрального состава потока субмиллиметрового излучения, полученного при прежних усло-

виях проведения экспериментов, с динамикой спектра излучения в потоке, зарегистрированном после проведения описанных выше изменений в конструкции и режиме работы установки. Спектральный состав потока излучения в прежних условиях эксперимента демонстрирует результат выстрела № 13774, а для условий в модернизированной установке – результат выстрела № 14146.

Сопоставление спектрального (частотного) состава в потоке субмиллиметрового излучения, регистрируемого в полихроматоре для этих двух случаев, показывает, что после модернизации установки ее величина в области частот 100–150 ГГц увеличилась с 2 Вт/ГГц до 5 Вт/ГГц. Это означает, что мощность в потоке субмиллиметрового излучения, выведенном в атмосферу, в новых экспериментальных условиях в два-три раза превысила ее прежний уровень, который, согласно работе [10], имел масштаб 10 МВт. При этом



**Рис. 5.** Квазитрехмерная диаграмма спектрального (частотного) состава потока субмиллиметрового излучения при разной длительности инжекции электронного пучка и, как следствие, длительности генерации субмиллиметрового излучения: (а) генерация излучения около 2 мкс (выстрел № 13774), (б) генерация излучения около 4 мкс (выстрел № 14146).

длительность субмиллиметрового импульса выросла с одной до четырех микросекунд.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам модификации условий эксперимента реализована генерация РЭП в ускорительном диоде при поддержании постоянного напряжения катода на уровне 0.6 МВ в течение времени 4 мкс, что обеспечило инжекцию электронного пучка в плазму в течение этого времени с неизменной энергией электронов и при повышенном токе пучка. Увеличение расстояния между поворотным зеркалом и окном для вывода излучения в атмосферу и замена материала этого окна с фторопласта на ТРХ привели к предотвращению ВЧ-пробоя на поверхности окна с вакуумной стороны. В этих условиях был обеспечен устойчивый вывод потока субмиллиметрового излучения в атмосферу в течение всего времени генерации его в плазме, которое составило около 5 мкс. Окно из ТРХ-материала, которое хорошо пропускает как электромагнитное субмиллиметровое излучение, так и свет в видимом диапазоне, позволило осуществить видеонаблюдение за состоянием вакуумного объема в узле вывода излучения и контролировать возникновение высокочастотного пробоя с помощью SDU-камеры. Проведенные измерения спектральной (частотной) плотности мощности в интервале частот 100–600 ГГц показали, что в результате проведенной модификации экспериментальных условий, в области частот от 100 до 250 ГГц ее величина возросла в три раза по отношению к предшествующей серии экспериментов, в которой импульсная мощность в потоке была на уровне 10 МВт.

Таким образом, длительность импульса излучения в потоке, выведенном в атмосферу, составила около 5 микросекунд при трехкратном увеличении импульсной мощности.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-12-00250-П).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kampfrath T., Tanaka K., Nelson K.A.* Resonant and nonresonant control over matter and light by intense terahertz transients // *Nat. Photonics.* 2013. V. 7. P. 680.
2. *Cairns I.H., Menietti J.D.* // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 29515.
3. *Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Burmasov V.S., Ivanov I.A., Kasatov A.A., Kuznetsov S.A., Makarov M.A., Mekler K.I., Polosatkin S.V. et al.* // *IEEE Trans. THz Sci. Technol.* 2016. V. 6. № 2. P. 245. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2016.2525783>
4. *Timofeev I.V., Annenkov V.V., Arzhannikov A.V.* // *Phys. Plasmas.* 2015. V. 22. № 11. 113109.
5. *Arzhannikov A.V., Ivanov I.A., Kasatov A.A., Kuznetsov S.A., Makarov M.A., Mekler K.I., Polosatkin S.V., Popov S.S., Rovenskikh A.F., Samtsov D.A., Sinitsky S.L., Stepanov V.D., Annenkov V.V., Timofeev I.V.* // *Plasma-Phys. Control. Fusion.* 2020. V. 62. № 4. 045002.
6. *Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L., Popov S.S., Timofeev I.V., Samtsov D.A., Sandalov E.S., Kalinin P.V., Kuklin K., Makarov M.A., Rovenskikh A., Stepanov V., Annenkov V., Glinitsky V.* // *IEEE Trans. THz Sci. Technol.* 2021. *TechRxiv.* <https://doi.org/10.36227/techrxiv.19360982.v1>
7. *Arzhannikov A.V., Bobylev V.B., Nikolaev V.S., Sinitsky S.L., Tarasov A.V.* // *XVI International Sympos-*

- sium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. V. 2259. P. 392. SPIE.
8. *Arzhannikov A.V., Ivanov I.A., Kalinin P.V., Kasatov A.A., Makarov M.A., Mekler K.I., Rovenskikh A.F., Samtsov D.A., Sandalov E.S., Sinitsky S.L.* // Journal of Physics: Conf. Ser. IOP Publ. 2020. T. 1647. № 1. 012011.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1647/1/012011>.
  9. *Arzhannikov A.V., Ivanov I.A., Kuznetsov S.A., Samtsov D.A., Lazorskiy P.A., Gelfand A.V.* // IEEE 22nd Intern. Conf. Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). 2021.  
<https://doi.org/10.1109/EDM52169.2021.9507604>
  10. *Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Ковнеристый Ю.К., Кораблев Г.С., Кулагин И.С., Лазарева И.Ю., Цололихин В.И., Шульгин В.В.* // Приборы и техника эксперимента. 1992. № 2. С. 153.
  11. *Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L., Popov S.S., Timofeev I.V., Samtsov D.A., Sandalov E.S., Petr Kalinin, Kuklin K., Makarov M.A., Rovenskikh A.F., Stepanov V., Annenkov V., Glinsky V.* // IEEE Trans. THz Sci. Technol, Tech Rxiv. Preprint. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.19360982.v1>
  12. *Samtsov D.A., Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L., Makarov M.A., Kuznetsov S.A., Kuklin K.N., Popov S.S., Sandalov E.S., Rovenskikh A.F., Kasatov A.A., Stepanov V.D., Ivanov I.A., Timofeev I.V., Annenkov V.V., Glinskii V.V.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2021. V. 49. № 11. P. 3371.  
<https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3108880>
  13. *Рогалин В.Е., Каплунов И.А., Кропотов Г.И.* // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 125. № 6. С. 851.