

Компактные сильноточные источники серии РАДАН в физических исследованиях

*В.Г. Шпак**, *М.И. Яландин*, *К.А. Шарыпов*, *С.А. Шунайлов*

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

**radan@iep.uran.ru*

Аннотация. Источники РАДАН создавались в 1980-х сначала как переносные импульсные рентенаппараты, но основной целью была серия многоцелевых компактных высоковольтных генераторов для лабораторных исследований. Удачное сочетание высоковольтного коаксиального емкостного накопителя энергии и встроенного в него трансформатора Тесла, возможности прецизионной синхронизации подключения к нагрузке, а также укорочения и компрессии выходных импульсов сразу сделали такие источники востребованными, главным образом, в физических экспериментах. Наиболее успешными были применения при изучении быстропротекающих эмиссионных и разрядных процессов, для генерации потоков убегающих электронов в газах, формирования коротких вакуумных взрывоэмиссионных пучков. Источники также стали основой экспериментов по генерированию мощных когерентных и сверхширокополосных СВЧ импульсов, накачке полупроводниковых лазеров, импульсной катодолюминесценции и т.п. К настоящему времени на базе источников серии РАДАН создано уже более 200 исследовательских установок для решения сложных исследовательских задач. В данной работе представлен краткий обзор некоторых результатов, полученных в последние годы.

Ключевые слова: трансформатор Тесла, субнаносекундный диапазон, взрывная электронная эмиссия, убегающие электроны, СВЧ генерация.

1. Введение

К лабораторным высоковольтным источникам предъявляется ряд различных, иногда даже противоречивых требований, однако, в любом случае, они должны быть безопасными, компактными, работать от обычной сети с частотой повторения импульсов, иметь приемлемый уровень собственных помех и низкую чувствительность к внешним электромагнитным шумам. Именно поэтому источники серии РАДАН легко интегрируются в состав сложных электрофизических установок, совместимы с современной измерительной аппаратурой, а также успешно используются для междисциплинарных исследований.

Здесь показаны возможности использования стабильности, точности синхронизации и трансформации формы выходных импульсов источников РАДАН. Представлен ряд результатов последних лет по изучению потоков убегающих электронов в газе, анализу механизмов эмиссии и формированию сильноточных пучков в субнаносекундном диапазоне длительностей, а также генерированию и применению мощных когерентных микроволновых импульсов.

2. Специфика и параметры источников РАДАН

Главной особенностью конструкции источников РАДАН является встроенный в коаксиальный накопитель компактный резонансный трансформатор Тесла (ТТ) с разомкнутым сердечником из пластин (70 мкм) холоднокатаной трансформаторной стали. Части сердечника одновременно служат коаксиальными электродами накопительной одиночной (ОФЛ) или двойной (ДФЛ) формирующей линии. Для экранирования помех весь высоковольтный контур размещён внутри герметичного металлического корпуса. Увеличение электрической прочности обеспечивалось зарядкой накопительной линии до максимального напряжения на первом полупериоде колебаний за 1–8 мкс. В качестве диэлектрика линий использовалось трансформаторное масло. В зависимости от конструкции малоиндуктивный емкостной накопитель первичного контура заряжался до 0.45–5 кВ через

встроенный преобразователь от сети или аккумулятора и коммутировался на первичную обмотку ТТ тиристором, разрядником или тиратроном. От первичного коммутатора зависела точность включения и синхронизации источника, однако не меньшую роль играл и высоковольтный разрядник, подключающий ОФЛ или ДФЛ к нагрузке. В частности, при работе с ОФЛ неуправляемые разрядники высокого давления Р-43 и Р-49 обеспечивали разброс включения 50–100 нс [1]. При времени зарядки ОФЛ 1–2 мкс нестабильность амплитуды напряжения выходного импульса составляла 10–20%. В источниках с ДФЛ (рис. 1а) время зарядки было увеличено до 8 мкс и использован разрядник специальной конструкции с заземленным электродом. Даже увеличение разброса срабатывания по времени до 200 нс не приводило к увеличению разброса амплитуды выходного импульса. В случае применения управляемого разрядника – тригatrona – стабильность амплитуды в основном определялась точностью запускающего импульса (1–2%), при этом временной разброс уменьшался до 0.1–0.2 нс. Для запуска магнитных систем были предусмотрены синхроимпульсы с регулируемым опережением.

Таблица 1. Основные характеристики малогабаритных источников РАДАН.

Модель	Выходное напряжение*, кВ	Формирующая линия		Длительность импульса, нс	Фронт, нс	Макс. частота, имп./сек	Масса, кг
		Тип	Импеданс, Ом				
150	100	ОФЛ	20	2	0.8	10	6
ЭКСПЕРТ	100	ОФЛ	20	2.5	0.5	10	7
HPRF	100	ОФЛ	20	2	0.5	1000	15
220	150	ОФЛ	20	2	0.5	25	12
300	20–180	ДФЛ	45 (2·22.5)	4	1.5	25	25
303 (А, Б)	20–180	ДФЛ	45 (2·22.5)	4	1.5	25, 100	28
303+снс**	240	ДФЛ	45 (2·22.5)	0.3–5	0.2	100	32

*импеданс нагрузки 50 Ом; **субнаносекундный преобразователь

3. Приоритетные результаты последних лет

К субнаносекундным мы будем относить источники, у которых фронт или вся длительность импульса короче 1 нс. В наших экспериментах использовался режим стабилизации разрядника ДФЛ и дополнительный преобразователь формы импульса (рис. 1б), выполненный в виде индуктивно-емкостного звена с регулируемым обостряющим и срезающим разрядниками (азот, 40–60 атм). Это позволило укоротить фронт до 150 пс (рис. 1в), а длительность импульса могла плавно регулироваться изменением зазора срезающего разрядника во время работы без его разгерметизации.

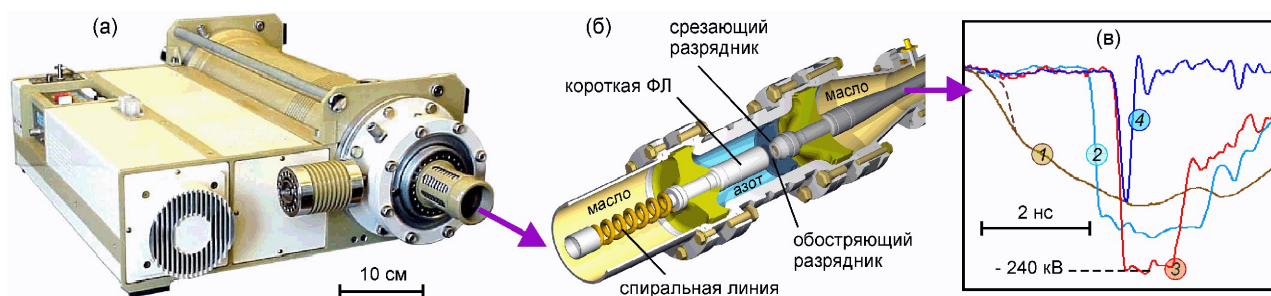


Рис. 1. Наносекундный ДФЛ-источник РАДАН-303Б (а); индуктивно-емкостной субнаносекундный преобразователь (компрессор) импульса (б); импульсы на выходе преобразователя (в).

3.1. Формирование пикосекундных потоков убегающих электронов в газе

Высоковольтные импульсы длительностью <300 пс (4 на рис. 1в) использовались для исследования эмиссии убегающих электронов (УЭ) в газовых промежутках с резко неоднородным электрическим полем. Следует отметить, что такие эксперименты реализуемы только при плавной регулировке амплитуды и длительности импульса питания катода. Элементарный сгусток УЭ (рис. 2а) возникал на стадии запаздывания импульсного пробоя и имел длительность ~ 10 пс [2]. В экспериментах по радиальному пробую воздушной коаксиальной линии (рис. 2б) [3], УЭ инициировали быстрый разряд (1 на рис. 2в). В отсутствие УЭ скорость разряда падала (2 на рис. 2в). При длительности импульса напряжения <200 пс и амплитуде ≤ 90 кВ пробой не возникал совсем, так как УЭ не успевали ионизовать всю длину межэлектродного промежутка (~ 1 см).

Для изучения характеристик параксиальных сгустков УЭ, эмитируемых с острия конического катода в сильном продольном магнитном поле B_z , важным фактором является стабильность субнаносекундных импульсов [4]. Зависимость поперечной структуры сгустка от B_z представлена на рис.3а, при этом энергия электронов в пике тока достигала 200 кэВ. Типичные заряд и ток сгустка составляли 0.1 нКл и 5 А соответственно. При $B_z = 4.3$ Тл плотность тока, усредненная по центральной части сгустка была >0.65 кА/см² (рис. 3б). Пока это максимальное значение, достигнутое для потоков УЭ в воздушных промежутках.

Возможность плавной регулировки зазора обостряющего разрядника преобразователя позволила настраивать длительность фронта импульса (4 на рис. 1в) таким образом, что электрическое поле, критическое для убегания электронов [5], достигалось одновременно на всех концентрических графитовых катодах-усилителях поля (рис. 4а). В результате, в сильном однородном магнитном поле B_z , был сформирован поток УЭ в виде диска, состоящий из элементарных сгустков-струй (рис. 4в), с общим током до 50 А.

В магнитном поле, нарастающем вдоль траектории УЭ в 10–20 раз до 5 Тл, была получена компрессия пикосекундных трубчатых потоков УЭ с энергией ≈ 200 кэВ [6]. Интегральный ток УЭ ограничивался отражением частиц от места сгущения силовых линий - магнитного зеркала (рис. 5а). В области сильного поля достигалось (3–4)-х кратное радиальное сжатие трубчатого пучка и рост плотности тока до 100А/см² (рис. 5б).

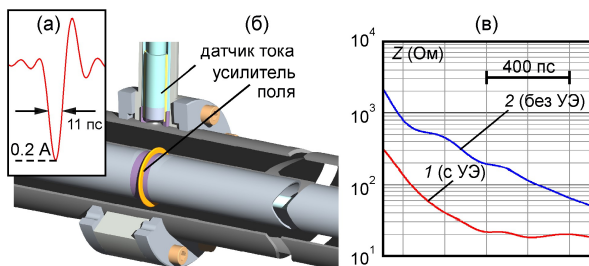


Рис. 2. Ток УЭ (а); воздушная линия с усилителем поля (б); сопротивление радиального промежутка (в).

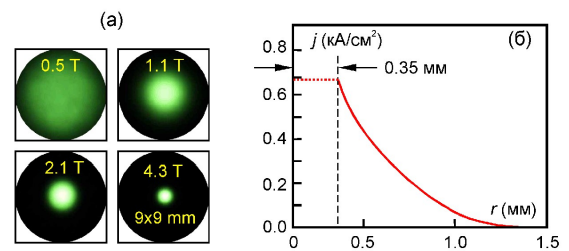


Рис. 3. Автографы сгустков УЭ в разных B_z . (а); распределение плотности тока УЭ при $B_z = 4.3$ Тл (б).

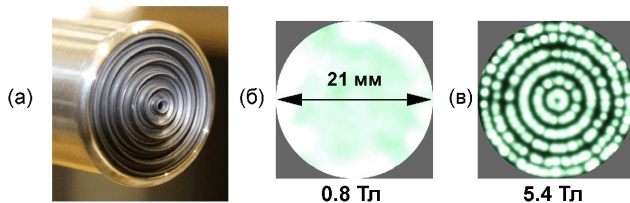


Рис. 4. Коаксиальный графитовый катод (а); автографы дисковых сгустков УЭ в разных B_z . (б, в).

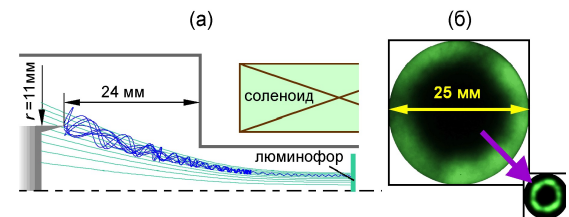


Рис. 5. Диод с нарастающим магнитным полем (а); автографы УЭ до и после сжатия (б).

3.2. Эмиссия коротких сильноточечных пучков

Сильноточные замагниченные пучки, формируемые при питании катода импульсами как 2 и 3 на рис. 1в, были использованы для генерации микроволнового сверхизлучения (СИ). При этом важны разброс энергии электронов пучка, параметры электромагнитных возмущений при его инжекции и зависимость тока от давления остаточного газа. Последнее особенно актуально при повышенной частоте повторения. В частности, ранее [7] была определена область давлений (ок. 3 Торр, рис. 6), в которой взрывоэмиссионный механизм появления электронов с энергией >100 кэВ менялся на убегание электронов в газе.

Для уменьшения фракции низкоэнергетических электронов на фронте пучка [8] был создан двухзазорный вакуумный диод с магнитной изоляцией. Оба зазора диода были запитаны через коаксиальные фидеры, имеющие общий электрод, находящийся под плавающим потенциалом (рис. 7а). При этом электроны эмитируются катодом на фронте импульса, задержанного внутренним фидером с диэлектриком, в области с гораздо меньшей вариацией напряжения. В результате, при ускорении электронов напряжением опережающей волны из внешнего фидера в наружном зазоре вариация их энергии на фронте снизилась с 40 до 15%. Это показано как в расчётах, так и при регистрации тока после фильтров (рис. 7б).

Использование вместо обостряющего разрядника гиромагнитной нелинейной линии с насыщенным ферритом и осциллографа с полосой 59 ГГц позволило проанализировать собственные шумы замагниченного сильноточного электронного пучка [9]. Несмотря на дискретность взрывной электронной эмиссии не было обнаружено модуляции тока на субнаносекундном фронте, то есть, электрический взрыв графитовых микроэмиттеров происходил за время, быстрее чем 15 пс. При дальнейшем обострении фронта пучка был зарегистрирован лидирующий широкополосный электромагнитный сигнал (рис. 8), который может использоваться для возбуждения генерации в черенковских СВЧ приборах.

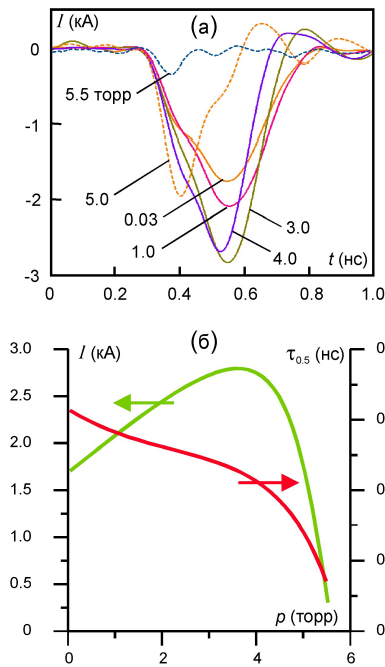


Рис. 6. Импульсы электронного тока на коллекторе при разных давлениях (а); амплитуда и длительность тока пучка в зависимости от давления (б).

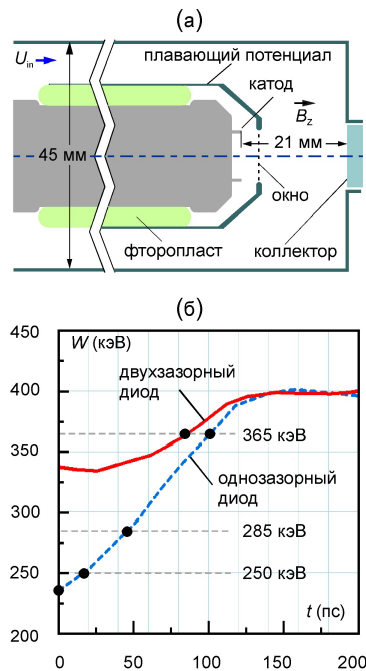


Рис. 7. Схема двухзазорного диода (а); энергии на фронте пучков в диодах с двумя и тремя электродами (б): расчёт (линии) и эксперимент (точки).

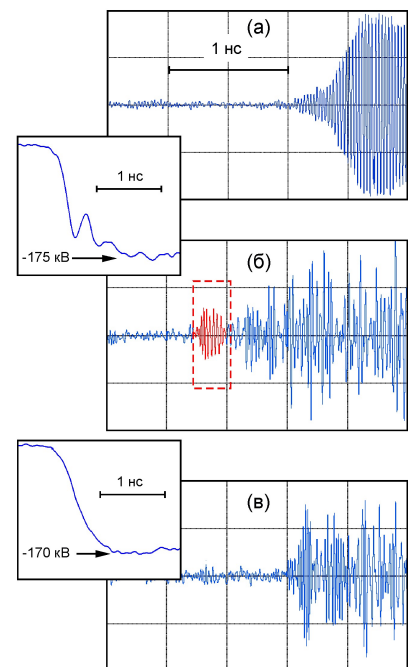


Рис. 8. Измерения ЭМ шумов фронта пучка с привязкой к радиоимпульсу СВЧ генерации (а) при обострённом (б) и плавном (в) фронте напряжения.

3.3. Генерация мощных СВЧ импульсов и их применение

Была исследована стабилизация фазы генерации субгигаваттной лампы обратной волны диапазона 38 ГГц в широком диапазоне перестройки преобразователя (1 и 3, рис. 1в). При скорости нарастания напряжения ≈ 2 МВ/нс (3), сигнал от фронта пучка [Ошибка! Залка не определена.] [9] задавал стабильную (< 0.5 рад) фазу сверхизлучения (СИ) [10], даже не смотря на заметный (до 15%) разброс амплитуды напряжения на катоде (рис. 9а). При этом возможна стабилизация фазы СВЧ-колебаний и при существенно меньших скоростях нарастания напряжения (1), однако для этого требуется еще более эффективное обострение фронта пучка. Была также получена фиксация фазы (рис. 9б), когда фронт ускоряющего импульса имел стабильный начальный участок роста (пунктир 1 на рис. 1в).

На базе сильнооточного пучка длительностью 2 нс и энергией частиц ≈ 270 кэВ от источника РАДАН-303 был реализован плазменный мазер [11] (рис. 10а). Спектральный диапазон генерации 3-25 ГГц определялся перестраиваемыми характеристиками плазмы (рис. 10б). Короткий импульс обеспечивал работу устройства в режиме однократного усиления шумов с энергоэффективностью $\approx 26\%$, средней мощностью СВЧ за импульс пучка > 100 МВт, мгновенной мощностью 430 ± 30 МВт и полной энергией излучения ≤ 0.85 Дж.

Численно и экспериментально было продемонстрировано высокоградиентное ускорение электронов гигаваттным субнаносекундным импульсом СИ диапазона 38 ГГц [12]. В объединённом блоке «генератор-ускоритель» (рис. 11а) использовались два коаксиальных электронных пучка. Импульс источника (2 на рис. 1в) подавался на общий катододержатель, при этом внешним пучком генерировался импульс СИ, который накачивал резонатор типа «pill-box», в котором ускорялся внутренний параксиальный пучок.

Регистрация коллектором электронных сгустков после фильтров-отсечек показала 5-кратное увеличение энергии отдельных фракций этого пучка с 250 кэВ до 1.25 МэВ и током в единицы миллиампер (рис. 11б). При этом средний градиент ускорения достигал 250 МэВ/м.

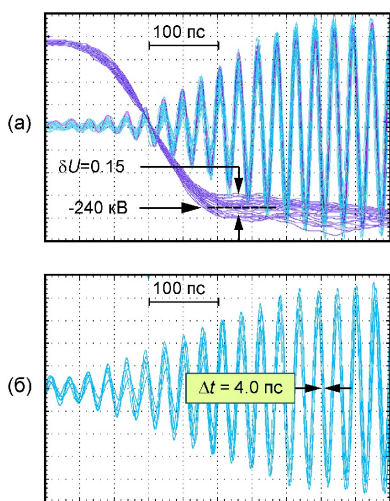


Рис. 9. Фиксация фазы СИ диапазона 38 ГГц при крутом фронте напряжения (2 МВ/нс) (а) и в случае скачка в начале медленно нарастающего фронта (б).

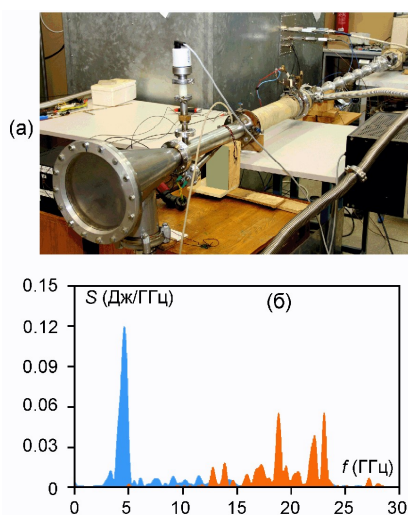


Рис. 10. Внешний вид плазменного мазера – усилителя шумов пучка (а); спектры излучения при перестройке плотности плазмы в 5 раз (б).

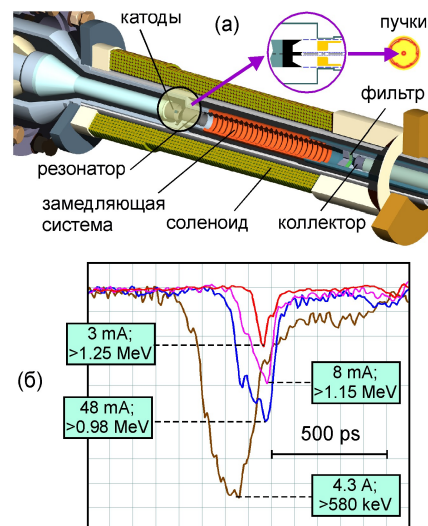


Рис. 11. Генераторно-ускорительный блок (а); ток параксиального пучка после прохождения фильтров с разной энергией отсеки (б).

4. Заключение

Представленные результаты исследований в пикосекундном диапазоне длительностей находятся на грани возможностей существующей измерительной аппаратуры, поэтому в экспериментах всегда контролировалась воспроизводимость исследуемых процессов путем достижения совпадения серий импульсов (рис. 1в). Из-за неизбежного статистического разброса напряжения пробоя неуправляемых газовых разрядников преобразователя (рис. 1б), применялся метод выборки и учитывались только те результаты, если высоковольтный импульс питания был близок к осциллограмме, полученной при усреднении большого количества включений.

5. Литература

- [1] Ф.Я. Загулов, А.С. Котов, В.Г. Шпак и др., РАДАН – малогабаритные сильноточные ускорители электронов импульсно-периодического действия, *ИТЭ*, № 2, 146, 1989.
- [2] G.A. Mesyats, M.I. Yalandin, N.M. Zubarev, et al., How short is the runaway electron flow in an air electrode gap?, *Appl. Phys. Lett.*, vol. **116**, 063501, 2020, doi: 10.1063/1.5143486
- [3] N.M. Zubarev, V.Yu. Kozhevnikov, A.V. Kozyrev, et al., Mechanism and dynamics of picosecond radial breakdown of a gas-filled coaxial line, *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. **29**, 125008, 2020, doi: 10.1088/1361-6595/abc414
- [4] G.A. Mesyats, E.A. Osipenko, K.A. Sharypov, et al., An ultra-short dense paraxial bunch of sub-relativistic runaway electrons, *IEEE Electron Device Lett.*, vol. **43**, 627, 2022, doi: 10.1109/LED.2022.3155173
- [5] L.N. Lobanov, G.A. Mesyats, E.A. Osipenko, et al., Disk-shaped bunch of runaway electrons formed in a magnetized air diode, *IEEE Electron Device Lett.*, vol. **44**, 1748, 2023, doi: 10.1109/LED.2023.3301867
- [6] М.А. Гашков, Н.М. Зубарев, О.В. Зубарева и др., Компрессия потока убегающих электронов в воздушном зазоре с неоднородным магнитным полем, *Письма в ЖЭТФ*, том **113**(6), 370, 2021, doi: 10.31857/S1234567821060033
- [7] K.A. Sharypov, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, and N.M. Zubarev, Reflectometry of Picosecond Emission and Discharge Processes in a Gas-Filled High-Voltage Coaxial Line, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **49**, 2516, 2021, doi: 10.1109/TPS.2021.3081123
- [8] L.N. Lobanov, A.G. Sadykova, K.A. Sharypov, et al., A magnetically insulated coaxial vacuum diode providing a reduced energy spread in the leading edge of a high-current electron beam, *Phys. Plasmas*, vol. **30**, 093101, 2023, doi: 10.1063/5.0161097
- [9] S.A. Shunailov, G.A. Mesyats, I.V. Romanchenko, et al., Electromagnetic noise of a nanosecond magnetized high-current electron beam, *J. Appl. Phys.*, vol. **126**, 164504, 2019, doi: 10.1063/1.5123414
- [10] K.A. Sharypov, V.V. Rostov, A.G. Sadykova, et al., A phase-stabilized superradiant Ka-band oscillator driven by nanosecond voltage pulses with amplitude variations and reduced rise rates, *Appl. Phys. Lett.*, vol. **113**, 223502, 2018 doi: 10.1063/1.5055596
- [11] A.B. Buleyko, A.V. Ponomarev, O.T. Loza, et al., Experimental Plasma Maser as a Broadband Noise Amplifier. 2: Short Pulse, *Phys. Plasmas*, vol. **28**, 023304, 2021, doi: 10.1063/5.0031432
- [12] N.S. Ginzburg, A.E. Fedotov, S.V. Kuzikov, et al., Demonstration of High-gradient Electron Acceleration Driven by Subnanosecond Pulses of Ka-band Superradiance, *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. **26**, 060401, 2023, doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.26.060401