

## Системы и технологии на основе нелинейных передающих линий с ферритом (обзор)

© П.В. Припутнев, И.В. Романченко, В.В. Ростов

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия  
e-mail: priputnev Pavel@gmail.com

Поступило в Редакцию 12 октября 2022 г.  
В окончательной редакции 14 марта 2023 г.  
Принято к публикации 16 марта 2023 г.

Нелинейные передающие линии с ферритом активно развиваются и изучаются уже около двух десятков лет. При этом первые работы по этой тематике датируются еще серединой прошлого века. Нелинейные передающие линии с ферритом находят свое применение в различных задачах электрофизики, при этом наибольшее применение нашли в задачах обострения фронта высоковольтного импульса как линии задержки и генераторы мощных импульсов СВЧ излучения. Приведены основные научно-технические результаты развития технологий нелинейных передающих линий с ферритом в хронологическом порядке, начиная с линий для обострения фронтов импульсов напряжения, заканчивая многоканальными СВЧ источниками на их основе.

**Ключевые слова:** мощная СВЧ электроника, ферромагнитные материалы, импульсная техника, ударные электромагнитные волны.

DOI: 10.21883/JTF.2023.05.55453.230-22

### Введение

Активное изучение физических процессов в нелинейных передающих линиях (НПЛ) и развитие устройств на их основе насчитывает уже несколько десятков лет. Основной интерес связан с тем, что НПЛ представляют собой полностью твердотельные устройства и могут быть использованы для решения различных задач радиофизики и электрофизики. НПЛ называются два типа устройств: передающие линии с распределенными параметрами, заполненные нелинейными диэлектриками или магнетиками, свойства которых зависят от электромагнитных полей в линии [1–3]; линии с сосредоточенными параметрами, обладающими элементами в виде нелинейных емкостей или индуктивностей [4–7], значения которых зависят от напряжения или тока, а также в качестве нелинейных элементов НПЛ могут в себя включать полупроводниковые диоды [8,9].

Сегодня наиболее распространенной областью применения нелинейных передающих линий являются задачи обострения фронтов высоковольтных импульсов и генерация высокочастотных импульсов большой мощности. Развитие мощной СВЧ электроники (high power microwaves) насчитывает уже более пятидесяти лет. Однако в последние несколько десятков лет темп развития СВЧ устройств немного замедлился, устройства мощной СВЧ электроники активно модернизируются и их параметры непрерывно улучшаются. На сегодняшний день их мощностные характеристики достигают уровня единиц GW [10]. В международной литературе к устройствам мощной СВЧ электроники относят приборы со значениями мощности, превышающими 100 MW, охватывающие

сантиметровый и миллиметровый диапазоны длин волн. Данные устройства насчитывают целый ряд практических применений в задачах электромагнитной совместимости, в средствах электромагнитного противодействия, в радарах, в космических технологиях для передачи энергии и движения летательных аппаратов, для нагрева плазмы, ускорения заряженных частиц, биофизических исследованиях и т.д. [10].

Среди СВЧ генераторов гигаваттного уровня мощности следует выделить вакуумные электронные генераторы с энергией в импульсе порядка 100 J. Такими приборами являются релятивистская лампа обратной волны, многоволновый черенковский генератор, генератор дифракционного излучения, релятивистские магнетрон и клистрон, магнитоизолированный линейный осциллятор (MLO), лазер на свободных электронах и мазер на циклотронном резонансе. Генераторами с энергетикой в десятки джоулей являются лампа бегущей волны, лампа обратной волны, виркатор. Все перечисленные устройства используют электронные потоки для генерации импульсов СВЧ излучения. Энергетический КПД всех этих генераторов находится в интервале 10–60%, однако в этих оценках не учитываются полные энергетические затраты на генерацию, транспортировку электронного пучка, а также на излучение. С учетом всех энергозатрат энергетический КПД конечных источников СВЧ импульсов по сегодняшним оценкам обычно не превышает 10% [11,12], достигая в исключительных случаях 20–30% [13,14]. В ряде лабораторных образцов КПД составляет доли или единицы процентов. Максимальная мощность СВЧ излучения в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн, которая получена

или может быть получена в ближайшем будущем в лабораторных условиях, составляет величину порядка гигаватта для случая высокой частоты повторения импульсов (до 200 Hz) и несколько GW в режиме редко повторяющихся импульсов.

К отдельному классу относятся нелинейные передающие линии. Их основными отличиями перед традиционными приборами с электронными потоками являются отсутствие требований к высокому вакууму, который требуется для транспортировки электронного пучка, отсутствие сопутствующего тормозного рентгеновского излучения, для работы генераторов не требуется сильное магнитное поле, увеличенный ресурс приборов в силу отсутствия катодов для формирования электронных потоков.

НПЛ, использующие нелинейные диэлектрики и нелинейные емкости, основаны на эффекте генерации солитоноподобных волн в передающей линии за счет эффекта, при котором основание импульса напряжения движется со скоростью, меньшей, чем вершина этого импульса, что позволяет ей „догнать“ его основание, что приводит к сокращению длительности фронта этого импульса. Это обуславливается уменьшением диэлектрической проницаемости элементов в линии с ростом амплитуды напряжения. Линии с диэлектрической нелинейностью, как правило, используются как настольные генераторы радиоимпульсов с частотой в единицы или десятки МГц с пиковой мощностью от единиц Ватт, существуют лабораторные образцы, мощность которых достигает десятка MW. НПЛ на основе полупроводниковых диодов [8,9] на сегодняшний день являются скорее демонстрационными образцами возможности генерации в них СВЧ импульсов и являются перспективными при синхронном развитии вместе с полупроводниковыми технологиями. Для использования диодов в НПЛ с целью возбуждения мощных колебаний требуется существенное уменьшение их остаточного сопротивления после коммутации. Сегодня по своим параметрам НПЛ с нелинейными емкостями и полупроводниковыми диодами не могут относиться к устройствам мощной СВЧ электроники. Тем самым большинство технологий, использующие нелинейные емкости и полупроводниковые диоды, являются скорее лишь демонстрационными лабораторными образцами.

Хороший результат в генерации мощных СВЧ импульсов показал генератор на основе периодического расположения газовых разрядников в разрыве внутреннего проводника коаксиальной передающей линии [15]. Передающая линия размерами  $100 \times 59$  mm состояла из 2–12 газоразрядных промежутков, которые находились под давлением от 1 до 20 atm. Передающая линия обладала импедансом приблизительно  $32 \Omega$ . Рабочее напряжение составляло 50–250 kV. В работе была продемонстрирована возможность генерации наносекундных радиоимпульсов с центральной частотой 0.8–1.15 GHz с пиковой мощностью в несколько сотен MW. К сожалению, данная концепция не получила дальнейшего

развития из-за сложности конструкции линии и малой изученности наносекундного импульсного пробоя при подобных условиях

Наиболее перспективными для задач генерации мощного СВЧ излучения на сегодняшний день являются НПЛ с ферритом. Кроме того, на основе НПЛ с ферритом были получены рекордные значения по обострению фронта высоковольтного импульса до десятков пикосекунд со скоростью нарастания напряжения в единицы МВ/ns. Что касается генерации радиоимпульсов в НПЛ с ферритовым заполнением, то их параметры сегодня близки к параметрам релятивистских устройств СВЧ электроники высоких мощностей в диапазоне дециметровых длин волн. Пиковые мощности генераторов достигают 700 MW [3]. На сегодняшний день показана возможность генерации радиоимпульсов в частотном диапазоне от сотен МГц до 20 GHz [16]. При этом подобные генераторы могут значительно уменьшать значения выходной мощности без изменения частоты генерации, а также позволяют легко изменять центральную частоту генерации на величину до 100% от минимальной частоты за счет изменения внешнего магнитного поля, необходимого для насыщения ферритового заполнения передающей линии. Следует также отметить, что развитие технологий НПЛ с ферритом способствует улучшению параметров приборов, использующих электронный пучок для генерации мощного СВЧ излучения. Поскольку для работы релятивистских приборов требуется формирование импульсов напряжения с короткими фронтами (в единицы наносекунд или сотни пикосекунд) с возможностью контроля времени их распространения, использование с ними НПЛ с ферритом позволяет решать эти задачи. На сегодняшний день разработан уже целый ряд технических решений на основе НПЛ с ферритом, которые могут быть использованы в других системах или в качестве источников мощных СВЧ импульсов, в некоторых случаях сравнимых по параметрам с релятивистскими приборами, а также находят применение в прикладных исследованиях.

В настоящей работе проведен обзор технологий, созданных на основе нелинейных передающих линий с ферритовым заполнением. Обзор включает в себя три части: теоретические основы нелинейных передающих линий с ферритом, обострение фронта высоковольтного импульса в НПЛ с ферритом, генераторы и источники СВЧ импульсов на основе НПЛ с насыщенным ферритом.

## 1. Теоретические основы нелинейных передающих линий с ферритом

Нелинейная передающая линия с ферритом представляет собой отрезок передающей линии, как правило, не превышающей 1 m, между проводниками которой располагается феррит. Как правило, феррит заполняет не все поперечное сечение линии. Линии с ферритом работают при высоких напряжениях (начиная с десятков kV)

и, как следствие, коаксиальные геометрии передающих линий являются более распространенными, поскольку обладают повышенной электрической прочностью.

Первые работы, в которых изучалось распространение электромагнитных волн в нелинейных линиях, датируются концом 50-х гг. XX в. сразу же после создания первых магнитных материалов с нелинейными магнитными свойствами — ферритов. Волны, наблюдаемые в этих экспериментах, были названы ударными электромагнитными волнами (УЭМВ) [17]. Название ударных в данном случае не связано с переносом и компрессией среды как таковой, оно в первую очередь вызвано схожестью математического описания с описанием процесса образования ударных волн в газах. Изменение поля волны на некотором движущемся интервале описывается уравнениями порядок которых выше, чем у уравнений, которые описывают поле вне этого интервала.

Вскоре, в 60-х гг., в серии работ была сформулирована теоретическая модель описания УЭМВ [17–20]. В рамках модели было установлено, что при распространение электромагнитных волн в среде без дисперсии существуют условия для образования разрывов векторов поля. Учет дисперсионных и диссипативных свойств среды в области высоких частот приводит к устранению разрывов в решениях для УЭМВ, что означает установление конечной ширины (длительности) ударного фронта. Сегодня в литературе под ударным фронтом понимается фронт высоковольтного импульса, получивший конечную длительность в результате распространения в линии с ферритом (или другой нелинейностью) после установления переходных процессов.

При образовании УЭМВ за ее фронтом не наблюдаются высокочастотные осцилляции. Это связано с тем, что для возбуждения колебаний при распространении фронта УЭМВ в линии передачи необходимо наличие дисперсии, связанной с обратимыми процессами. За образование ударного фронта отвечает дисперсия, связанная с необратимым диссипативным процессом — перемагничиванием. Как следствие, для возбуждения колебаний в линии требуется наличие временной или пространственной дисперсии. За наличие пространственной дисперсии в НПЛ может отвечать добавление негальванической связи между различными участками передающей линии. Появление временной дисперсии в линии с ферритом связано с эффектом импульсного перемагничивания предвременно насыщенного внешним магнитным полем феррита.

Физически импульсное перемагничивание феррита представляет собой следующий процесс. Изначально ненасыщенный феррит для его насыщения помещается во внешнее магнитное поле, коллинеарное направлению распространения волны в линии передачи. Поскольку величина магнитного поля, требуемая для импульсного перемагничивания феррита, велика, то в этом случае можно описывать магнетик в „макроспиновом“ приближении, когда допустимо ввести вектор намагниченности как сумму всех магнитных моментов, усредненную по

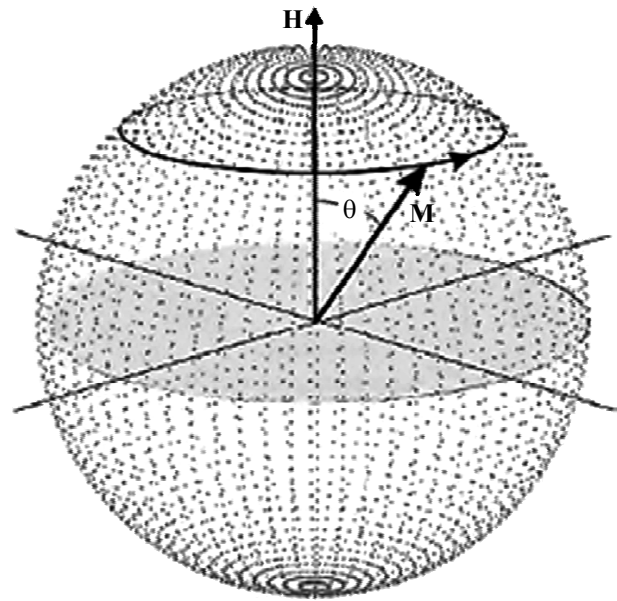


Рис. 1. Траектория движения вектора намагниченности  $\mathbf{M}$  при импульсном перемагничивании.

объему магнетика [21]. Важным фактором здесь является характерное время нарастания магнитного поля перемагничивающего феррит. Если это время заметно меньше характерного времени релаксации ферромагнетика, то, поскольку модуль вектора намагниченности уже не может измениться из-за насыщения материала, вектор намагниченности  $\mathbf{M}$  отклоняется на угол  $\theta$  от суммарного вектора напряженности магнитного поля  $\mathbf{H}$ . После чего он начинает движение по поверхности сферы вокруг направления результирующего вектора напряженности магнитного поля (рис. 1).

Математически динамика вектора намагниченности в данной модели описывается уравнением Ландау–Лифшица [21,22]:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mu_0 [\mathbf{M} \times \mathbf{H}] - \frac{\alpha \gamma \mu_0}{M_s} [\mathbf{M} \times [\mathbf{M} \times \mathbf{H}]]. \quad (1)$$

Здесь  $\mu_0$  — магнитная постоянная,  $\gamma$  — гиромагнитное отношение для электрона,  $\alpha$  — феноменологический коэффициент затухания,  $M_s$  — намагниченность насыщения. Первое слагаемое описывает гиромагнитную прецессию, второе слагаемое отвечает за магнитные потери в ферромагнетике и определяется феноменологическим коэффициентом затухания. Наличие данного эквивалента силы трения приводит к тому, что вектор намагниченности в конечном счете устремится к направлению результирующего магнитного поля. Решением уравнения Ландау–Лифшица в таких условиях является траектория в виде спирали на поверхности сферы. Благодаря данной физике работы генераторов в современной литературе НПЛ с насыщенным ферритом получили название гиромагнитные НПЛ (ГНПЛ).

## 2. Обострение фронта высоковольтного импульса в НПЛ с ферритом

### 2.1. Развитие технологии обострения высоковольтных импульсов в передающих линиях с ферритом

Исторически изучение передающих линий с ферритом началось с линий, в которых использовался ненасыщенный феррит. Такие НПЛ нашли широкое применение в импульсной технике для задач обострения фронта высоковольтных импульсов наряду с обостряющими разрядниками высокого давления [23–27]. Первой работой, показавшей эффективность НПЛ с ферритом для обострения фронта высоковольтного импульса, стала работа Вейнера 1981 г. [24]. В ней с использованием ферритовой линии длиной, достигавшей 120 см без внешнего магнитного поля и при использовании внешнего поля, была показана возможность уменьшения времени нарастания высоковольтного импульса амплитудой до 10 kV с 30 до 2 ns. Затем в ряде экспериментальных и теоретических исследований была продемонстрирована возможность обострения фронта импульса напряжения до значений в единицы наносекунд со скоростью нарастания напряжения 100 kV/ns. Затем в работе Седдона [28] была продемонстрирована возможность обострения фронта импульса напряжения амплитудой 25 kV в НПЛ импедансом 75  $\Omega$  с 20 до 2 ns. Линия представляла собой коаксиальную передающую линию, заполненную ферритом, находящимся в поле внешнего соленоида, потребляющего ток до 1.5 А. При этом в работе была продемонстрирована возможность параллельной работы шести обостряющих НПЛ с возможностью контроля времени распространения сигнала до 15 ns. Также в девяностые годы была продемонстрирована возможность обострения фронта до субнаносекундных значений, и были получены значения фронта в 100 ps [29].

Развитие данной технологии привело к тому, что коллектив авторов из Института сильноточной электроники (ИСЭ) СО РАН получил субнаносекундные значения фронтов со скоростью нарастания напряжения до 500 kV/ns при амплитуде импульса напряжения до 360 kV [30]. Обострение высоковольтных импульсов без использования предварительного подмагничивания ферритового заполнения передающей линии происходит за счет диссипативных процессов, протекающих при импульсном перемагничивании феррита. В результате на выходе НПЛ наблюдается импульс с уменьшенной длительностью фронта по отношению к падающему импульсу, а в результате диссипации энергии при перемагничивании длительность высоковольтного импульса сокращается на десятки процентов. Для увеличения скорости нарастания импульса напряжения в линии с ферритом необходимо использование внешнего магнитного поля для предварительного насыщения магнитного материала. При предварительном насыщении феррита скорость распространения сигнала зависит от его

амплитуды, таким образом, вершина высоковольтного импульса распространяется быстрее его основания, что приводит к уменьшению длительности фронта на выходе линии. Дисперсия и диссипация в линии с нелинейным заполнением препятствуют уменьшению длительности фронта ниже определенного значения. При этом не происходит значительного уменьшения длительности высоковольтного импульса. Первые исследования по обострению фронта в линиях с насыщенным ферритом проводились коллективами из Великобритании в 90-х гг. [31,32]. Экспериментально было обнаружено, что использование изначально подмагниченного ферритового заполнения позволяет значительно сократить длительность фронта высоковольтного импульса. В этих работах была достигнута рекордная для того времени скорость нарастания фронта до 1 MV/ns.

### 2.2. Перспективы развития технологии обострения высоковольтных импульсов в передающих линиях с ферритом

Технология обострения высоковольтных импульсов в НПЛ с ферритом сегодня позволяет обострять фронты длительностью в десятки наносекунд амплитудой от десяти до сотен киловольт до субнаносекундных значений. Сегодня получены значения фронта длительностью менее 100 ps при амплитуде напряжения 200 kV. НПЛ без предварительного подмагничивания феррита позволяют сократить длительность фронта с единиц наносекунд до субнаносекундных значений. Использование дополнительного внешнего подмагничивания феррита позволяет сократить длительность фронта в одной и той же конфигурации НПЛ в среднем в 2 раза.

Сегодня видится перспективной технология обострения фронтов высоковольтных импульсов с использованием спиральных передающих линий с ферритовым заполнением [33]. В подобных передающих линиях феррит находится внутри спирального внутреннего проводника. Основным преимуществом такого способа обострения фронта высоковольтного импульса является отсутствие необходимости во внешнем продольном магнитном поле, поскольку в данном случае феррит насыщается в продольном магнитном поле, создаваемом внутри спирального проводника линии. Как следствие, повышается электрическая прочность линии. К недостаткам такого подхода можно отнести трудность в согласовании спиральной передающей линии с ферритом с другими элементами высоковольтного тракта. Сегодня продемонстрирована возможность уменьшения длительности наносекундного фронта импульса амплитудой 150 kV до субнаносекундных значений [33], а также обострения наносекундного фронта импульса амплитудой до 400 kV [34] с использованием спиральных линий с ферритом.

Интерес к обострению высоковольтных импульсов остается и до сих пор [35,36]. Технология обострения фронта в НПЛ с ферритом позволяет создавать

компрессоры энергии высоковольтных импульсов, что дает возможность получать рекордные скорости нарастания напряжения и мощности на нагрузке. Работы по компрессорам энергии импульсов напряжения активно ведутся коллективом Института электрофизики (ИЭФ) УрО РАН из Екатеринбурга. Первой значимой работой по компрессорам является работа [37], в которой представлен полностью твердотельный генератор импульсов, состоящий из генератора S-500 [38], коммутатора на основе SOS-диода и трехступенчатой системы компрессии на ферритовых линиях. В работе были получены импульсы напряжения амплитудой 860 kV с максимальной скоростью нарастания напряжения 10 MV/ns и фронтом 100 ps. Пиковая мощность генератора составляла 15 GW. Продолжением работы [37] стала работа [39], в которой также представлена полностью твердотельная система с пиковой мощностью 30 GW. Система представляла собой каскад из генератора S-500 и двух линий компрессии с ферритом, в которых изначальный высоковольтный импульс длительностью 7 ns на нагрузке 40  $\Omega$  сжимался до 0.65 ns с увеличением напряжения с 500 kV до 1.1 MV, а пиковая мощность импульса увеличивалась с 6 до 30 GW. В результате была получена скорость нарастания напряжения 3 MV/ns, при этом скорость роста мощности составила 100 GV/ns. Рекордная амплитуда высоковольтного импульса с использованием компрессоров на ферритах была получена в работе [40] и составила 1.62 MV, при этом мощность импульса составляла 54 GW на нагрузке 48  $\Omega$ .

### 3. Генераторы и источники СВЧ импульсов на основе НПЛ с насыщенным ферритом

#### 3.1. Развитие технологии генерации высокочастотных импульсов с использованием НПЛ с ферритом

Первые попытки получения высокочастотных импульсов, используя передающие линии с ферритом, датируются серединой прошлого столетия. Одной из первых работ является работа Фрейдмана 1960 г. [41]. В то же время в 1959 г. в США было предложено использовать малый ферритовый образец в качестве когерентного осциллятора [42,43]. Для этого феррит должен был находиться в сильном магнитном поле, которое создавалось импульсно. Ферритовый образец располагался в торце прямоугольного волновода. В этом эксперименте была продемонстрирована генерация СВЧ импульсов длительностью порядка 1 ns на частотах 7–9 GHz. Мощность такого генератора не превышала 100 V. Развитие идеи, предложенной в [42], получило в работе Паунда [44]. Однако дальнейшего развития идеи не последовало, по-видимому, из-за малости системы и, как следствие, используемых ферритовых образцов, что не позволяло увеличивать мощность генератора.

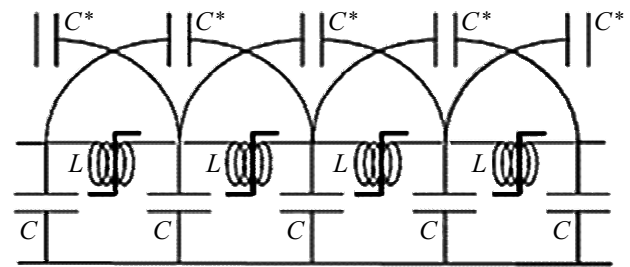
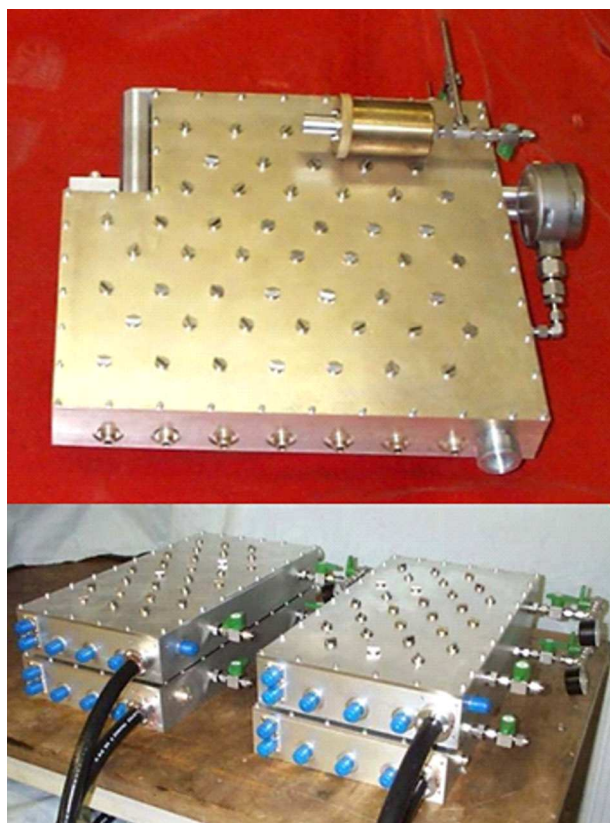


Рис. 2. Схема замещения линии с пространственной дисперсией за счет емкостных перекрестных связей.

Развитие методов генерации высокочастотных импульсов в НПЛ с ферритом после работы Паунда продолжилось спустя почти 40 лет с цикла теоретических работ группы из Нижнего Новгорода, базирующихся на теории УЭМВ. Базируясь на этой теории, была показана эффективная генерация наносекундных радиоимпульсов ударным фронтом при его распространении в линии с пространственной дисперсией [6]. Схема замещения линии с пространственной дисперсией представлена на рис. 2. Пространственная дисперсия в передающей линии достигается за счет добавления перекрестных емкостных связей звеньев линии и определяется параметром отношения емкости перекрестной связи к емкости звена в линии  $C^*/C_0$ . Возбуждение колебаний наблюдается при синхронизме между ударным фронтом, распространяющимся в передающей линии и возбуждаемой им волной. Это означает, что скорость ударного фронта должна быть равной фазовой скорости волны, возбуждаемой на определенной частоте  $v_{sh} = v_{ph}(f)$ , при этом для эффективной генерации требуется чтобы групповая скорость этой волны на данной частоте была меньше скорости ударного фронта  $v_{sh} > v_g(f)$ , что обеспечивает эффективный отток энергии от ударного фронта и приводит к формированию за ним протяженного цуга колебаний. В работах экспериментально и в численном моделировании была продемонстрирована возможность получения большого числа колебаний в цуге. Длительность радиоимпульса и его частота были ограничены высокочастотными потерями в НПЛ.

Последовавший за данной работой ряд теоретических работ [45–49] был направлен на повышение эффективности генерации радиоимпульсов, а также расширению частотного диапазона генераторов. Результатом всех этих работ стало создание экспериментального макета источника радиоимпульсов группой из Великобритании под руководством Седдона [7,50]. Разработанный генератор работал при амплитуде импульса напряжения 30–50 kV с частотой следования импульсов до 1.5 kHz и представлял собой последовательность из 40 LC-звеньев с перекрестной емкостной связью. Центральная частота колебаний генератора находится в интервале от 200 MHz до 2 GHz и определяется подбором параметров линии, а именно емкостей и индуктивностей звеньев. Интервал перестройки частоты линии с конкретными па-

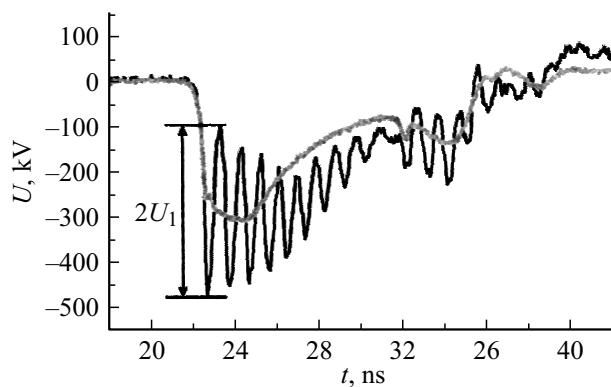


**Рис. 3.** Внешний вид НПЛ с пространственной дисперсией на 1 GHz и системы из четырех линий с контролируемой фазой из работ [7,46].

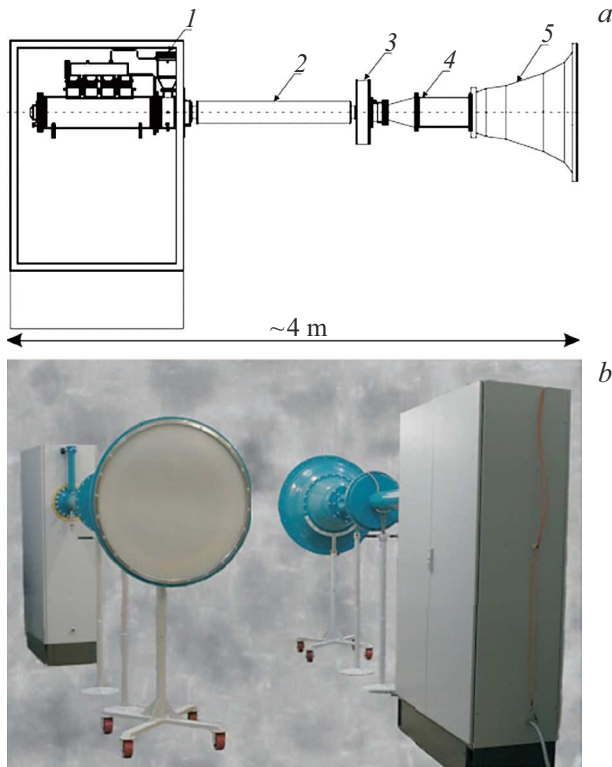
раметрами составлял  $\pm 20\%$  при изменении синхронизма в линии. Скорость ударного фронта и, как следствие, синхронизм с возбуждаемой волной в НПЛ контролировались за счет изменения начальной намагниченности ферритового заполнения нелинейных индуктивностей линии. Максимальная мощность генератора составляла 20 MW. Длительность импульса могла изменяться от нескольких периодов колебаний до пятидесяти, что позволяло получать ширину спектра от 2.5 до 40%. Также в работе была показана возможность фазирования и сложения мощности от четырех подобных генераторов. Внешний вид генератора и многоканальной системы представлены на рис. 3. Большую роль в возможности реализации проекта сыграло численное моделирование. Позже группой из США был разработан еще один генератор, основанный на линии с перекрестными связями [51]. В данной работе представлен генератор, состоящий из 200 LC-звеньев, с мощностью в сотни киловатт и центральной частотой генерации в сотни МГц.

Следующим шагом в развитии генераторов высокочастотных импульсов на основе НПЛ с насыщенным ферритом стала работа коллектива из Института сильноточной электроники СО РАН [52]. Работа Седдона [7] и работа коллектива из ИСЭ СО РАН [52] стали отправной точкой в развитии технологий НПЛ с ферритом и в

дальнейшем привлекло к этой тематике новые исследовательские группы. В ней продемонстрирован способ возбуждения высокочастотных колебаний при распространении высоковольтного импульса напряжения в коаксиальной передающей линии с ферритовым заполнением, предварительно насыщенным магнитным полем, создаваемым внешним соленоидом. Передающая линия представляла собой линию с временной дисперсией. Временная дисперсия обусловлена процессом импульсного перемагничивания феррита, который был описан выше. Центральная частота возбуждаемых колебаний находилась в интервале от 600 MHz до 1.1 GHz с шириной спектра по уровню 3 dB около 15%. Длина линии составляла 1 м. На рис. 4 показана типичная осциллограмма импульса напряжения на выходе НПЛ с насыщенным ферритом из этой работы. Как и во всех подобных работах, она представляет собой видеоимпульс, промодулированный высокочастотными колебаниями, частота которых незначительно увеличивается к концу импульса. Перестройка частоты осуществлялась изменением поля подмагничивания феррита, с оптимальным значением поля, находящимся в интервале 20–40 kA/m. В ходе работы было показано, что при увеличении поля подмагничивания феррита Hz частота генерации в линии уменьшается на нескольких сотен МГц. Этот эффект используется в генераторах на основе ГНПЛ для перестройки частоты генерации. При этом с ростом протекающего по линии тока, т.е. с ростом азимутального поля  $H_\theta$  происходит рост частоты генерации при постоянном поле  $H_z$ . Пиковая мощность генератора достигала 700 MW с максимальным энергетическим КПД преобразования энергии видеоимпульса в радиоимпульс около 10%. Логическим продолжением данной работы было создание источника СВЧ излучения на основе ГНПЛ [53]. Внешний вид источника представлен на рис. 5. Источник состоял из высоковольтного генератора SINUS-200, ГНПЛ, полосового фильтра для разделения низкочастотной и высокочастотной составляющих импульса напряжения, модового конвертора и рупорной антенны. ГНПЛ была заполнена вакуумным маслом для повышения ее электрической прочности. Вакуумное



**Рис. 4.** Типичная осциллограмма импульса напряжения на выходе НПЛ с насыщенным ферритом из работы [52].



**Рис. 5.** Внешний вид источника СВЧ импульсов на основе НПЛ с насыщенным ферритом из работы [53]: *a* — схема источника: высоковольтный генератор SINUS-200 (1), ГНПЛ (2), полосовой фильтр (3), модовый конвертор (4) и рупорная антенна (5); *b* — фото источника.

масло было выбрано по причине того, что оно обладает значительно меньшими высокочастотными потерями по сравнению с трансформаторным маслом. В нелинейной передающей линии генерировался СВЧ импульс длительностью 5 ns, после чего излучался и измерялся. Эффективный потенциал источника составил  $\sim 560$  kV с центральной частотой 1.2 GHz при ширине спектра 0.4 GHz по уровню 10 dB. Источник мог работать с частотой следования импульсов до 200 Hz. Анализируя спектр излученного импульса и руководствуясь современными классификациями, излученный импульс можно отнести к классу широкополосных импульсов.

Важным шагом в понимании и определении путей совершенствования технологии линий с ферритом, продемонстрировав пределы возможных оптимальных решений, стала работа [3]. В ней разработана модель на основе телеграфных уравнений и уравнения Ландау–Лифшица (1) без учета затухания, и было рассмотрено ее решение в виде бегущей электромагнитной волны. Результаты, получаемые с использованием модели, хорошо согласовываются с тенденциями, наблюдаемыми в экспериментах как работ [52,53], так и работ других групп исследователей. В простой модели был показан линейный рост центральной частоты колебаний с увеличением протекающего по линии тока, показан опти-

мум зависимости амплитуды возбуждаемых колебаний от внешнего магнитного поля. Важным выводом из модели также является то, что максимальное значение высокочастотной мощности, усредненной за период, не превышает 25% от мощности падающего импульса.

Практически в то же время генераторы на основе ГНПЛ привлекли внимание исследователей из Великобритании и США. В 2011 г. учеными из Великобритании совместно с Рукиным из Института электрофизики (ИЭФ) УрО РАН был создан макет полностью твердотельного генератора, включая генератор наносекундных импульсов напряжения на SOS-диодах, формирующего видеоимпульсы длительностью до 10 ns напряжением до 100 kV [54]. Максимальная пиковая мощность разработанного СВЧ генератора составила 90 MW при рабочем напряжении 80 kV. Центральная частота высокочастотных импульсов находилась в интервале от 750 MHz до 1 GHz. Частота следования импульсов могла достигать 2 kHz.

В период с 2010 по 2013 гг. последовал цикл работ от группы исследователей из Техаса, США [55–58]. Первой их работой стало исследование возможности замены соленоида, использующегося для насыщения феррита на сборку из постоянных магнитов [55]. Подход, описанный в статье, плохо себя зарекомендовал, показав малую мощность генерации и очень короткий высокочастотный импульс длительностью менее 2 ns. После этого новых публикаций с использованием постоянных магнитов от этой группы не последовало. Затем группа из Техаса пошла по пути компактных линий с волновым сопротивлением  $50 \Omega$ , работающих от импульсов напряжения амплитудой в десятки kV [56]. ГНПЛ генератора в диаметре не превышала 10 mm, и ее длина составляла приблизительно 50 cm. Максимальная пиковая мощность, полученная в экспериментах, составляла около 9 MW при амплитуде импульса напряжения 50 kV. В экспериментах [56] были получены СВЧ импульсы с центральной частотой в интервале от 2.7 до 5 GHz с максимальной длительностью импульса, не превышающей 3 ns. Следует заметить, что высокие частоты генерации (2 GHz и более) связаны с малыми поперечными размерами нелинейной передающей линии. В другой работе коллективом рассматривались различные типы ферритов, применяемые для генерации высокочастотных импульсов с целью увеличения эффективности генераторов [57]. В ГНПЛ обычно используются магнитомягкие ферриты, заметно реже гранатовые ферриты, поскольку они обладают высокой начальной магнитной проницаемостью, малой коэрцитивной силой, большим внутренним сопротивлением и низкими потерями на перемагничивание. В работе было показано влияние полосы ферромагнитного резонанса на генерацию в НПЛ с ферритом. Наилучшие результаты показали ферриты, специально разработанные для задач генерации высокочастотных колебаний. По результатам данной работы можно сделать вывод, что для разработки генераторов на основе НПЛ с ферритом следует уделять дополнительное внимание к разработке магнитных материалов

с целью улучшения их параметров. Отдельно следует выделить генератор, разработанный этой же группой, который представляет из себя полосковую нелинейную передающую линию с волновым сопротивлением  $50 \Omega$ , использующую YIG-ферриты [58]. Генератор обладает центральной частотой 1 GHz с длительностью импульса до 5 ns, ширина спектра составляет 40%, пиковая СВЧ мощность находится в интервале 2–13 MW. В дальнейшем новых публикаций по полосковой геометрии не последовало.

Другая группа из США реализовала генератор с пространственной дисперсией в коаксиальной передающей линии [59,60]. Результатом стал генератор, в котором феррит насыщается полем внешнего соленоида. Феррит располагался внутри гофрированного внутреннего проводника коаксиальной линии передачи, тем самым НПЛ представляла собой 60 LC-звеньев волновым сопротивлением  $50 \Omega$  с емкостной связью между соседними звеньями линии. Была продемонстрирована возможность генерации радиоимпульсов длительностью от 4 до 17 ns в зависимости от центральной частоты колебаний в импульсе. Более высокой частоте соответствовал более длинный импульс высокочастотных колебаний. Центральная частота изменялась полем подмагничивания в интервале от 0.95 до 1.45 GHz. Пиковая мощность составляла значения более 100 MW, а максимальная энергия СВЧ импульса 170 mJ.

В последние годы в Институте электрофизики УрО РАН активно развиваются методы генерации высокочастотных импульсов в сантиметровом диапазоне длин волн [16,61]. В ходе работ была достигнута максимальная частота генерации 20 GHz. Описанная в [61] система позволяет последовательное увеличение количества импульсов в выходном промодулированном импульсе, тем самым увеличивая его центральную частоту. Такой метод позволяет получать глубину модуляции до 70%. При этом в работе [61] был получен рекордно короткий фронт нарастания импульса напряжения в 45 ns при амплитуде импульса напряжения 850 kV. В [16] использовались ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса, что заметно увеличило эффективность генерации в ГНПЛ. Также было показано, что возможно возбуждение высокочастотных колебаний в НПЛ с ферритом без внешнего поля подмагничивания, используя кольца с прямоугольной петлей.

Недавно [62] группой из ИСЭ СО РАН был разработан генератор с периодическим расположением ферритовых колец и колец из постоянных неодимовых магнитов внутри коаксиальной линии передачи. Данное техническое решение позволяет уйти от использования соленоида, используемого для насыщения феррита, более того геометрия линии представляет собой линию с гофрированным внутренним проводником, обладающую пространственной дисперсией, аналогичную [59]. Постоянные магниты располагались внутри гофрированного проводника. Результатом работы стала демонстрация возможности возбуждения высокочастотных импульсов

с центральной частотой 1.3 GHz и пиковой мощностью 110 MW без использования соленоида. В работе было произведено сравнение энергетических характеристик традиционной ГНПЛ и гофрированной НПЛ с ферритом. Было показано, что первый прототип обладает слегка большим КПД чем аналогичная ГНПЛ с тем же количеством ферритовых колец того же поперечного размера, пиковая мощность которой составила 100 MW. Вес постоянных магнитов, использованных в работе, не превышает 1 kg, что существенно уменьшает как габариты, так и конечный вес генератора.

### 3.2. Развитие технологии многоканальных источников СВЧ импульсов с использованием НПЛ с ферритом

Для повышения эффективного потенциала излучательных систем на основе ГНПЛ нельзя прибегнуть к прямому повышению генерируемой СВЧ мощности от одной линии. Решением является использование многоканальных систем на основе линий с насыщенным ферритом. Удобным здесь является еще то, что ГНПЛ позволяют изменять время распространения по ним высоковольтного импульса за счет изменения внешнего поля подмагничивания, что делает их эффективными линиями с контролируемой задержкой времени распространения. Изменение времени распространения высоковольтных импульсов в ГНПЛ отлично используется для фазировки нескольких генераторов в многоканальных системах.

В 2015 г. коллективом из ИСЭ СО РАН был создан двухканальный источник СВЧ излучения с возможностью электронного контроля сканирования луча [63]. Внешний вид двухканальной системы представлен на рис. 6. В одноканальном режиме ГНПЛ могли генерировать высокочастотные импульсы с пиковой мощностью от 50 до 700 MW на центральной частоте 0.5–1.7 GHz. Частота следования импульсов составила 100 Hz. Фазирование обеспечивалось за счет наличия дополнительной секции ГНПЛ длиной 30 cm для формирования фронта высоковольтного импульса 0.5 ns и обеспечения необходимой временной задержки между



Рис. 6. Внешний вид двухканального источника СВЧ излучения с возможностью электронного контроля сканирования луча из работы [63].





**Рис. 7.** Внешний вид четырехканальной системы на основе НПЛ с ферритом из работы [64].

каналами. В источнике использовалась спиральная антенна в каждом канале, поскольку она является наиболее удобной для коаксиальной геометрии генератора и обеспечивает практически круговую поляризацию излученного импульса. Излученная пиковая мощность составила  $350\text{ MW}$ , что соответствует эффективному потенциалу в  $350\text{ kV}$ . В двухканальном режиме была продемонстрирована возможность сканирования луча в горизонтальной плоскости на  $\pm 15^\circ$ .

В 2017 г. учеными из ИСЭ СО РАН и ИЭФ УрО РАН была разработана четырехканальная система, аналогичная двухканальной [64]. Ее внешний вид представлен на рис. 7. Система способна работать с частотой следования импульсов до  $1\text{ kHz}$ . Центральная частота импульса составляла  $2.1\text{ GHz}$  с длительностью импульса  $3\text{ ns}$ . Был достигнут максимальный эффективный потенциал в  $360\text{ kV}$  с возможностью сканирования луча в горизонтальной плоскости на  $\pm 17^\circ$ . Излученный импульс обладал круговой поляризацией.

Также многоканальные системы разрабатывались и за рубежом. Так, исследователи из США [65] представили четырехканальную систему, работающую на значительно меньших мощностях примерно  $5\text{ MW}$  (это соответствует напряженности электрического поля  $8\text{ kV/m}$  на расстоянии  $10\text{ m}$ ) на частотах  $2\text{--}4\text{ GHz}$  с частотой следования импульсов до  $1\text{ kHz}$ . Длительность импульса не превышала  $2\text{ ns}$ . Сканирование луча в горизонтальной плоскости осуществлялось на  $\pm 17^\circ$ .

В последние годы коллектив из Института электрофизики УрО РАН создал четырехканальные системы с центральной частотой излучаемых импульсов  $4$  и  $8\text{ GHz}$  [66,67]. В системах получены напряженности электрического поля при сложении мощности от  $4$  каналов в открытом пространстве  $250\text{ kV/m}$  для системы  $4\text{ GHz}$  и  $1.5\text{ kV/cm}$  для системы  $8\text{ GHz}$  на расстоянии  $3\text{ m}$ .

НПЛ с ферритом для фазировки каналов могут также быть использованы и с релятивистскими приборами. Коллективом из ИСЭ СО РАН и ИЭФ УрО РАН был разработан двухканальный наносекундный реляти-

вистский СВЧ генератор, в котором была реализована возможность контролирования разности фаз в каналах для когерентного сложения электромагнитных полей при использовании секции обострения и задержки на основе НПЛ с насыщенным ферритом [68]. Для двух сверхизлучательных ламп обратной волны  $10\text{ GHz}$  диапазона субнаносекундный фронт импульса напряжения обеспечил взаимное отклонение фаз между каналами в единицы процентов от периода колебаний.

### 3.3. Перспективы развития технологий генерации и излучения высокочастотных импульсов с использованием НПЛ с ферритом

Сегодня на основе НПЛ с ферритом разработаны и протестированы генераторы и источники наносекундных СВЧ импульсов, работающие в интервале частот от сотен мегагерц до  $20\text{ GHz}$ . Максимальная пиковая мощность одного генератора может достигать  $700\text{ MW}$  при длительности импульса, не превышающей  $10\text{ ns}$ . При этом с ростом частоты генерации падает энергетика импульсов, как за счет падения пиковой мощности генерации из-за уменьшения поперечных размеров передающих линий, так и за счет уменьшения длительности импульса, связанной с уменьшением времени переходных процессов в феррите на более высоких частотах. Разрабатываемые генераторы, работающие на частоте до  $8\text{ GHz}$ , способны работать в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов до  $1\text{ kHz}$ . Полученная генерация импульсов с частотой выше  $8\text{ GHz}$  несет скорее научный характер, поскольку такие системы могут работать только в режиме однократного импульса в силу плохой электрической прочности системы. Сегодня наиболее перспективным видится технология генерации высокочастотных импульсов в гофрированных коаксиальных НПЛ с постоянными магнитами [62] в силу отсутствия соленоида, что существенно упрощает конструкцию и увеличивает полный КПД генератора. Более того, развитие технологий гофрированных линий может позволить увеличить длительность генерируемых высокочастотных импульсов в линии с пространственной дисперсией.

Если первые работы по созданию генераторов на основе НПЛ с ферритом проводились в основном экспериментально, то сегодня разработаны методы численного моделирования процессов, происходящих в НПЛ методом конечных разностей [69–71]. Использование численного моделирования позволяет оптимизировать конструкции нелинейных передающих линий, а также исследовать новые физические эффекты, позволяющие улучшить параметры устройств.

Что касается многоканальных систем, сегодня как в России, так и в мире созданы системы с параллельной работой четырех НПЛ с ферритом. Основным ограничением на количество одновременно работающих каналов здесь является трудность, связанная с тем, что

при увеличении количества каналов источник импульсов напряжения и его коммутатор должны увеличивать протекающий по ним ток, что приводит к существенному увеличению длительности фронта импульса напряжения и повышенным требованиям к запасаемой энергии. Четырехканальные системы с волновым сопротивлением одного канала в  $50 \Omega$  являются оптимальными с точки зрения доступности технологий современной импульсной техники. Увеличения числа каналов систем не видится без одновременного улучшения характеристик источников напряжения и высоковольтных коммутаторов. Нельзя не отметить то, что сегодня НПЛ с ферритом также используются и в разработке многоканальных систем релятивистских генераторов для обострения фронта импульса напряжения и фазирования каналов.

## Заключение

Сегодня НПЛ с ферритом представляют собой надежные, дешевые, полностью твердотельные системы для задач импульсной техники и мощной СВЧ электроники. За последние 15 лет активного развития в этой области СВЧ генераторы на основе НПЛ по своим параметрам в дециметровом области длин волн приблизились к релятивистским генераторам. За эти годы было решено много инженерных задач: повышение электрической прочности линии, увеличение частоты следования импульсов, создание многоканальных систем. Уже продемонстрирована возможность возбуждения колебаний в НПЛ на частотах 10–20 GHz [16] в лабораторных макетах. При этом пиковая мощность генераторов падает пропорционально квадрату излучаемой длины волны.

Особенностью систем на основе НПЛ с ферритом является малая длительность высокочастотного импульса и, как следствие, низкая энергетика импульсов, в их конструкции обычно используются жидкие диэлектрики для изоляции, которым требуется повышенное давление в линии. Перспективным видится развитие подхода коаксиальных НПЛ с пространственной дисперсией, что может позволить увеличить длительность высокочастотного импульса, на что указывают экспериментальные результаты. Развитие этого подхода тесно связано с переходом от внешних соленоидов, в поле которых насыщается феррит, к использованию компактных постоянных магнитов внутри конструкции линии, что приведет к существенному уменьшению массогабаритных параметров источников.

Возможность обострения фронта и одновременный контроль времени пробега высоковольтного импульса по НПЛ позволили создать многоканальные источники СВЧ излучения на основе как НПЛ с насыщенным ферритом, так и на основе релятивистских генераторов. Это дает возможность заметно повышать эффективный потенциал излучательных систем.

Отдельно следует отметить, что для улучшения параметров СВЧ генераторов на основе НПЛ с ферритом

представляется актуальным развитие и разработка технологий создания новых магнитных материалов, предназначенных непосредственно для возбуждения высокочастотных колебаний в передающих линиях.

## Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FWRM-2022-0002).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] H. Ikezi, J.S. DeGrassie, J. Drake. *Appl. Phys. Lett.*, **58** (9), 986 (1991). DOI: 10.1063/1.104464
- [2] D.M. French, B.W. Hoff, S. Heidger, D. Shiffler. In: *2011 IEEE Pulsed Power Conference* (Chicago, USA, IEEE, 2011), DOI: 10.1109/PPC.2011.6191441
- [3] И.В. Романченко, В.В. Ростов. *ЖТФ*, **80** (7), 111 (2010). [I.V. Romanchenko, V.V. Rostov. *Tech. Phys.*, **55** (7), 1024 (2010). DOI: 10.1134/S1063784210070170]
- [4] E.G.L. Rangel, J.J. Barroso, J.O. Rossi, F.S. Yamasaki, L.P. S. Neto, E. Schamiloglu. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **44** (10), 2258 (2016).
- [5] J. Darling. Ph.D. *Dissertation. Eng. Sci. Dept.* (Oxford Univ., Oxford, U.K., 2009)
- [6] А.М. Белянцев, А.И. Дубнев, С.Л. Климин, Ю.А. Кобелев, Л.А. Островский. *ЖТФ*, **65** (8), 132 (1995).
- [7] N. Seddon, C.R. Spikings, J.E. Dolan. In *Proc. IEEE Int. Pulsed Power Conf.* (Albuquerque, USA, 2007), DOI: 10.1109/PPPS.2007.4651931
- [8] A.M. Belyantsev, A.B. Kozyrev. *J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, **19** (11), 1571 (1998). DOI: 0195-9271/98/1100-1571\$15.00/0
- [9] I.V. Romanchenko, V.Yu. Konev, V.V. Barmin, P.V. Priputnev, S.N. Maltsev. *AIP Advances*, **10** (12), 125020 (2020). DOI: 10.1063/5.0034106
- [10] J. Benford, J.A. Swegle, E. Schamiloglu. *High Power Microwaves* (CRC Press; 3rd ed., 2015)
- [11] J. Krile, M. Kristiansen. In: *2011 IEEE Pulsed Power Conference* (Chicago, USA, IEEE, 2011), DOI: 10.1109/PPC.2011.6191562
- [12] S. Ashby, R.R. Smith, N. Aiello, J.N. Benford, N. Cooksey, D.V. Drury, B.D. Harteneck, J.S. Levine, P. Sincerny, L. Thompson, L. Schlitt. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **20** (3), 344350 (1992). DOI: 10.1109/27.142835
- [13] Е.М. Тотьменинов, П.В. Выходцев, А.В. Гунин, А.И. Климов, В.В. Ростов. *ЖТФ*, **84** (3), 120 (2014). [E.M. Tot'meninov, P.V. Vykhodtsev, A.V. Gunin, A.I. Klimov, V.V. Rostov. *Tech. Phys.*, **59**, 428 (2014). DOI: 10.1134/S1063784214030268]
- [14] V.V. Rostov, R.V. Tsygankov, P.V. Vykhodtsev, V.Y. Konev, A.S. Stepchenko. *IEEE Electron Dev. Lett.*, **42** (6), 935 (2021). DOI: 10.1109/LED.2021.3070887

- [15] V.V. Rostov, N.M. Bykov, D.N. Bykov, A.I. Klimov, O.B. Kovalchuk, I.V. Romanchenko. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **38** (10), 2681 (2012). DOI: 10.1109/TPS.2010.2048722
- [16] M.R. Ulmaskulov, S.A. Shunailov. *J. Appl. Phys.*, **130** (12), 234905 (2021). DOI: 10.1063/5.0072352
- [17] A.B. Гапонов, Л.А. Островский, Г.И. Фрейдман. *Изв. вузов, радиофизика*, **10**, 1376 (1967).
- [18] A.B. Гапонов, Г.И. Фрейдман. *ЖЭТФ*, **36**, 957 (1959).
- [19] A.M. Белянцев, A.B. Гапонов, Г.И. Фрейдман. *ЖТФ*, **35**, 677 (1965).
- [20] A.B. Гапонов, Г.И. Фрейдман. *Изв. вузов, радиофизика*, **3**, 79 (1960).
- [21] J. Stohr, H.C. Siegmann. *Magnetism* (Springer, Berlin Heidelberg, 2006)
- [22] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Собрание трудов* в 2 т. под ред. Е.М. Лифшица (Наука, М., 1969)
- [23] В.А. Петров, У. Эберль. *ПТЭ*, **1**, 90 (1979).
- [24] M. Weiner, L. Silber. *IEEE Trans. Magnetics*, **17** (4), 1472 (1981). DOI: 10.1109/TMAG.1981.1061243
- [25] N. Seddon, E. Thornton. *Electron. Lett.*, **29**, 762 (1993). DOI: 10.1063/1.1139937
- [26] J.E. Dolan. *Electron. Lett.*, **29** (9), 762 (1993). DOI: 10.1049/el:19930510
- [27] J.E. Dolan. *Electron. Lett.*, **35** (14), 1168 (1999). DOI: 10.1049/el:19990806
- [28] N. Seddon. *Proc. Optically Activated Switching IV*, 2343, (1995). DOI: 10.1117/12.198661
- [29] T.M. Benson, R. Pouladian-Kari, A.J. Shapland. *Electron. Lett.*, **27** (10), 861 (1991). DOI: 10.1049/el:19910539
- [30] К.В. Афанасьев, О.Б. Ковальчук, В.О. Кутенков, И.В. Романченко, В.В. Ростов. *ПТЭ*, **3**, 86 (2008).
- [31] J.E. Dolan, H.R. Bolton, A.J. Shapland. *Electron. Lett.*, **33** (24), 2049 (1997). DOI: 10.1049/el:19971395
- [32] C. Brooker, N. Altieri, G. Eastwood, R. Hoad, J.E. Dolan. *Electron. Lett.*, **35** (25), 2210 (1999). DOI: 10.1049/el:19991493
- [33] M.R. Ulmaskulov, S.A. Shunailov, K.A. Sharypov, M.I. Yalandin, V.G. Shpak. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **45** (10), 2707 (2017). DOI: 10.1109/TPS.2017.2727639
- [34] R.K. Sobyenin, I.V. Romanchenko, K.V. Afanasyev. *J. Phys.: Conf. Series*, **2094**, 022062 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2094/2/022062
- [35] Tie Weihao, Meng Cui, Zhao Chengguang, Lu Xiaogang, Xie Jun, Jiang Dan, Yan Zirang. *Plasma Sci. Technol.*, **21** (9), 095503 (2019). DOI: 10.1088/2058-6272/ab2626
- [36] A.J. Fairbanks, T.D. Crawford, A.L. Garner. *Rev. Sci. Instrum.*, **92**, 104702 (2021). DOI: 10.1063/5.0055916
- [37] G.A. Mesyats, M.S. Pedos, S.N. Rukin, V.V. Rostov, I.V. Romanchenko, A.G. Sadykova, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.R. Ul'maskulov, M.I. Yalandin. *Appl. Phys. Lett.*, **112** (16), 163501 (2018). DOI: 10.1063/1.5025751
- [38] A.I. Gusev, M.S. Pedos, S.N. Rukin, S.P. Timoshenkov, S.N. Tsyranov. *Rev. Sci. Instrum.*, **86** (11), 114706 (2015). DOI: 10.1063/1.4936295
- [39] A.I. Gusev, M.S. Pedos, A.V. Ponomarev, S.N. Rukin, S.P. Timoshenkov, S.N. Tsyranov. *Rev. Sci. Instr.*, **89** (9), 094703 (2018). DOI: 10.1063/1.5048111
- [40] E.A. Alichkin, M.S. Pedos, A.V. Ponomarev, S.N. Rukin, S.P. Timoshenkov, M.I. Yalandin. *Rev. Sci. Instr.*, **91** (10), 104705 (2020). DOI: 10.1063/5.0017980
- [41] Г.И. Фрейдман. *Изв. вузов, радиофизика*, **3**, 276 (1960).
- [42] B.J. Elliott, T. Schaug-Pettersen, H.J. Shaw. *J. Appl. Phys.*, **31**, S400 (1960). DOI: 10.1063/1.1984763
- [43] H.J. Shaw, B.J. Elliott, K.J. Harker, A. Karp. *J. Appl. Phys.*, **37**, 1060 (1966). DOI: 10.1063/1.1708335
- [44] R.V. Pound. U.S. Patent No. 2 873 370 (1959).
- [45] A.M. Белянцев, А.Б. Козырев. *ЖТФ*, **72** (11), 133 (2002). [A.M. Belyantsev, A.B. Kozyrev. *Tech. Phys.*, **47**, 1477 (2002). DOI: 10.1134/1.1522123]
- [46] A.M. Белянцев, А.Б. Козырев. *ЖТФ*, **68**, 89 (1998). [A.M. Belyantsev, A.B. Kozyrev. *Tech. Phys.*, **43**, 80 (1998). DOI: 10.1134/1.1258941]
- [47] A.M. Белянцев, А.Б. Козырев. *ЖТФ*, **70**, 78 (2000). [A.M. Belyantsev, A.B. Kozyrev. *Tech. Phys.*, **45**, 747 (2000). DOI: 10.1134/1.1259714]
- [48] A.M. Белянцев, А.Б. Козырев. *ЖТФ*, **71**, 79 (2001). [A.M. Belyantsev, A.B. Kozyrev. *Tech. Phys.*, **46**, 864 (2001). DOI: 10.1134/1.1387548]
- [49] A.M. Белянцев, А.Б. Козырев. *ЖТФ*, **72**, 134 (2002). [A.M. Belyantsev, A.B. Kozyrev. *Tech. Phys.*, **47**, 272 (2002). DOI: 10.1134/1.1451980]
- [50] N. Seddon, J.E. Dolan, C.R. Spikings. In *IEEE 34th Int Conf. Plasma Sci.* (Albuquerque, USA, 2007), DOI: 10.1109/PPPS.2007.4345786
- [51] P.D. Coleman, J.J. Borchardt, J.A. Alexander, J.T. Williams, T.F. Peters. In: *2011 IEEE Pulsed Power Conf.* (Chicago, USA, 2011), DOI: 10.1109/PPC.2011.6191409
- [52] В.П. Губанов, А.В. Гунин, О.Б. Ковальчук, В.О. Кутенков, И.В. Романченко, В.В. Ростов. *Письма ЖТФ*, **35** (13), 81 (2009).
- [53] I.V. Romanchenko, V.V. Rostov, V.P. Gubanov, A.S. Stepchenko, A.V. Gunin, I.K. Kurkan. *Rev. Sci. Instrum.*, **83**, 074705 (2012). DOI: 10.1063/1.4738641
- [54] S.J.F. Chadwick, N. Seddon, S. Rukin. In: *2011 IEEE Pulsed Power Conf.* (Chicago, USA, 2011), DOI: 10.1109/PPC.2011.6191410
- [55] J. Bragg, J. Dickens, A. Neuber. In: *2010 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conf.* (Atlanta, USA, 2010), DOI: 10.1109/IPMHVC.2010.5958430
- [56] J.-W.B. Bragg, J.C. Dickens, A.A. Neuber. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **41** (1), 232 (2012). DOI: 10.1109/TPS.2012.2226169
- [57] J.-W.B. Bragg, J.C. Dickens, A.A. Neuber. *J. Appl. Phys.*, **113**, 064904 (2013). DOI: 10.1063/1.4792214
- [58] D.V. Realea, J.M. Parson, A.A. Neuber, J.C. Dickens, J.J. Mankowski. *Rev. Sci. Instrum.*, **87**, 034706 (2016). DOI: 10.1063/1.4942246
- [59] D.M. French, B.W. Hoff. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **42** (10), 3387 (2014). DOI: 10.1109/TPS.2014.2348492
- [60] J.A. Schrock, B.W. Hoff, D.H. Simon, S.L. Heidger, P. Lepell, J. Gilbrech, H. Wood, R. Richter-Sand. *IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation*, **26** (2), 412 (2019). DOI: 10.1109/TDEI.2019.007731
- [61] M.R. Ulmaskulov, S.A. Shunailov, K.A. Sharypov, M.I. Yalandin. *J. Appl. Phys.*, **126**, 084504 (2019). DOI: 10.1063/1.5110438
- [62] P.V. Pripitnev, I.V. Romanchenko, S.N. Maltsev, V.Yu. Konev, V.P. Tarakanov. *IEEE Microwave and Wireless Comp. Lett.*, **32** (5), 471 (2022). DOI: 10.1109/LMWC.2021.3138964
- [63] I.V. Romanchenko, V.V. Rostov, A.V. Gunin, V.Yu. Konev. *J. Appl. Phys.*, **117**, 214907 (2015). DOI: 10.1063/1.4922280

- [64] I.V. Romanchenko, M.R. Ulmaskulov, K.A. Sharyпов, S.A. Shunailov, V.G. Shpak, M.I. Yalandin, M.S. Pedos, S.N. Rukin, V.Yu. Konev, V.V. Rostov. *Rev. Sci. Instrum.*, **88**, 054703 (2017). DOI: 10.1063/1.4983803
- [65] J.M. Johnson, D.V. Reale, J.T. Krile, R.S. Garcia, W.H. Cravey, A.A. Neuber, J.C. Dickens, J.J. Mankowski. *Rev. Sci. Instrum.*, **87**, 054704 (2016). DOI: 10.1063/1.4947230
- [66] M.R. Ul'maskulov, S.A. Shunailov, K.A. Sharyпов, M.I. Yalandin, V.G. Shpak, M.S. Pedos, S.N. Rukin. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **45** (10), 2623 (2017). DOI: 10.1109/TPS.2017.2704618
- [67] M.R. Ulmaskulov, S.A. Shunailov, K.A. Sharyпов, M.I. Yalandin, V.G. Shpak, S.N. Rukin, M.S. Pedos. *Rev. Sci. Instrum.*, **90**, 064703 (2019). DOI: 10.1063/1.5091075
- [68] А.А. Ельчанинов, А.И. Климов, О.Б. Ковальчук, Г.А. Месяц, И.В. Пегель, И.В. Романченко, В.В. Ростов, К.А. Шарыпов, М.И. Яландин. *ЖТФ*, **81** (1), 125 (2011). [A.A. El'chaninov, A.I. Klimov, O.B. Koval'chuk, G.A. Mesyats, I.V. Pegel', I.V. Romanchenko, V.V. Rostov, K.A. Sharyпов, M.I. Yalandin. *Tech. Phys.*, **56**, 121 (2011). DOI: 10.1134/S1063784211010099]
- [69] S. Karelin. *Radiophys. Electron.*, **22** (1), 51 (2017). DOI: 10.15407/rej2017.01.051
- [70] P. Priputnev, I. Romanchenko, V. Tarakanov, I. Pegel. In: *2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)* (Tomsk, Russia, 2020), DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9241904
- [71] V. Patrakov, S. Rukin. In: *8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects* (Tomsk, Russia, 2022), DOI: 0.56761/EFRE2022.S6-P-017001