

## СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА БОЛЬШИХ МОЩНОСТЕЙ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Г.И. ЧУРЮМОВ

---

В настоящем обзоре излагаются основные идеи, методы и достижения СВЧ-электроники больших мощностей применительно к решению широкого круга фундаментальных проблем, связанных с генерацией электромагнитной энергии и эффективностью ее преобразования в другие виды энергии в интересах различных отраслей науки и техники, промышленности, сельского хозяйства, медицины и биологии, а также современных военно-технических приложений. Показано, что данным достижениям способствуют прогресс, достигнутый вакуумной СВЧ-электроникой и, особенно, релятивистской СВЧ-электроникой, а также успехи высоковольтной импульсной техники.

Представлены результаты анализа технологической базы мощной релятивистской СВЧ-электроники, которая составляет основу современной СВЧ-энергетики – новой перспективной области применения электромагнитной энергии. Описаны виды и механизмы электромагнитных излучений, которые лежат в основе работы различных релятивистских СВЧ-генераторов: от классических их аналогов (ЛОВ, ЛБВ, магнетрон, клистрон и т.д.) до мазеров на циклотронном резонансе (гиротронов) и их секционированных конструкций (гирос-ЛБВ, гиросклистрон и т.д.), а также приборов с виртуальным катодом (виркатор, различные конструкции СВЧ-триодов и т.д.) и лазеров на свободных электронах.

Обсуждаются пути альтернативного развития радиоэлектронных систем, отличающиеся простотой технического решения и конструкции, а также удобством эксплуатации. В качестве таких источников рассматриваются генераторы импульсного напряжения (генератор Маркса) и СВЧ-модули, содержащие нерелятивистский СВЧ-генератор (магнетрон) и резонансный СВЧ-компрессор.

Приведены энергетические, частотные и временные характеристики и параметры электромагнитного излучения. Описаны перспективные области применения технологических установок для СВЧ-нагрева и обработки различных материалов и сред с целью придания им новых свойств.

Рассмотрены приоритетные направления развития оборонных технологий на основе использования принципиально новых технических решений, в том числе на новых физических принципах. Показано, что в условиях сильного радиоэлектронного и информационного противодействия разработка радиотехнических средств и устройств для разрушения и даже уничтожения электронной элементной базы становится очень важной и актуальной проблемой. При определенных условиях, представленные результаты можно рассматривать, как попытку обобщить накопленный опыт и показать пути дальнейшего развития мощной СВЧ-электроники в различных приложениях СВЧ-технологий, особенно, в сфере обороны при создании перспективных образцов военной техники с учетом мер по обеспечению ее работоспособности в условиях внешнего электромагнитного воздействия.

*Ключевые слова:* СВЧ-энергетика, СВЧ-электроника, электромагнитное излучение, генератор импульсного напряжения, релятивистский СВЧ прибор, резонансный СВЧ-компрессор, электромагнитное оружие.

### ВВЕДЕНИЕ

История применения СВЧ-излучения большой и сверхбольшой мощности в различных сферах человеческой деятельности насчитывает достаточный период времени, чтобы можно было с уверенностью говорить о рождении новой области науки и техники, каковой является СВЧ энергетика [1 – 3]\*).

Необходимо отметить, что первые работы по воздействию мощных электромагнитных полей на различные объекты как живой, так и неживой природы появились после 1945 года, когда были впервые

проведены испытания ядерного оружия. Именно тогда Нобелевский лауреат физик *Enrico Fermi* (рис. 1) попытался вычислить электромагнитные поля, которые являлись продуктом ядерного взрыва.

В 1960-е годы в разгар холодной войны молодой ученый *Dr. Carl E. Baum* (рис.2) изучал различные формы электромагнитных импульсов, которые возбуждались на разных стадиях ядерного взрыва: ранней, промежуточной и поздней. Как показал проведенный анализ, к отличительным особенностям данных импульсов можно отнести высокую пиковую ин-

\* Необходимо заметить, что термин «СВЧ энергетика» является, в большей степени, русскоязычным и введен, чтобы характеризовать практические стороны применения электроники больших мощностей («энергетический эффект» [4]). В свою очередь, в англоязычной литературе, как было показано в работе [237], в основном, применяется термин «*High Power Microwave (HPM)*» [250, 251]. При этом смысл, который вкладывается в данный термин, зависит от конкретной области применения и полученного резуль-

тата. Так, интересы Министерства энергетики США касаются СВЧ-источников с высокой средней мощностью и их развития, а интересы Министерства обороны США лежат в области применения мощных релятивистских импульсных СВЧ-источников и генерации сверхширокополосного электромагнитного излучения с высокой пиковой мощностью. Более детальную классификацию электромагнитного излучения с точки зрения электромагнитной совместимости можно найти в [252].

тенсивность излучения (более 50000 В/м для ранней стадии, от 10 до 100 В/м для промежуточной и единицы В/м для поздней стадии). Быстрое время нарастания переднего фронта (единицы нс) обуславливает широкий частотный спектр излучения (от сотен кГц до сотен МГц). Отсутствие на тот момент необходимых измерительных средств и сенсорных технологий определило направление и тематику будущих исследований [5 – 9]. В результате появилась новая область, связанная с исследованиями нестационарных электромагнитных процессов (нестационарная электродинамика). Она рассматривает поведение широкополосных (Wide-Band (WB)) и сверхширокополосных (Ultra Wide-Band (UWB)) сигналов в электродинамических структурах и их распространение в различных средах [10 – 13]. Это дало мощный толчок появлению и развитию радиолокационных систем (РЛС) с высокой разрешающей способностью, использующих наносекундные и субнаносекундные импульсы [11, 14, 15], совершенствованию методов измерения нестационарных процессов в частотной и временной областях [15, 16], а также развитию видеоимпульсной рефлектометрии в свободном пространстве, связанной с зондированием объектов сверхкороткими импульсами без ВЧ заполнения (видеоимпульсами) [12]. Последующая систематизация знаний в этой области и основные вехи ее развития до наших дней детально были сформулированы в [17].

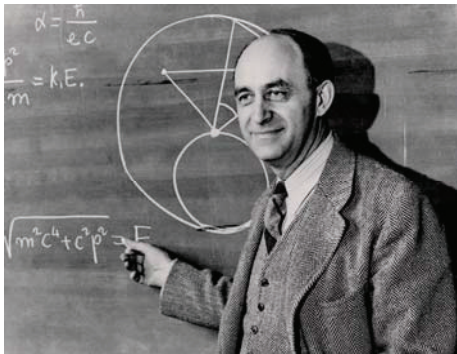


Рис. 1. Энрико Ферми (фото в свободном доступе)

В бывшем СССР основы СВЧ энергетики были сформулированы Нобелевским лауреатом академиком П.Л. Капицей (рис. 3). В начале 50-х годов прошлого века он впервые ввел понятие «электроника больших мощностей» [4]. Это была первая попытка на широкой научной основе рассмотреть вопросы эффективной генерации мощных и сверхмощных электромагнитных колебаний с помощью вакуумных электронных приборов СВЧ (ниготрон). Возможность сосредоточения большой СВЧ мощности в малых объемах и способность ее концентрации в локальных областях пространства исследуемых объектов с учетом объемного характера воздействия СВЧ электромагнитного поля на среду, материалы или объекты, позволило в дальнейшем исследовать гибкость транс-

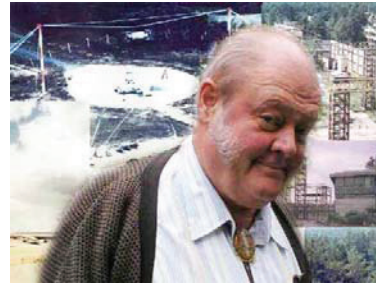


Рис. 2. Карл Э. Баум (фото в свободном доступе)

формации СВЧ энергии в другие виды энергии для решения разнообразных прикладных задач [18 – 20]. В отличие от традиционной энергетики, которая использует переменный электрический ток с частотой 50 Гц (в ряде стран 60 Гц), СВЧ энергетика ориентирована на применение электромагнитных волн СВЧ в диапазоне от 300 МГц до 3000 ГГц [21]. Международный союз электросвязи (МСЭ) (*International Telecommunication Union*) выделил ряд диапазонов частот в спектре электромагнитных волн для применения СВЧ энергии в научных исследованиях. Такие диапазоны определены для нагрева плазмы [22 – 28], ускорения заряженных частиц [25, 29 – 31, 42 – 46], передачи энергии с помощью СВЧ-излучения [2, 32 – 35, 48 – 60], изучения электронных свойств твердых тел. Определены также свои диапазоны в промышленном и бытовом СВЧ нагреве для термической обработки сред, материалов и объектов [1 – 4, 36, 40, 41, 61]. Широкое применение СВЧ-технологии находят в медицине и биологии для размораживания органов и тканей после консервации, лечения онкологических заболеваний (гипертермия), реконструкции коронарных сосудов с помощью СВЧ-баллонного катетера, стимуляции сердечбиения и электрической активности изолированного сердца, дезинфекции медицинских соединителей в процессе диализа почек [37 – 39, 47, 62 – 65]. Для решения большинства задач СВЧ-энергетики в качестве рабочих частот МСЭ выделил диапазоны 433 МГц, 915 МГц и 2450 МГц.

В начале 80-х годов прошлого века новое развитие получила идея передачи энергии с помощью электромагнитных волн, которую еще в начале XX века высказал *Nikola Tesla* (рис. 4) [68, 69]. Особое внимание вызвали исследования беспроводной передачи микроволновой энергии с геостационарной

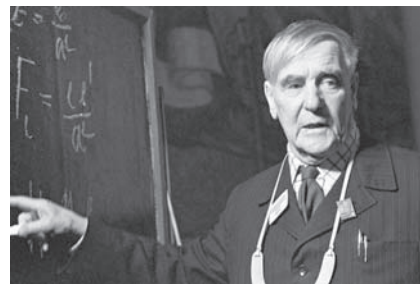


Рис. 3. Академик П.Л. Капица во время лекции в 1974 г. (фото в свободном доступе)

орбиты на поверхность Земли с помощью направленного микроволнового излучения (СВЧ-луча) в диапазоне частот 2,4–5,8 ГГц с последующим его преобразованием на Земле в постоянный ток [32 – 35, 67].

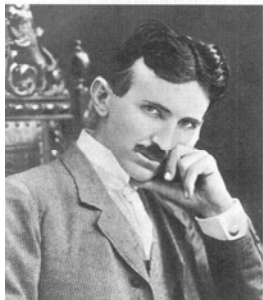


Рис. 4. Николо Тесла (фото в свободном доступе)

Для обратного преобразования микроволнового излучения в постоянный ток использовались либо ректенны с GaAs-диодами или диодами Шотки, либо обращенный режим работы различных мощных вакуумных приборов (магнетронов, клистронов, циклотронных преобразователей и т.п.). Применение мощных вакуумных приборов с высокими выходными напряжениями для обратного преобразования энергии является более предпочтительным и технологичным по сравнению с низковольтными ректеннами. Суммарный КПД передачи энергии с помощью СВЧ-луча с геостационарной орбиты на поверхность Земли составляет порядка 70 – 75 %. При этом площадь передающей антенны более 3 км<sup>2</sup>, а площадь приемной наземной ректенны порядка 130 км<sup>2</sup> для широты местности 35° [35, 66]. Проект солнечной космической электростанции показал уровень выходной мощности порядка 5 ГВт при плотности излучаемой мощности в центре передающей антенны 23 кВт/м<sup>2</sup>, а в центре приемной – 230 Вт/м<sup>2</sup>. Полученные результаты свидетельствуют о технической и технологической реальности построения солнечных космических электростанций при одновременном обеспечении безопасности, экологической чистоты и электромагнитной совместимости [70, 71].

Более чем 60-летняя практика интегрирования мощного ЭМИ СВЧ в различные энергоемкие технологические процессы показала эффективность применения СВЧ-энергии как в режиме непрерывной ее генерации, так и в случае использования СВЧ-излучения микросекундной и наносекундной длительности. В последнем случае речь идет об импульсной мощности СВЧ-излучения, значение которой определяется по формуле [см., напр., 72]:

$$P_{imp} = \xi \cdot \frac{P_{ave}}{\tau_{imp} \cdot f_{imp}}, \quad (1)$$

где  $P_{ave}$  – средняя мощность СВЧ-излучения, Вт;  $\tau_{imp}$  – длительность огибающей СВЧ-импульса, из-

меренная на уровне 0,5 максимального значения сигнала, с;  $f_{imp} = 1/T_p$  – частота повторения импульсов (число импульсов в секунду), Гц;  $\xi$  – постоянный коэффициент, учитывающий форму электромагнитного СВЧ-импульса. Необходимо отметить, что коэффициент  $\xi$  характеризует отличие формы огибающей СВЧ импульса от его идеальной прямоугольной формы, что отчасти связано с неидеальностью модулирующего импульса ускоряющего напряжения  $U_a(t)$ , подаваемого на прибор, а также сложными переходными и нелинейными процессами вывода энергии в нагрузку.

Особенности импульсного режима работы СВЧ-приборов заключаются в более высокой их пиковой мощности, значение которой формируется в короткий временной интервал и получение которой недостижимо с помощью современных технологий генерирования непрерывных СВЧ-колебаний. Эффективность применения мощных СВЧ-импульсов для технологических целей зависит от электрофизических параметров сред и материалов, поглощающих СВЧ энергию, а также от длительности и формы импульсов, частоты их повторения [1 – 4, 73].

Перспектива развития мощной вакуумной СВЧ электроники связана с созданием мощных и сверхмощных СВЧ приборов, в том числе длинноанодных магнетронов, многолучевых клистронов, многорежимных бортовых ЛБВ, гироскопов, линейных ускорителей электронов и многих других [74, 75, 115 – 117, 151, 136, 137, 155, 164, 165, 186, 189, 238, , 285 – 288, 291 – 299]. Данные приборы работают в широком частотном диапазоне от дециметрового до миллиметрового и обеспечивают мощность генерации десятки и сотни кВт в непрерывном и десятки ГВт в импульсном режимах работы. Расширяется область практического применения мощных и сверхмощных СВЧ-приборов, которая включает в себя не только традиционные вопросы СВЧ-нагрева объектов, материалов и сред, но и специальные вопросы, относящиеся к оборонной сфере, в том числе различные вопросы радиолокации систем противоракетной и противовоздушной обороны, радиоборьбы и противодействия, связи, функционального поражения электронно компонентной базы и т.д. Этому способствует стремление к созданию качественно новых и более эффективных систем вооружения, а именно высокоточного и электромагнитного (ЭМ) оружия для поражения радиоэлектронных средств противника [102 – 107, 109, 110, 242 – 246, 300]. Современным тенденциям развития техники соответствует создание мощных вакуумных приборов СВЧ. При этом традиционными задачами для СВЧ электроники больших мощностей являются укорочение длины волны, расширение полосы усиливаемых частот и повышение мощности СВЧ-излучения [75, 115, 165, 236]. Особенно,



это касается миллиметрового диапазона и разработки методов получения некоординатной информации. В частности, для технической реализации задач распознавания образов на больших расстояниях, получения радиопортретов различных объектов и создание систем радиовидения (высокоточное оружие) необходимо развитие элементной базы мощной СВЧ электроники именно в данных направлениях [74, 76 – 80].

С другой стороны, укорочение длины волны и повышение мощности ЭМИ усиливает возможности и эффективность применения его на больших расстояниях. В данном случае имеется в виду применение систем радиоэлектронного подавления (РЭП) и радиопротиводействия (РПД) как элементов ЭМ оружия, в том числе на новых физических принципах [109]. В этом случае основной задачей применения ЭМ оружия является функциональное поражение полупроводниковой элементной базы в существующих бортовых и стационарных системах вооружения, в том числе носителях высокоточного оружия. При этом возникают сбои в работе систем управления и связи за счет постановки прицельных по частоте помех, нарушающих нормальную работу существующих узкополосных систем [91 – 93, 108, 110].

Для оценки уровня средней СВЧ-мощности, генерируемой СВЧ-прибором, используют выражение

$$P_{ave} = \eta \cdot P_{sour}, \quad (2)$$

где  $P_{sour} = I_a \cdot U_a$  – мощность, подводимая к прибору от источника постоянного напряжения, Вт;  $U_a$  – ускоряющее напряжение, подаваемое на прибор, В;  $I_a$  – среднее значение тока в нагрузке источника питания, А;  $\eta = \eta_e \cdot \eta_{res}$  – полный КПД прибора,  $\eta_e$  – электронный КПД прибора, определяющий эффективность преобразования энергии, запасенной в электронном потоке, в энергию СВЧ-излучения. Значения КПД для разных типов СВЧ-приборов отличаются и лежат в диапазоне значений от 0,05 – 0,1 для приборов мм диапазона до 0,6 – 0,7 и более для приборов см и дм диапазонов.

Контурный КПД СВЧ-генератора определяется следующим соотношением

$$\eta_{res} = \frac{Q_{load}}{Q_{out}} = \frac{Q_0}{Q_0 + Q_{out}},$$

где  $Q_0$ ,  $Q_{load}$  и  $Q_{out}$  – собственная, нагруженная и вносимая (внешняя) добротности колебательной системы СВЧ-генератора.

Как видно из (2), увеличение СВЧ-мощности возможно достичь за счет роста мощности источника питания  $P_{sour}$ . В случае, когда импульсная мощность достигает уровня единиц и десятков  $MВт$ , а уско-

ряющее напряжение  $U_a$ , определяющее скорость движения электронов в пучке  $v_e$ , достигает значений, превышающих 50 – 60  $\kappaВ$ , начинают проявляться релятивистские эффекты, необходимо учитывать фактор Лоренца

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v_e^2/c^2)}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_e^2}} \rightarrow \infty, \quad (3)$$

где  $\beta_e = \frac{v_e}{c}$  – безразмерная скорость электрона;  $c$  – скорость света.

Условие (3) является характерным для релятивистских СВЧ-приборов, к особенности которых можно отнести формирование электронных потоков с энергией несколько мегаэлектронвольт и токами в десятки (сотни) килоампер в импульсе с длительностью в единицы наносекунд и сотни пикосекунд [116, 117]. Как результат преобразования энергии, запасенной в электронном пучке, удалось получить импульсную мощность СВЧ-излучения, превышающую десятков  $ГВт$ . Для этого используют релятивистские аналоги классических магнетронов, клистронов, ЛОВО, а также сильноточные нетрадиционные релятивистские СВЧ-приборы, такие как гиротрон, виркатор и магнитоизолированный линейный осциллятор (MLO).

Высокая эффективность воздействия электромагнитного СВЧ-излучения на элементы входных трактов радиоэлектронных систем (РЭС) обеспечивается применением короткого (единицы наносекунд) СВЧ-импульса с высокой пиковой мощностью (десятки и сотни  $\kappaВт$ ) и частотой заполнения импульса, соответствующей коротковолновой части миллиметрового диапазона. Все это вызывает необходимость развития электромагнитных СВЧ-технологий в направлении их продвижения в коротковолновую область длин волн, в частности, в миллиметровый и далее в терагерцовый диапазоны [86]. При этом следует обеспечить рост выходной мощности и частоты СВЧ излучения, а также уменьшение длительности импульса электромагнитной энергии [256, 258, 260, 261, 286].

Рассматривая достижения СВЧ-энергетики следует помнить о возможных негативных (преступных) последствиях воздействия мощного СВЧ-излучения различной интенсивности и частоты на окружающий нас мир в полном его многообразии [87 – 90, 108]. Достижения СВЧ-энергетики также стимулируют преднамеренные попытки криминальных элементов, в том числе террористов, к действиям, нарушающих работу инфокоммуникационных систем как государственных (правительственные системы и сети связи, системы жизнеобеспечения, аэропорты, метро, вокзалы и т.п.), так и коммерческих (интернет, банки и офисы крупных фирм) объектов [91 – 93]. Поэтому актуальными задачами становятся анализ существующих или возможных электромагнитных угроз, поиск путей и создание концепции построения защи-

ты функциональных элементов радиоэлектронной аппаратуры и элементной базы от воздействия мощного СВЧ-излучения как на программном (*software*), так и на аппаратном (*hardware*) уровнях. В этом плане позитивным моментом является принятие единых стандартов в области электромагнитной совместимости (*Electromagnetic Compatibility (EMC)*) и электромагнитных явлений высоких уровней мощности (*High-Power Electromagnetic (HPEM)*) [94 – 99]. Создание стандартов позволило объединить усилия ученых и разработчиков в борьбе с результатами практического применения ЭМ оружия, способствовало разработке технических средств противодействия [см., напр., 100, 101, 223, 289] и развитию возможных средств защиты, связанные с созданием элементной базы вакуумной микроэлектроники, в том числе вакуумных интегральных микросхем и их применением в качестве входных элементов РЭС [75, 314, 332].

В настоящем обзоре подробно рассмотрены некоторые аспекты и особенности применения СВЧ-электроники больших мощностей, включая вопросы генерации СВЧ-колебаний больших и сверхбольших уровней мощности, повышения эффективности применения мощного ЭМИ в энергоемких технологических процессах. Особенно выделены использование СВЧ-технологий в РЛС обнаружения (короткоимпульсные РЛС) и РТС для функционального подавления (поражения) полупроводниковой элементной базы (например, пробоя *p-n* переходов полупроводниковых приборов или термического разрушения проводящих и соединительных микроструктурных элементов интегральных микросхем [81 – 85, 263, 264]) [102 – 107].

Целью настоящей работы является попытка систематизировать накопленный опыт развития СВЧ-электроники больших и сверхбольших мощностей, провести анализ существующих способов генерации СВЧ-энергии, показать перспективные направления ее применения в энергоемких промышленных областях и бытовой сфере, а также совершенствования систем вооружения, в том числе ЭМ оружия.

### 1. ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МОЩНОГО ЭМИ

Рассмотрим существующие подходы к генерации и формированию мощного ЭМИ. Чтобы осуществить классификацию различных видов и форм представления ЭМИ, а также иметь возможность проводить их сравнение между собой, представим различные виды импульсов в виде математических моделей детерминированных сигналов.

На рис. 5 показаны возможные варианты форм представления импульсов как результат работы технологических установок для СВЧ-нагрева материалов и сред, а также РЛС или РТС, предназначенных для функционального поражения полупроводниковой элементной базы. Как видно, работа систем возможна как в непрерывном (квазинепрерывном), так и в импульсном режимах.

Для электромагнитного поля непрерывного сигнала в приближении плоской волны можно записать следующее выражение

$$E = E_m \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \varphi_0), \quad (4)$$

где  $E_m = const$  – максимальная амплитуда СВЧ-излучения;  $f = \frac{1}{T}$  – частота СВЧ-излучения;  $\varphi_0$  – начальная фаза сигнала [111].

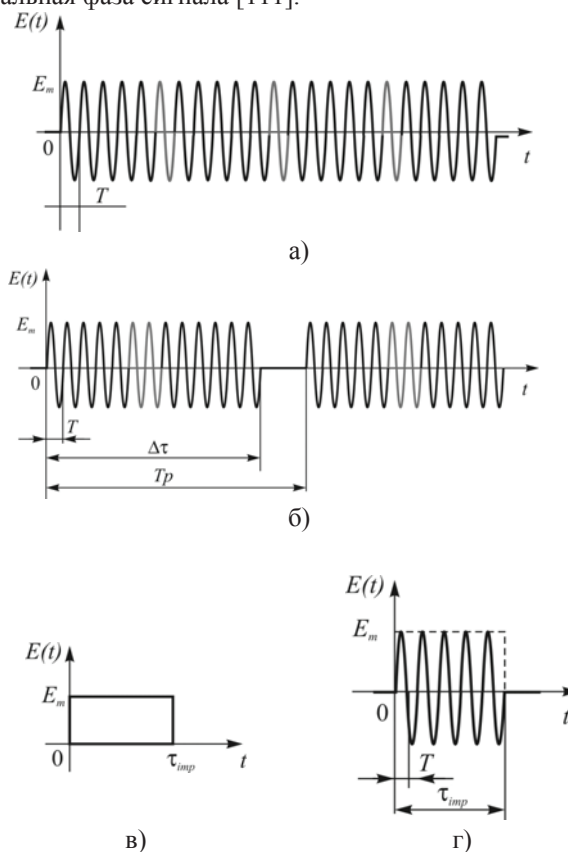


Рис. 5. Осциллограммы идеального непрерывного (а) и импульсных сигналов (б-г)

Такое представление непрерывного СВЧ-излучения можно рассматривать как идеализированную его форму, т.к. на практике любое непрерывное колебание существует в пределах конечного интервала времени  $\Delta T$  и может рассматриваться как квазинепрерывный сигнал с малой скважностью, т.е.  $\frac{T_p}{\tau_{imp}} \sim 1$ , где  $T_p$  – период следования импульсов ЭМИ;  $\tau_{imp}$  – длительность импульса (рис. 5, а).

На практике более распространенной формой представления ЭМИ является импульсная форма его реализации, когда ЭМИ существуют в пределах короткого интервала периода следования импульсов, т.е. в этом случае скважность  $\frac{T_p}{\tau_{imp}} \gg 1$ . Математическая модель такого сигнала (см., напр., рис. 5, б), определяемого как радиоимпульс, может быть пред-

ставлена в виде

$$E(t) = E_m(t) \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \varphi_0). \quad (5)$$

В выражении (5) первый множитель  $E_m(t)$  рассматривается как огибающая радиоимпульса  $E(t)$  и определяется как видеоимпульс, а второй множитель представляет собой его заполнение, т.е. несущую (вихревую) составляющую СВЧ-излучения. Необходимо отметить, что основное отличие между видеоимпульсом и радиоимпульсом заключается в различной физической природе формирования этих основных видов импульсов. В основе механизма формирования видеоимпульсов  $E_m(t)$  лежит электрическая природа их образования, что выражается в разделении и накоплении электрического заряда в области существования электростатического поля. При этом совершаемая работа по преодолению сил электростатического отталкивания зарядов переходит в энергию электрического поля, плотность которой является функцией времени и определяется как

$$\varpi(t) = \frac{dW}{dV} = \frac{\varepsilon \cdot e_m(t)^2}{8\pi}, \quad (6)$$

где  $e_m(t)$  – напряженность электростатического поля;  $\varepsilon$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды в области распределения электростатического поля. При достижении критической напряженности электростатического поля, когда  $e_m(t) > E_{\max}$ , происходит пробой в виде искровой разряда. В результате формируется видеоимпульс  $E_m(t)$ . При этом аналитическое выражение для  $E_m(t)$  можно с целью упрощения представить в виде математической модели прямоугольного непериодического импульса длительностью  $\tau_{imp}$  (рис. 5, в)

$$E_m(t) = \begin{cases} E_m \cdot npu & 0 \leq t \leq \tau_{imp} \\ 0 & npu \quad t < 0 \text{ и } t > \tau_{imp} \end{cases}. \quad (7)$$

Плотность энергии непериодического (одиночного) видеоимпульса, определяемая из выражения (6), распределена по частотному диапазону в соответствии с его спектральной функцией

$$\bar{S}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} E_m(t) \cdot e^{-j\omega t} dt. \quad (8)$$

Используя выражение (8) можно определить спектральное распределение энергии одиночного импульса, воспользовавшись теоремой Релея

$$\int_{-\infty}^{+\infty} E_m^2(t) dt = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{+\infty} |\bar{S}(\omega)|^2 d\omega. \quad (9)$$

Как показано в [112], левая часть данного выражения пропорциональна энергии импульса, которая выделяется в нагрузке как результат его действия. Отсюда полная энергия импульса равна площади, ограниченной кривой функции квадрата модуля спектральной плотности, т.е.

$$W \sim \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{+\infty} |\bar{S}(\omega)|^2 d\omega. \quad (10)$$

Как видно из (10), важно установить конечную ширину спектра одиночного импульса  $\Delta f$ , в которой сосредоточена основная часть его полной энергии  $W$ . Анализ распределения спектральной плотности  $\bar{S}(\omega)$  показывает [112], что подавляющая часть энергии сигнала (более 90 %) сосредоточена в полосе частот  $\Delta \omega = \frac{2\pi}{\tau_{imp}}$ . Отсюда видно, что ширина частотного спектра  $\Delta f$  зависит от длительности видеоимпульса  $\tau_{imp}$ . Данные величины для случая применения простых сигналов связаны между собой в первом приближении условием, которое называется базой сигнала и равно

$$\Delta f \cdot \tau_{imp} \approx 1. \quad (11)$$

Для сложных сигналов произведение ширины спектра  $\Delta f$  на длительность  $\tau_{imp}$  много больше единицы. К числу таких сигналов можно отнести линейно-частотно-модулированные, дискретно-кодированные, шумоподобные сигналы и т.п. [113, 114]. Данные сигналы нашли широкое применение в различных информационных и измерительных радиосистемах. В современной мощной СВЧ-энергетике широкое распространение получили простые сигналы с базой, близкой к единице.

## 2. ПОДХОДЫ К ГЕНЕРАЦИИ СВЧ ЭНЕРГИИ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Остановимся более детально на физических процессах и механизмах генерации больших уровней СВЧ-мощности, способах ее накопления и транспортировки, а также оценим условия обеспечения такой генерации, форму представления СВЧ-колебаний и способы фокусировки СВЧ энергии.

Для получения мощного СВЧ-излучения в настоящее время существуют следующие подходы, основанные на:

**а)** применении релятивистских СВЧ-приборов (генераторов и усилителей);

**б)** применении коротких и сверхкоротких видеоимпульсов (широкополосных и сверхширокополосных сигналов), генерируемых генераторами импульсного напряжения, собранных, например, по схеме,

предложенной Марксом (см. [Marx E. Deutsches Reichspatent № 455933, 1923]);

в) применении нерелятивистских СВЧ-приборов (генераторов и усилителей) совместно с резонансными СВЧ-компрессорами для формирования мощных радиоимпульсов СВЧ-излучения;

г) фокусировке мощного ЭМИ с помощью фазированных антенных решеток (ФАР) и пространственно-разнесенных систем излучателей (например, как показано в работе [160]).

Остановимся на анализе каждого из перечисленных подходов, уделяя основное внимание их преимуществам и недостаткам.

Случай а). Как известно [см., напр., 75, 115 – 117, 236], появление релятивистских СВЧ-приборов стало следствием развития и совершенствования конструкций сильноточных электронных ускорителей (СЭУ) прямого действия и, особенно, механизма индуцированного (вынужденного) излучения релятивистских электронных пучков (РЭП), которые генерировались в СЭУ. По сути, это заложило основы нового научного направления и стало новым разделом в мощной СВЧ-электронике, каким явилась релятивистская СВЧ-электроника. Основной ее задачей является получение мощного СВЧ ЭМИ (как импульсного, так и непрерывного) с помощью сильноточных электронных потоков с током  $I_e = 1...10^3$  кА (плотность тока эмиссии составляет  $10^7...10^9$  А/см<sup>2</sup>) и высоких ускоряющих напряжений, обеспечивающих энергию заряженных частиц  $W_e = 0,5...10$  МэВ [см., напр., 168 – 170].

Энергия частиц (электронов), движущихся с релятивистскими скоростями, определяется из выражения

$$W_e = m_e \cdot c^2 \cdot \gamma, \quad (12)$$

где  $m_e = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$  – текущая масса электрона;

$m_0 = 9,13 \cdot 10^{-31}$  кг – масса покоя электрона.

Из выражения (12) можно определить энергию покоя частицы как  $W_{e0} = mc^2$  (для электрона  $W_{e0} = 0,511$  МэВ).

Практическое применение сильноточных релятивистских электронных пучков и достижений высоковольтной техники в конце 60-х годов прошлого века позволили создать первые СЭУ и заложить основы нового направления, каким стала релятивистская СВЧ-электроника, основной задачей которой стало получение вынужденного излучения релятивистских электронных пучков (РЭП). Однако СЭУ не нашли применения для целей генерации мощного СВЧ-излучения, хотя проведенные эксперименты позволили получить уровни выходной мощности на 2–3 порядка превосходящие уровни мощности, которые

получались в нерелятивистских СВЧ-генераторах [см., напр., 116 – 120]. Первые образцы релятивистских СВЧ-генераторов позволили получить высокие уровни СВЧ-мощности (десятки [118, 119] и сотни мегаватт [120]), но при очень малых значениях КПД (не более 1 %). Следует также добавить, что их экспериментальные макеты представляли собой довольно громоздкие конструкции, обладающие кроме низкого КПД плохой воспроизводимостью импульсов и малым ресурсом работы. Это потребовало проведения дополнительных теоретических исследований и, в первую очередь, проведения анализа и классификации возможных форм ЭМИ электронного потока. Необходимо отметить, что движение заряженных частиц (электронов) сопровождается проявлением ряда радиационных эффектов, которые наблюдаются экспериментально в виде ЭМИ. Особенности проявления данных эффектов зависят от вида и характера траекторий движения электронов в выбранной системе координат, конфигурации пространства взаимодействия, а также от физических условий (например, наличия потенциальных электрического и статического магнитного полей, действие возбуждаемого электромагнитного поля и поля пространственного заряда и т.п.). Эти условия обеспечивают, с одной стороны, синхронное движение электронного потока и электромагнитной волны (колебаний поля), а с другой – механизм фазовой сортировки (или фазовой группировки) электронного потока [193]. Необходимо отметить, что возбуждение электромагнитного поля и увеличение его амплитуды происходит путем передачи энергии (кинетической или потенциальной), запасенной в электронном потоке, в энергию ЭМИ. Эффективность такого преобразования тем выше, чем ближе механизм фазовой сортировки к идеальному, т.е. когда все электроны, эмитированные в пространство взаимодействия, будут сортироваться в тормозящих фазах поля, отдавая ему запасенную (кинетическую или потенциальную) энергию. При этом величина энергии, которая накоплена в электронном пучке и может быть трансформирована в энергию ЭМИ, зависит от формы траектории электрона. Среди возможных траекторий движения электронов следует выделить как основные две – это прямолинейные и криволинейные (идеальный случай). На практике в большинстве известных СВЧ-генераторах и усилителях траектории электронов представляют собой сложные пространственные кривые. Результаты траекторного анализа, полученные на основе 2-D и 3-D компьютерного моделирования, показали, что в сформированных электронных пучках присутствует как продольное, так и поперечное движение электронов, что связано с различными возмущениями, вызванными, например, нарушением условий синхронизма, влиянием несинхронных полей и действием поля пространственного заряда [см., напр., 146, 165, 284]. В результате возможно формирование электронных пучков с раз-



личной пространственной конфигурацией границ и характером траекторий движения электронов, в том числе:

1. Прямолинейного электронного пучка конечного радиуса  $r_e$  с поперечными периодическими возмущениями, вызванными вращением электронов вокруг продольной оси. Пучок движется в коллинеарных потенциальном электрическом  $E_0$  и статическом магнитном  $B_0$  полях с постоянной продольной скоростью  $v_e = \sqrt{2\eta U_a}$ , где  $\eta = \frac{e}{m_0} = 17,5 \cdot 10^{-10}$  – при-

веденный заряд электрона, и находится в синхронизме с  $s$ -й пространственной гармоникой электромагнитной волны периодической замедляющей системы, т.е. выполняется условие, что  $v_e \approx v_s$  (условие синхронизма). Такой вид электронного пучка характерен для приборов типа О (ЛБВ и ЛОВ) и пролетных клистронов (как для одно-, так и для многоручевых их конструкций). Полагая, что полная скорость движения электронов в пучке равна

$$v_e = \sqrt{v_{e\parallel}^2 + v_{e\perp}^2}, \quad (13)$$

где  $v_{e\parallel}$  и  $v_{e\perp}$  – продольная и поперечная компоненты полной скорости.

В условиях наличия поперечного движения электронов в пучке выполняется условие, что  $v_{e\perp} \ll v_{e\parallel}$  и  $v_e \approx v_{e\parallel}$ , т.е. величина отношения их вращательной скорости  $v_{e\perp}$  к поступательной  $v_{e\parallel}$  (питч-фактор) незначительна. Как результат, в энергию ЭМИ переходит, в основном, часть кинетической энергии поступательного (продольного) движения электронов [145, 146].

2. Электронного потока с циклоидальными траекториями движения электронов, которые реализуются в приборах типа М как лучевых (ЛБВМ и ЛОВМ), так и с распределенной эмиссией (магнетрон, амплитрон, дематрон и т.п.). Наличие скрещенных статических электрического  $E_0$  и магнитного  $B_0$  полей заставляет электроны двигаться в подвижной системе координат по окружности, центр которой вращается со средней линейной скоростью  $v_e = E_0/B_0$ , где  $E_0 \approx U_a/d$ ;  $d$  – расстояние между электродами (катодом и анодом), м.

При таком характере траекторий электрон совершает поступательно-вращательное движение в продольном (азимутальном в системах с цилиндрической симметрией) направлении со средней линейной скоростью  $v_e$ , испытывая при этом периодические колебания в аксиальном направлении между экранами

катода (или отрицательного электрода) [165, 284]. Запасенная в электронном потоке потенциальная энергия переходит в энергию электромагнитного поля.

3. Винтообразного электронного пучка, в котором электроны двигаются по спиральным траекториям, обладая как поперечной, так и продольной составляющими скорости движения. Таким образом, полная скорость движения электронов определяется согласно (13). Особенность движения электрона по спиральной траектории заключается в значительной величине питч-фактора, т.е. выполняется условие  $v_{e\perp} \gg v_{e\parallel}$  и в энергию ЭМИ преобразуется, в основном, кинетическая энергия поперечного движения электронов. Для реализации аналогичного винтового электронного потока используются пространственно-ориентированные аксиально-симметричные статические электрическое и магнитное поля, формируемые в пространстве взаимодействия магнетронно-инжекторной пушки, имеющей особую конструкцию электродов [195 – 197].

4. Извилистой траектории электронов, близкой к синусоиде. Для получения такой траектории движения электронов используют магнитную систему (винтлер или ондулятор), создающую знакопеременное статическое магнитное поле, в котором происходит движение релятивистского электронного пучка. Излучение происходит из точек поворота электронов и распространяется в узком конусе вдоль оси пучка.

Таким образом, в зависимости от характера движения электронов в пучке возможна реализация различных типов взаимодействия электронного пучка с электромагнитной волной (полем) с различными механизмами преобразования энергии, запасенной в электронном потоке, в энергию ЭМИ.

Среди основных известных в настоящее время механизмов ЭМИ, сопровождающих работу релятивистских источников СВЧ-колебаний, следует отметить черенковское излучение (взаимодействие с замедленными волнами), переходное, дифракционное (или излучение Смита-Парселла применительно к оптическому диапазону), тормозное и магнитотормозное излучение (при наличии магнитного поля), а также его разновидности: синхротронное излучение или ондуляторное (для релятивистского случая) и циклотронное излучение (для случая движения нерелятивистских частиц) [121 – 126, 128 – 130, 148, 236, 237, 253]. Анализ показывает, что различные механизмы излучений имеют как общие, так и индивидуальные особенности своего проявления. В работе [127] было показано, что при существовании одного доминирующего вида излучения при определенных условиях возможна интерференция нескольких видов излучений. Как результат, выходные параметры СВЧ-источника будут зависеть от того насколько удачно подобраны условия взаимодействия электронов с электромагнитным полем с точки зрения эффек-



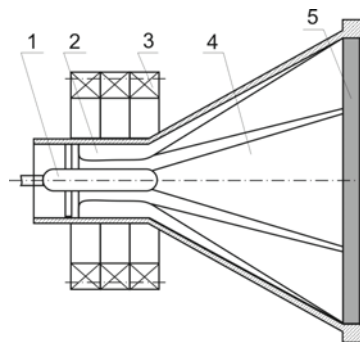
тивности преобразования энергии, запасенной в электронном потоке, в энергию электромагнитного поля. При этом следует также корректно и полно сформулировать требования к устройствам распространения и накопления электромагнитного поля (периодические и резонаторные электродинамические системы). Исследования, направленные на углубление понимания особенностей физики электромагнитных излучений, которые являются продуктом равномерного и прямолинейного движения электронного потока вблизи какой-либо неоднородности привели к созданию в СВЧ-электронике новых научных областей, в частности, таких как дифракционная и плазменная СВЧ-электроника [135, 149].

К числу мощных релятивистских источников СВЧ-колебаний с черенковским механизмом излучения можно отнести ЛОВ, резонансные ЛБВ, магнетрон и оротрон [75, 115, 128, 136 – 138, 142, 236 – 239, 278]. На данный момент СВЧ-источники с черенковским механизмом излучения позволили достичь максимальных уровней пиковой мощности ~ 3 ГВт в 3-см диапазоне длин волн и более 5 ГВт в 8-см диапазоне при длительностях СВЧ-импульса 1 – 10 нс [133, 134, 138], в том числе и на основе генерации сверхкоротких импульсов электромагнитного излучения (эффекта сверхизлучения) [143].

Значительные результаты получены при разработке релятивистских магнетронов [136, 137, 142, 153 – 158, 301, 302]. На созданных конструкциях данных приборов удалось получить уровни мощности от сотен мегаватт до единиц гигаватт при ускоряющих напряжениях от нескольких сотен кВ до 1 Мв и КПД 10 – 35 %. Важным результатом данных исследований является создание сверхмощных когерентных систем на основе взаимной синхронизации двух релятивистских магнетронов мощностью ~ 1,5 ГВт на частоте ~ 2,5 ГГц [152]. Данные результаты легли в основу исследований по синхронизации модулей, каждый из которых содержал от трех до семи релятивистских магнетронов [153, 154]. Представляют практический интерес исследования режимов суммирования и вычитания мощностей магнетронов. С этой целью использовались магнетроны, частота которых составляла 2,8 ГГц, выходная мощность 200 МВт, длительностью импульса излучения ~ 50 нс, длина волноводных линий связи – 7-8 длин волн [142]. Важно также отметить, что исследования конструкций релятивистских магнетронов проводились в разных режимах их

работы, в том числе  $\frac{\pi}{2}$  – виде (работа на -1 пространственной гармонике) [155] и  $\pi$  – виде [157, 158]. Работа на высших пространственных гармониках позволила получить мегаваттные уровни выходной импульсной мощности на частоте 37,5 ГГц [155]. Схематично конструкция данного релятивистского магнетрона с торцевым выводом мощного ЭМИ показана на рис. 6.

Важной особенностью проектирования релятивистских магнетронов является тот факт, что принципиальных отличий в методике расчета конструкций магнетронов на высокие напряжения по сравнению с низковольтными их аналогами не существует, а поэтому можно использовать классические методики проектирования магнетронных генераторов [см., напр., 136, 137, 301]. Основные сложности разработки релятивистских магнетронов, как показал анализ, связаны с вопросами управления эмиссионными процессами на катоде (взрывная эмиссия), вылета сильно точного электронного потока на анод и выделения высокой пиковой мощности, деградации и разрушения элементов (ламелей) анодного блока, проектирования вывода энергии и его элементов, выбор керамики с низкими потерями и т.п. Проведенные теоретические исследования на основе численного моделирования [см., напр., 301] позволили решить ряд проблем, в том числе и предложить идею создания релятивистского магнетрона с гладким анодным блоком и периодически расположенными по азимуту магнитами [302]. Некоторые из идей получили экспериментальное внедрение и показаны на рис. 6.



1 – катод ; 2 – анодный блок; 3 – магнитная система ; 4 – вывод энергии; 5 – керамическое окно

Рис. 6. Схема конструкции 8-мм релятивистского магнетрона [156]

Особого внимания заслуживают плазменные (в отличие от вакуумных) релятивистские СВЧ-приборы (генераторы и усилители) черенковского типа, различные аспекты работы которых изучались в [131, 139, 140, 150, 151]. Необходимо отметить, что появлению данных приборов предшествовало открытие пучковой неустойчивости, которая основана на черенковском резонансе [149]. Преимуществом данных приборов является возможность генерировать большие уровни мощности (десятки МВт) с КПД 5 – 7 % и осуществлять управление частотой излучения в широкой полосе частот  $f_{\max} / f_{\min} \approx 7$  за счет изменения концентрации плазмы в течение импульса напряжения. Это является основным отличием плазменных источников СВЧ-излучения от их вакуумных аналогов. Перестройка частоты излучения может быть получена как от импульса к импульсу, так и в пределах

каждого СВЧ-импульса. Так, например, в работе [139] в диапазоне частот 2 – 5 ГГц получена импульсная мощность 50 МВт длительностью до 70 нс с увеличением частоты в пределах одного импульса более чем 15 % с частотой их следования до 50 Гц. Данный экспериментальный результат является перспективным для последующей компрессии импульса, поскольку позволяет применять обычные волноводы с гладкими стенками и нормальной дисперсией.

Полученные экспериментальные результаты, связанные с высокими уровнями СВЧ-мощности и широкой рабочей полосой частот, позволяют оптимистично смотреть в будущее развитие пучково-плазменных технологий с точки зрения применения данных источников СВЧ-излучения в системах связи и радиолокации. Причем, высокие уровни непрерывного СВЧ-излучения дают надежду на их применение в высокотемпературных технологических процессах спекания керамических изделий, переработке радиоактивных отходов, компонентов химического оружия и очистки газов, а также в существующих технологиях СВЧ-нагрева [2, 3].

Генерация, формирование и применение сильноточных электронных пучков с током  $\sim 1 \div 10^6$  А и напряжениями  $\sim 10^4 \div 10^7$  В для решения разнообразных задач релятивистской СВЧ-электроники позволило расширить наши представления о предельных возможностях термоэмиссионных катодов (плотности тока эмиссии до нескольких десятков А/см<sup>2</sup> [141]), физике автоэлектронной (полевой) эмиссии [145, 146] и взрывной электронной эмиссии [141, 144, 147].

Близким по физическому механизму испускания электромагнитных волн к черенковскому излучению является переходное излучение [117, 124, 172 – 175]. Основное отличие переходного излучения от черенковского заключается в некогерентности [176], что ограничивает его широкое практическое применение. Необходимо отметить, что переходное излучение возникает при движении электронов вблизи неоднородностей на расстояниях порядка длины волны и только в интервалы времени, когда электрон пересекает границу раздела сред. Поэтому интенсивность переходного излучения гораздо слабее, чем, например, у черенковского излучения [см. 176]. Для увеличения мощности переходного излучения необходимо формировать сильноточные электронные пучки. Так, например, в первых экспериментах формировался электронный пучок мощностью 10 ГВт ( $U = 400 \dots 800$  кВ и  $I = 3 \dots 12$  кА), который пропусклся через металлическую трубку, имеющую скачкообразно меняющийся диаметр. В результате на выходе было получено ЭМИ в см-диапазоне длин волн с мощностью 100 кВт [172].

Типичным представителем СВЧ-приборов в этом случае являются пролетные клистроны, а также секционированные (гибридные) СВЧ-приборы на их основе. Например, секционированный прибор на основе

ЛБВ и клистроны [173]. Это дает возможность использовать в выходных секциях модулированные сильноточные электронные пучки, получая уровни мощности 500 ... 600 МВт с КПД до 20 % на частоте 3 ГГц. Применение режима автомодуляции сильноточного электронного пучка путем установки нескольких резонаторов вдоль трубки дрейфа позволяет довести уровень импульсной мощности ЭМИ до 10 ГВт [174].

Повышение уровня выходной мощности СВЧ-генераторов неразрывно связано с другой не менее важной задачей СВЧ-электроники – это поиск путей повышения частоты генерируемых (или усиливаемых) колебаний и продвижение в область мм волн и далее в терагерцовый диапазон длин волн. Основной проблемой при разработке СВЧ-генераторов в данных диапазонах является ограничения, которые накладываются на размеры пространства взаимодействия и электродинамические структуры (резонаторы и/или периодические замедляющие системы). Предполагается, что размеры указанных структур должны быть порядка длины волны генерируемых или усиливаемых колебаний [см., напр., 177]. Столь значительное уменьшение объема пространства взаимодействия, в котором происходит преобразование энергии, запасенной в электронном потоке, в электромагнитную энергию, не позволяет получать значительные уровни мощности. В этом случае требуется искать новые подходы и принципы получения индуцированного излучения электронов. Для этого используются криволинейные периодические траектории движения электронов в продольном статическом магнитном поле. В этом случае у электронов отбирается кинетическая энергия их орбитального (поперечного) движения. Поэтому для повышения КПД таких приборов следует искать пути формирования электронных пучков с большой энергией вращательного движения электронов.

Именно такой подход к решению проблемы создания мощных СВЧ-приборов в коротковолновой части мм-диапазона позволил отказаться от классических замедляющих структур и резонаторов. Вместо традиционных для классической СВЧ-электроники электродинамических структур применение нашли электронно-оптические и фокусирующие системы с размерами, значительно превышающие длину генерируемой волны. Это позволило преодолеть известные трудности и создать новый класс СВЧ-приборов, которые получили название *лазеров на циклотронном резонансе* (МЦР) [115, 189, 198, 304]. Первое упоминание о генерации на циклотронной частоте и СВЧ-излучении электронов, вращающихся в магнитном поле, было приведено в работах [148, 178 – 181] и экспериментально показано в [182 – 184]. Наличие большого количества обзоров литературы по этой тематике [см., напр., 75, 115, 185 – 189, 200] позволяет нам не останавливаться на более детальном изложении истории развития теории и прак-

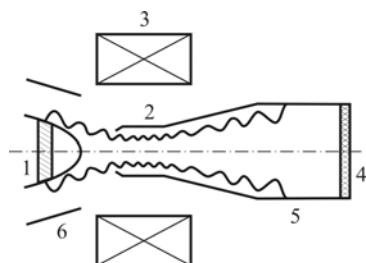
тики МЦР, особенностях и модификации их конструкций. В то же время с точки зрения теории излучения, достаточно подробно описанной, например, в [75, 115 – 117], следует отметить, что работа МЦР основана на использовании магнитотормозного индуцированного излучения и его разновидностей:

- для релятивистского уровня энергий частиц, т.е. при  $W_e > (0,5 \dots 1,0)$  МэВ (синхротронное излучение);
- для слаборелятивистского случая, когда  $W_e < 0,1$  кэВ (циклотронное излучение) [117].

Наиболее популярной разновидностью МЦР является гиротрон и различные варианты модификации его конструкции (гиросЛБВ, гироклистрон и т.п.) [117, 189, 198, 335 – 337].

На рис. 7 показана схема гиротрона. Данный прибор представляет собой открытый резонатор, который пронизывается винтообразным электронным потоком, излучение которого происходит в направлении, почти перпендикулярном к направлению поступательного движения электронов в магнитостатическом поле.

Значительным шагом в дальнейшем развитии релятивистских МЦР стало создание релятивистского МЦР-усилителя [309]. Данный усилитель работал в линейном режиме при ускоряющем напряжении 1,2 МВ и токе пучка 5 кА. Усилитель обеспечивал перестройку частоты в полосе 8,6 ... 9,4 ГГц и при входной мощности 100 кВт имел коэффициент усиления 16 дБ. На базе данного усилителя разработаны макеты МЦР-усилителя в 8-мм диапазоне [117].



1 – катод; 2 – анод; 3 – резонатор; 4 – соленоид; 5 – коллектор; 6 – окно вывода

Рис. 7. Схематическое изображение гиротрона [189]

В таблице 1 представлены данные некоторых релятивистских МЦР, которые генерировали СВЧ-импульсы наносекундной длительности.

Особый интерес вызывает продвижение МЦР в мм- и субмиллиметровый диапазоны [337]. В настоящий момент разработаны гиротроны в диапазонах 110, 140 и 170 ГГц с выходной импульсной мощностью до 1 МВт и КПД до 50 %. В усилительных гироклистронах в диапазоне 35 ГГц достигнута импульсная мощность 600 кВт (средняя мощность до 40 кВт) и КПД ~ 45 % [74].

Разновидностью магнитно-тормозного излучения является ондуляторное излучение, для возбуждения которого необходимо, чтобы релятивистские электроны двигались по извилистой петляющей траектории как показано на рис. 8 [14 – 17]. Данное излучение является следствием ускоренного движения электронов с релятивистской скоростью  $v_e$  в знакопеременном магнитном поле, образуемом  $N_d$  магнитными диполями с периодом  $l_0$ . Вынужденное излучение электронов, движущихся с релятивистскими скоростями в пространственно-периодическом статическом

Таблица 1  
Параметры релятивистских МЦР [163]

Длина волны, см	Выходная мощность, МВт	Энергия пучка, МэВ	Ток пучка, кА	Электр КПД, %	Источник
10	1500-2500	0,9-1,2	8	30	[305]
6	1000	3,3	80	1	[306]
3	60	0,3	1,2	15	[307]
2	350	0,35	40	-	[308]
0,8	8	0,6	15	-	[308]
0,4	2	0,6	15	-	[308]

магнитном поле, направлено в сторону движения пучка электронов и сфокусировано в телесном угле  $\Delta\theta$ . Представленная на рис. 8 схема взаимодействия лежит в основе работы лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) [190]\*\*). Такое название характеризует генерацию электромагнитного излучения в оптическом диапазоне, которое инициировано свободными релятивистскими электронами в вакууме, а не электронами, связанными с атомами активной среды (например, газа, кристалла и т.д.) классического лазера.

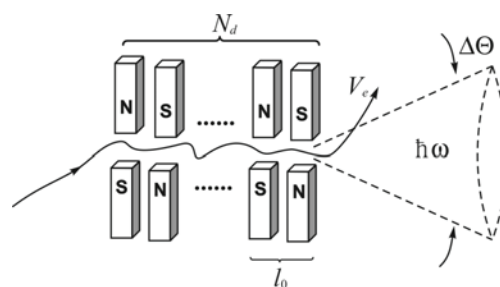


Рис. 8. Схема работы ЛСЭ

Особенность ЛСЭ – получение большого уровня мощности в диапазонах частот, недоступных нерелятивистским СВЧ-приборам, т.е. от терагерцового диапазона до рентгеновского. Так, например, один из первых ЛСЭ генерировал на длине волны 3,4 мкм импульсы с пиковой мощностью 7 кВт при средней мощности 0,4 Вт [310]. После оптимизации конструкции лазера, а также методик измерения параметров пучка и, непосредственно, лазерного излучения удалось повысить пиковую мощность излучения до 130 кВт, а среднюю мощность довести до 5 Вт [311].

\*\*\*) На схеме, представленной на рис. 8, для простоты отсутствует резонатор и не показаны зеркала.



Необходимо отметить, что с ростом частоты в ЛСЭ имели место проблемы, для решения которых потребовалось усовершенствовать конструкцию лазера, подбирая режим его работы, например, за счет выбора энергии электронов для поддержания стабильной отражающей способности зеркал. Так, в ЛСЭ генерирующего в видимой области спектра с длиной волны 0,64...0,65 мкм при уменьшении энергии электронов с 240 МэВ до энергий 160...166 МэВ удалось получить импульсную мощность 60 мВт при среднем ее значении 75 мкВт, что по оценкам составляло  $\sim 2,5 \cdot 10^{-5}$  от общей мощности синхротронного излучения [312].

Таким образом, создание релятивистских ЛСЭ позволило значительно продвинуться в освоении новых областей спектра электромагнитных колебаний, недоступных как приборам классической СВЧ-электроники, так и приборам квантовой электроники (лазерам).

Среди других релятивистских СВЧ-приборов, которые способны генерировать высокие уровни СВЧ-мощности, следует отметить электронные приборы с виртуальными катодами (ВК) [191, 192]. Основные результаты научных исследований, касающиеся физики процессов, принципов работы и особенностей конструкций различных систем с ВК, подробно изложены в [75, 199 – 211]. Наиболее широкое распространение среди приборов с ВК получили конструкции виркатора и отражательного СВЧ-триода. Не останавливаясь подробно на описании особенностей работы указанных приборов и возможных их модификаций, отметим здесь только предельные уровни параметров, которые получены на установках, в которых использовались различные конструкции приборов с ВК. Как показано в работе [209], в СВЧ-генераторах с ВК возможно реализовать генерацию СВЧ-импульсов мощностью  $10^8 \dots 10^9$  Вт, длительностью  $10^{-8} \dots 10^{-6}$  с и в диапазоне частот 3...40 ГГц. Особенностью некоторых типов СВЧ-генераторов с ВК (например, триод с ВК в коаксиальном исполнении [210, 211]) является малые весогабаритные характеристики, простота конструкции, отсутствие фокусирующего магнитного поля, возможность широкой перестройки частоты и управление прибором внешним сигналом. Рекордные уровни мощности 22 ГВт и 9 ГВт были получены с помощью виркаторов на установке «Aurora», Harry Diamond Labs, (USA) [212, 213]. При этом средняя мощность в импульсе составляла 4 ГВт на частотах менее 1 ГГц. Необходимо отметить, что указанный уровень мощности относится к генерации одиночных импульсов. При реализации режимов с генерацией периодических СВЧ-импульсов с большой частотой повторения уровень СВЧ-мощности падает и не превышает нескольких сотен мегаватт. Одновременно, невысокая эффективность данных генераторов, которая в большинстве экспериментов составляла единицы процентов, а в лучшем случае не превышала 12 – 15 %, затрудняет их практическое применение в силу гро-

мозкости лабораторных установок для формирования высоковольтных импульсов, дороговизны и сложности обслуживания. Поэтому важное место в проводимых исследованиях уделяется проблеме повышения эффективности СВЧ-генераторов, уменьшению длительности СВЧ-импульса, повышению частоты их следования, а также созданию малогабаритных сильноточных электронных ускорителей с энергией пучка до 300 кэВ, формирующих наносекундные СВЧ-импульсы [213]. Этому всячески способствуют достижения в области высоковольтной и ускорительной техники и связанные с применением новых наносекундных твердотельных генераторов высоковольтных импульсов с индуктивными накопителями энергии и полупроводниковыми прерывателями тока, обеспечивающих выходное напряжение в сотни киловольт на нагрузках в десятки-сотни Ом и частотами повторения импульсов более 3 кГц [214].

*Случай б).* Реализация режимов генерации мощных СВЧ-импульсов (с напряжением  $10^5 \dots 10^6$  В), обладающих малой длительностью (от единиц до десятков нс) и с частотой повторения от единиц до десятков герц представляет огромный научно-практический интерес. Это связано с созданием СЭУ для изучения взаимодействия мощных релятивистских электронных пучков с газами, плазмой и твердыми телами [168, 216 – 219], возникновения рентгеновского излучения при бомбардировке мишеней электронными пучками, ускорения различных элементарных частиц и формирования ионных пучков [220, 221].

В последнее время повышенный интерес к применению мощного ЭМИ связывается с разработкой портативных средств функционального поражения полупроводниковой элементной базы, составляющей основу работы радиоэлектронной аппаратуры [см., напр., 222, 223, 262 – 264]. При создании подобных систем для генерации мощного ЭМИ возможности традиционных подходов, основанных на достижениях релятивистской СВЧ-электроники, весьма ограничены и приходится сталкиваться со значительными трудностями [117]. Одним из возможных путей решения задачи генерации импульсных напряжений с амплитудой более  $10^5$  В является применение так называемых генераторов импульсного напряжения (или генераторов с умножением напряжения). Наиболее часто используемой электрической схемой построения таких генераторов является схема Маркса (генератор Маркса) [168, 169].

На рис. 9 приведена общая принципиальная схема генератора Маркса [166]. Как видно, несколько конденсаторов (в общем случае  $N$ ) емкостью  $C$  каждый соединены параллельно и заряжаются от источника постоянного питания через сопротивления  $R_1$  и зарядное сопротивление  $R_0$  до заданного напряжения  $U_1$ , которое равно напряжению источника

питания. Затем все емкости с помощью специального последовательного замыкания разрядников  $P_1 \dots P_N$  соединяются последовательно. Для этого используется специальный коммутирующий элемент, который создает разряд в первом разряднике  $P_1$ . Остальные разрядники  $P_2 \dots P_N$  пробиваются последовательно в результате перенапряжения, возникающем в разрядном промежутке. Важно отметить, что пробой и поддержание разряда на каждом разряднике следует обеспечивать до момента пробоя последнего разрядника. В результате напряжение между первой и последней емкостями увеличивается в  $N$  раз, т.е. на сопротивлении нагрузки  $R_2$  формируется импульс напряжения с амплитудой, близкой к  $N \cdot U_1$ . После окончания процесса разряда (моментом окончания разряда является гашение всех  $N$  разрядников), напряжение на всех конденсаторах становится равным нулю и процесс зарядки начинается снова через сопротивление  $R_0$ , которые служат развязкой по импульсному напряжению и выбираются из условия

$$R_0 \cdot C \gg \tau_{imp}, \quad (14)$$

где  $\tau_{imp}$  – длительность импульса, которая определяется величиной емкости  $C_0 = C/N$  и сопротивлением нагрузки  $R_2$ .

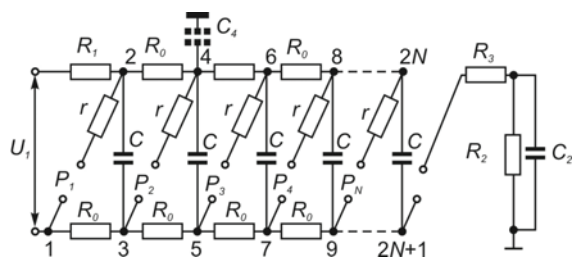


Рис. 9. Принципиальная схема генератора Маркса [166]

Сопротивления  $r$ , включаемые последовательно с разрядниками  $P_1 \dots P_N$ , служат для демпфирования колебаний на вершине импульса, а выбором величины сопротивления  $R_3$  корректируется его фронт. Следует отметить, что пробой и поддержание развития разряда до момента пробоя последнего разрядника в значительной степени зависят от паразитной емкости  $C_3$ . Более детальный анализ расчета всех элементов схемы Маркса представлен в [224].

В результате пробоя на нагрузке формируется высоковольтный импульс, обладающий энергией  $W_{pulse}$  при общем напряжении  $U_{peak}$  [225]. Общая емкость генератора определяется из выражения

$$W_{pulse} = \frac{1}{2} \cdot C_0 \cdot U_{peak}^2. \quad (15)$$

Величина общего сопротивления  $R$  выбирается из условия обеспечения требуемой постоянной времени  $\tau_d$  и равна

$$R = \frac{\tau_d}{C_0}. \quad (16)$$

Тогда зарядное сопротивление  $R_0$  (иногда вместо данного сопротивления используются дроссели) определяется как

$$R_0 = \frac{R}{2 \cdot N}. \quad (17)$$

Полагая, что каждый конденсатор имеет емкость равную

$$C = N \cdot C_0, \quad (16)$$

тогда его зарядное напряжение должно быть равным  $1/N$  от общего напряжения  $U_{peak}$ . Величина данного зарядного напряжения определяет конструкцию и геометрические размеры разрядников. Следует отметить, что для получения импульсов ЭМИ с большой амплитудой (высокое пробивное напряжение) и малой длительностью (единицы наносекунд) следует кроме выбора сопротивления нагрузки  $R_2$  и емкости ступени  $C$ , использовать сжатый газ (например, азот). Подбирая его давление в диапазоне от единиц до десятков атмосфер и контролируя напряженность поля в газоразрядном промежутке создаются условия для оптимального излучения.

На рис. 10 представлены возможные компактные конструкции генератора Маркса, разработанные на напряжение до 100 кВ [227, 228]. Как видно из рис. 10, а, представленная конструкция генератора Маркса содержит световод для стабилизации пробоя, образованный стенками камеры с отражающим покрытием 1, конденсаторы 2, которые вставлены и закреплены в цилиндр из диэлектрического материала (оргстекла) 3 и закреплены винтами из нейлона 4.

Заряд конденсаторов осуществлялся через сопротивления 5. Электроды разрядников представляли собой полусферы 6, которые крепились к конденсаторам с возможностью регулировки длины зазора. Давление азота в камере составляло  $\sim 3$  атм. Практическая реализация такой конструкции позволяет получать на нагрузке генератора короткие и мощные импульсы напряжения, представляющие собой видеоимпульсы.

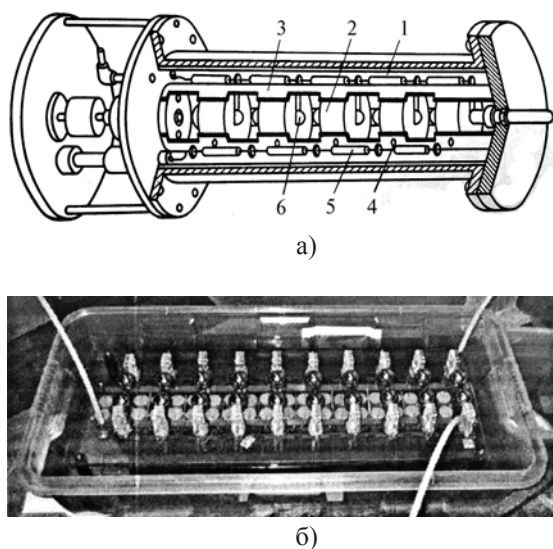


Рис. 10. Конструкции малогабаритных наносекундных генераторов Маркса [166, 227, 228]

На рис. 11 представлен вариант блок-схемы мощного генератора ЭМИ на основе схемы Маркса [222]. Данная схема включает источник высокого постоянного напряжения 1, блок электронного управления 2, генератор Маркса 3, устройство для подачи сжатого газа 4 и дипольную антенну 5.

Формы импульсов, формируемых на выходе генератора Маркса и излучаемых дипольной антенной на частоте 100 МГц в свободное пространство, приведены на рис. 12.

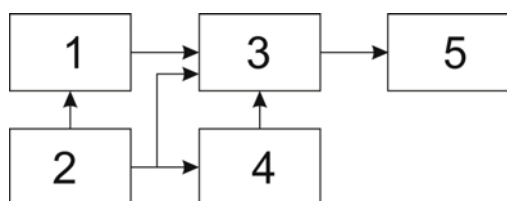


Рис. 11. Блок схема мощного источника ЭМИ

Радиоимпульс, излучаемый дипольной антенной, представляет собой затухающее гармоническое колебание. Математическая модель такого колебания имеет следующий вид

$$E(t) = E_{\max} \cdot e^{-\alpha t} \cos(2 \cdot \pi \cdot f' \cdot t + \varphi_0'), \quad (17)$$

где  $f'$  – частота колебания в спектре видеоимпульса, соответствующая максимальной амплитуде поля (см. рис. 12, б);  $E_{\max}$  – максимальная напряженность гармонической составляющей, соответствующая частоте  $f'$ ;  $\alpha$  – коэффициент затухания.

На рис. 13 представлены портативные конструкции двух вариантов построения генераторов мощных импульсов напряжения, разработанные фирмами Applied Physical Electronics L.C (APELC) (USA) и DIEHL

(Germany) [222, 223]. Основные параметры действующих генераторов Маркса приведены в таблице 2.

Альтернативой генератору Маркса является генерация мощных сверхкоротких наносекундных импульсов с помощью полупроводниковых ключей (переключателей) – *drift step-recovery diodes (DSRD) and transistors (DSRT)* [315]. В основе их работы лежит эффект резкого восстановления – *the drift step-recovery effect* [316]. Как утверждается в [315], с помощью разработанных генераторов возможно сформировать наносекундные импульсы с пиковой мощностью в сотни кВт, частотой следования сотни кГц в частотном диапазоне 50...600 МГц. Однако полученные результаты требуют основательного подтверждения и изучения для определения возможного практического применения таких генераторов.

Таким образом, полученные результаты позволяют рассматривать разработанные экспериментальные макеты на основе схемы Маркса как портативные средства радиоэлектронной борьбы, а сами устройства можно отнести к элементам ЭМ оружия с возможностями поражения полупроводниковой элементной базы мощными СВЧ-импульсами. Среди перспективных направлений дальнейшего развития и совершенствования представленных макетов на основе генератора Маркса следует отметить увеличения дальности их действия и обеспечения функционального поражения как неподвижных объектов, так и объектов, координаты которых изменяются во времени. В частности, активно рассматривается возможность применения подобных устройств для остановки автомобилей с электронной системой зажигания [223, 289].

*Случай в).* Одним из возможных путей значительного увеличения импульсной мощности СВЧ-колебаний является уменьшение длительности СВЧ-импульса за счет его «сжатия» во времени [163, 236, 253 – 255, 266 – 272]. Актуальность такого подхода объясняется возросшим интересом к генерации коротких и сверхкоротких СВЧ-импульсов с высокой пиковой мощностью (сотни мегаватт и более), длительностью до 1 нс и меньше, а также большой частотой следования (сотни герц) [73, 74, 166, 167, 320 – 322]. В первую очередь, это стало востребованным в разных странах мира: США, России, Великобритании, Китае и др. [243]. Интерес обусловлен не только для проведения чисто научных исследований в ускорительных лабораториях [323, 324], но также для решения различных задач, имеющих отношение к оборонным технологиям, в частности для разработки ЭМ оружия [242 – 249]. Это касается создания РТС для обнаружения малозаметных объектов на фоне пассивных помех, в том числе объектов в группе с резко отличными характеристиками рассеивания и в непосредственной близости от РЛС [74, 163, 256 – 261, 273], а также решения задачи функционального поражения полупроводниковых радиоэлектронных средств мощным потоком СВЧ-излучения [163, 233 –



235, 257 – 259, 262 – 265].

Следует отметить, что реализация процесса генерации таких СВЧ-импульсов методами релятивистской СВЧ-электроники сопряжена со значительными техническими и технологическими трудностями. Они обусловлены особенностями эксплуатации высоковольтного импульсного оборудования, высокими техническими требованиями к мощным быстродействующим коммутаторам, сложными физическими электронно-волновыми процессами, а также наличием ионизирующего излучения и необходимости принятия мер по защите от него. Поэтому для реализации режима формирования мощных СВЧ-импульсов следует использовать нерелятивистские импульсные СВЧ-источники с последующим сжатием (компрессией) СВЧ-импульсов. В последнем случае, интерес вызывает метод резонансной компрессии СВЧ-импульсов, суть которого заключается в медленном накоплении энергии в СВЧ-резонаторе и за-

тем быстрым ее выводе из высокочастотного резонатора в нагрузку (антенну) [163]. Несомненным преимуществом такого подхода формирования мощных СВЧ-импульсов наносекундной длительности, как показано в [275], является его простота реализации, возможность использования промышленных СВЧ-генераторов, а также стандартных элементов волноводной техники. Так, например, был разработан резонансный СВЧ-компрессор на основе СВЧ-генератора, в качестве которого использовался бытовой магнетрон М-105 с импульсной мощностью 1 кВт, длительностью импульса 2 мкс и частотой следования 10 кГц. Мощность СВЧ-импульсов на выходе компрессора составила 65 кВт при длительности 5 нс. Внутренний объем резонатора не герметизировался и был заполнен воздухом при атмосферном давлении.

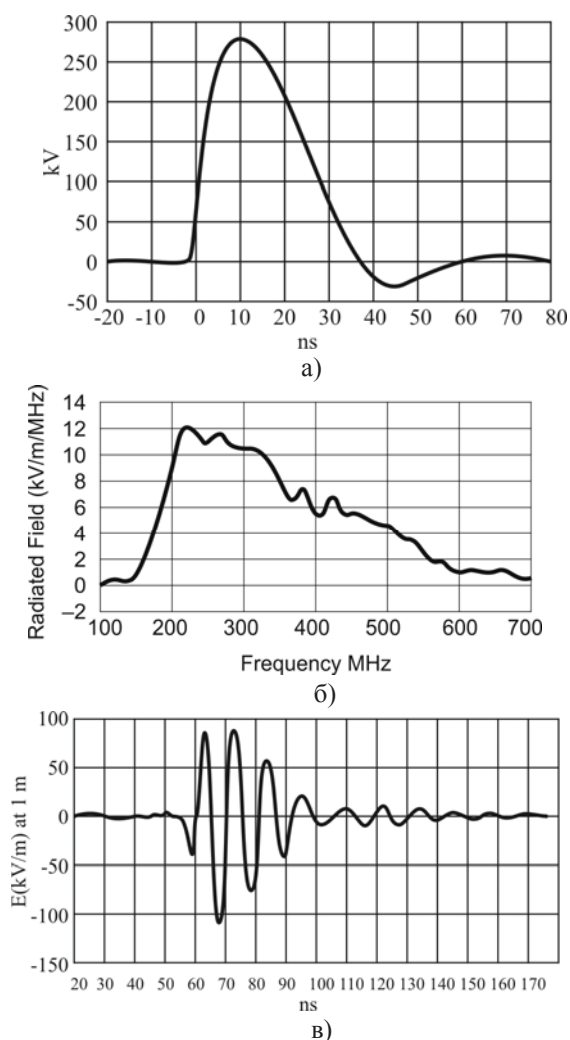
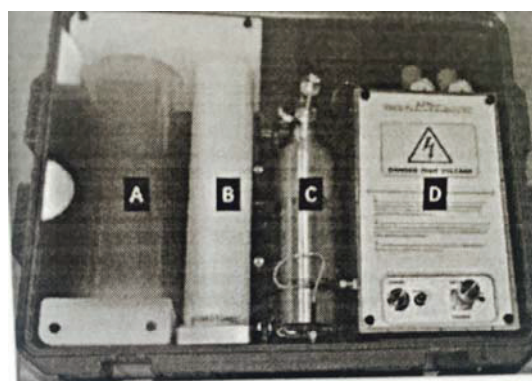
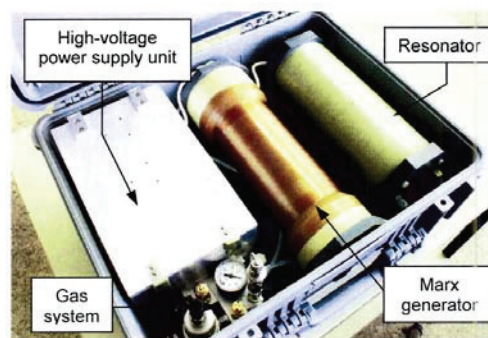


Рис. 12. Формы импульсов напряжения на выходе генератора Маркса во временной (а) и частотной (б) областях, а также форма СВЧ-импульса, излучаемого антенной в свободном пространстве на частоте 100 МГц (в) [222]



а – дипольная антенна; б – генератор Маркса; с – резервуар со сжатым газом; д – источник питания и система управления.



б)

Рис. 13. Переносные портативные конструкции мощных источников импульсного напряжения [222, 223]

На рис. 14 показана одна из возможных блок-схем устройства для реализации временной компрессии СВЧ-импульсов [273]. Данное устройство включает в себя: 1 – СВЧ-источник (генератор); 2 – фазовращатель; 3 – ферритовая развязка; 4 – СВЧ-резонатор; 5 – высоковольтный генератор поджигающих импульсов; 6 – нагрузка (антенна). В таблице 3 приведе-

ны достигнутые параметры при частоте следования СВЧ-импульсов не превышающей 400 Гц.

Таблица 2  
Сравнение значений основных параметров систем

Параметры и единицы измерения	Значения параметров и источники		
	[223]	[228]	[222]
1. Количество ступеней в генераторе Маркса, шт.	15	10	-
2. Максимальная энергия в импульсе, Дж	33,0	-	1,0
3. Емкость ступени генератора Маркса, нФ	2,8	3,3	-
4. Пиковое зарядное напряжение, кВ	40,0	25,0	-
5. Пиковое напряжение, кВ	600,0	300,0	300,0
6. Диапазон частот, МГц	50... 1000	800... 2000	250... 480
7. Максимальная частота повторения, Гц	200,0	-	> 5,0
8. Длина генератора Маркса, мм	788,0	70,0	-
9. Диаметр генератора Маркса, мм	153,0	25,0	-
10. Емкость, пФ	188,0	330,0	-
11. Расстояние до цели, м	~1,0	< 40,0	< 15,0

Анализ представленной на рис. 14 блок-схемы показывает, что наличие дополнительных потерь (например, обусловленных присутствием фазовращателя 2 и ферритового вентиля 3 снижает КПД устройства в целом. В [275] предложено объединить в одном приборе СВЧ-генератор накачки с формирователем, который включает в себя развязывающий элемент и внешний накопительный резонатор, реализуя, таким образом, более компактный и эффективный СВЧ-источник наносекундных радиоимпульсов. В качестве СВЧ-генератора использовался СВЧ-триод типа ГИ-6Б. В области более коротких длин волн следует использовать в качестве источника накачки магнетроны, клистроны, ЛОВ или виркаторы. В последнее время, интерес вызывает применение нерелятивистских 2- и 3-х мм магнетронов с холодным катодом и воздушным охлаждением [260]. Данные магнетроны имеют компактную конструкцию и обеспечивают значение импульсной мощности не менее 6 кВт, длительность импульса 0,05 ... 0,2 мкс, коэффициент заполнения 0,0005 ... 0,001, а также минимальную наработку не менее 2000 часов. Развитие и совершенствование конструкций магнетронов продолжается с перспективой стать основным СВЧ-источником для многих конструкций перспективных СВЧ-устройств и систем [276].

Как показано в [236, 277], все известные системы компрессии СВЧ-импульсов делятся на два основных типа – пассивные и активные.

Таблица 3

Основные параметры резонансных СВЧ-компрессоров [273]\*\*\*)

$f$ , ГГц	$P_{gen}$ , МВт	$P_{comp}$ , МВт	$\tau_{imp}$ , нс	$\eta$ , %	$L$ , м
1,0	0,3	20	10	21	1,5
2,8	1,3	190	4,2	22	0,9
2,8	1,0	22	20	18	2,5
9,4	0,05	2,5	3,2	18	0,35

В основе пассивной компрессии лежит изменение формы СВЧ-импульса при его прохождении через диспергирующую среду, например, волновод с плавно меняющейся гофрированной поверхностью [277] или волновод, заполненный плазмой [279]. Пассивные компрессоры не содержат элементов, электродинамические параметры которых изменяются во времени, а входной СВЧ-импульс, подаваемый на вход компрессора, представляет собой ЛЧМ-импульс. Это импульс, у которого разные спектральные составляющие распространяются со своими фазовыми скоростями. Подбором параметров модуляции и длины диспергирующего участка можно добиться, чтобы все частотные составляющие достигли выхода одновременно, что приведет к сжатию импульса. Широкое применение получили также пассивные компрессоры, увеличение мощности в которых достигается за счет инвертирования фазы сигнала на 180 градусов и последующим сложением данной волны в фазе с входным сигналом [280].

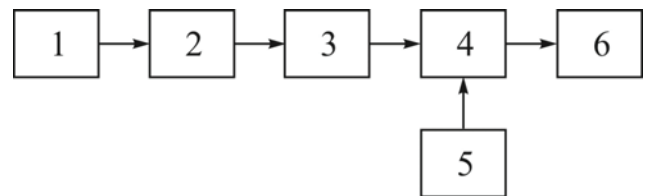


Рис. 14. Блок-схема устройства компрессии СВЧ-импульсов

В основе пассивной компрессии лежит изменение формы СВЧ-импульса при его прохождении через диспергирующую среду, например, волновод с плавно меняющейся гофрированной поверхностью [277] или волновод, заполненный плазмой [279]. Пассивные компрессоры не содержат элементов, электродинамические параметры которых изменяются во времени, а входной СВЧ-импульс, подаваемый на вход компрессора, представляет собой ЛЧМ-импульс. Это импульс, у которого разные спектральные составляющие распространяются со своими фазовыми скоростями.

\*\*\* $P_{gen}$  – импульсная мощность на выходе СВЧ-генератора;

$P_{comp}$  – импульсная мощность на выходе компрессора;  $L$  – длина резонатора.

Подбором параметров модуляции и длины диспергирующего участка можно добиться, чтобы все частотные составляющие достигли выхода одновременно, что приведет к сжатию импульса. Широкое применение получили также пассивные компрессоры, увеличение мощности в которых достигается за счет инвертирования фазы сигнала на 180 градусов и последующим сложением данной волны в фазе с входным сигналом [280].

Для сравнения работы разных СВЧ-компрессоров, их сравнения друг с другом используются следующие параметры [236]: коэффициент усиления по мощности, коэффициент компрессии и ее эффективность, которые определяются как

$$M = \frac{P_{out}}{P_{in}}, \quad C = \frac{\tau_{imp}^{in}}{\tau_{imp}^{out}}, \quad \eta_c = \frac{M}{C}, \quad (18)$$

где индексы “in” и “out” характеризуют мощность и длительность импульса на входе и выходе компрессора, соответственно.

Как правило, с увеличением коэффициента компрессии  $C$  эффективность компрессора  $\eta_c$  снижается.

Метод активной компрессии СВЧ-импульсов основан на накоплении электромагнитной энергии в высокочастотном резонаторе в течение относительно длительного времени с последующим быстрым ее выводом и был описан ранее (см. рис. 14). Основные физические принципы работы активных СВЧ компрессоров достаточно подробно описаны в [236, 281 – 283, 325, 326].

Следя рассуждениям, которые представлены в [327], можно показать, что мощность на выходе резонатора равна

$$P_{out} = P_{in} \cdot \frac{Q_0}{Q_{out}}, \quad (19)$$

а коэффициент усиления по мощности определяется как

$$M = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{Q_0}{Q_{out}} \approx \frac{\tau_{out}}{\tau_{in}}. \quad (20)$$

Как видно из (19), для достижения высоких значений коэффициента усиления по мощности в СВЧ компрессорах следует использовать резонаторы с высокой собственной добротностью  $Q_0$ , обеспечивая высокую связь с нагрузкой при выводе энергии из резонатора, т.е. понижая внешнюю добротность резонатора  $Q_{out}$ .

Для технической реализации конструкций активных компрессоров, в которых для накопления СВЧ энергии используются как обычные объемные медные резонаторы с добротностями  $10^2 \dots 10^3$ , так и сверхпроводящие резонаторы, имеющие добротности

$10^9 \dots 10^{11}$  и способные запасать энергию с объемной плотностью до  $\sim 16$  кДж/м<sup>3</sup> [267]. Это позволяет с учетом возможных потерь получить в объеме резонатора 1 дм<sup>3</sup> при длительности импульса 10 нс мощность  $\sim 1$  ГВт. В [268] экспериментально получен коэффициент усиления импульсной мощности по сравнению с мощностью СВЧ-генератора равный  $10^4$ . Данные результаты, как отмечено в [269], можно распространить и на случай применения обычных не-сверхпроводящих резонаторов со временем возбуждения  $\sim 10^{-6}$  с. Так, например, как показано в [74], применение резонансной компрессии позволило с помощью нерелятивистского СВЧ-генератора (например, магнетрона) в см-диапазоне получить импульсную мощность  $P_{imp} = 1 \dots 10$  МВт, с длительностью импульсов  $\tau_{imp} = 2 \dots 6$  мкс и частотой их следования (повторения)  $f_{imp} \approx 400 \dots 1000$  Гц.

Применение в качестве накопительных резонаторов коаксиальных конструкций [274], в отличие от волноводных резонаторов позволяет получать наибольшее усиление и наиболее короткие импульсы длительностью, равной нескольким периодам высокочастотного поля, с частотой следования до 20 кГц. Это связано с тем, что в отличие от полых волноводов коаксиальные линии более широкополосные и позволяют пропускать СВЧ-импульсы без искажения во время их формирования и вывода из компрессора.

Более детально возможные подходы к построению активных компрессоров изложены в [277]. Для повышения добротности резонаторов и увеличения энергии в сжатом импульсе, а также преодоления проблем, связанных с электрической прочностью коммутаторов, предлагается использовать многоходовые системы или сверхразмерные объемные резонаторы, а также резонаторы с электрически управляемыми плазменными коммутаторами [281 – 283, 328, 329].

*Случай з).* При анализе эффективности средств функционального поражения полупроводниковой элементной базы значительное внимание уделяется вопросам “доставки” ЭМИ непосредственно в точку нахождения или движения поражаемой цели для создания предельной напряженности электромагнитного поля, необходимой для поражения объекта. В этом плане актуальной становится задача не только формирования СВЧ-излучения в виде узконаправленного луча, но и последующая его фокусировка. Для этого используются антенные системы в виде ФАР на основе мощных СВЧ-генераторов: магнетронов или виркаторов. Основные требования к созданию ФАР, обеспечивающих электронное сканирование луча, подробно описаны и обсуждаются в обзорах [208, 313].

В монографии [160] обсуждаются методы создания ЭМИ с помощью перспективных антенных систем, а также сформулированы требования к временным и энергетическим характеристикам ЭМИ, кото-



рые обеспечивают функциональное поражение радиоэлектронных средств. Основные ожидания в этом направлении следует связывать с прогрессом совершенствования антенных систем, состоящих из многоэлементных фазосдвигающих устройств (фазированных решеток) и систем наведения луча.

Хотелось бы также отметить, что многие вопросы, связанные с электродинамикой процессов, которые имеют место на поверхности объектов после воздействия мощного СВЧ-импульса, остаются пока еще слабо изученными. Поэтому требуется проведение дальнейших, более детальных, исследований с помощью 2-D и 3-D компьютерного моделирования дифракционных задач, связанных с распространением ЭМИ в свободном пространстве с учетом его непосредственного воздействия на реальные объекты. Особое внимание в таких исследованиях следует уделять вопросам физики взаимодействия мощного ЭМИ с данными объектами.

### 3. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ МОЩНОГО ЭМИ

Более чем 60-летняя история изучения воздействия мощного ЭМИ на различные материалы, среды и объекты позволила определить и расставить приоритеты в его поступательном внедрении в различные сферы человеческой деятельности. Основные результаты такого внедрения достаточно подробно описаны и изложены в литературе [см., напр., 1 – 4, 236, 229, 241]. Поэтому попытаемся остановиться на примерах, которые не получили еще широкую популяризацию в научной литературе, но значимость которых в своих областях становится все более весомой.

Сферу применения СВЧ-электроники больших мощностей можно условно разделить на гражданскую и военную. К первой, можно отнести все, что связано с нетрадиционным применением СВЧ-энергии, а также СВЧ-приборов, обеспечивающих режим непрерывной генерации СВЧ-мощности. В качестве СВЧ-источника используются, как правило, магнетроны, которые благодаря высокому КПД (до 80 % и более) до настоящего времени остаются безальтернативно востребованными в технологических СВЧ-установках.

В приложении представлены освоенных и наиболее перспективных областей применения СВЧ-энергии. Данная таблица построена на основе проведенного анализа литературных данных и опубликованных результатов в бюллетенях «Сигнал – новости зарубежной СВЧ-техники» (БОНТИ НПП «Исток») за более, чем 35-летний период [36]. Фоном отмечены области, в которых наибольший эффект получен за счет применения СВЧ-энергии большой мощности. Дальнейшее развитие этих направлений может быть связано с оптимизацией технологических процессов, а также требует расширения номенклатуры магнетронов с точки зрения обеспечения необходимого уровня мощности в непрерывном режиме работы и частоты генерации [291, 293, 330, 331].

На рис. 15 и 16 приведены примеры применения СВЧ-энергии в порошковой металлургии для спекания металлических порошков и утилизации бытовых отходов [318, 319].

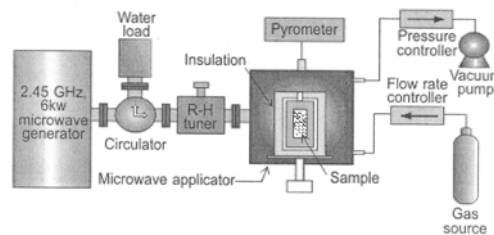


Рис. 15. Блок-схема установки для спекания порошков металлов [318]

В последнее время значительно возрос интерес к применению СВЧ-излучения миллиметрового диапазона, в частности, в 3-мм диапазоне. Как показывают проведенные исследования, именно в этом диапазоне проявляются специфические свойства СВЧ-нагрева при спекании наноструктурных керамических материалов, порошковых металлических и металлокерамических материалов и т.п. Для осуществления технологического процесса спекания в Институте прикладной физики РАН созданы специализированные гиротронные комплексы в диапазоне часто 24...84 ГГц с мощностью СВЧ-излучения 3...30 кВт.

Таким образом, широкие функциональные возможности СВЧ-технологий, основанные на отличительных положительных особенностях СВЧ-нагрева (в первую очередь, на имеющем место объемном поглощении СВЧ-энергии) позволяют рассматривать такие методы как экологически чистые, обеспечивающие однородность и быстроту нагрева изделий и материалов по сравнению с традиционными методами.

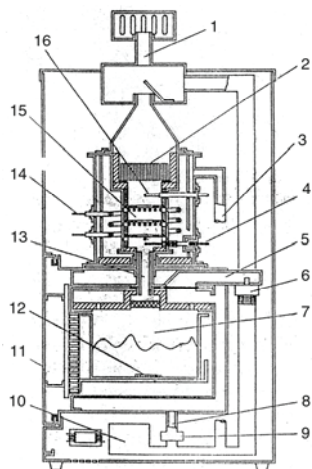
Традиционной областью СВЧ-электроники больших мощностей являются военно-технические приложения, реализуемые в интересах радиолокации, навигации, связи и т.п.

Тенденции развития радиолокационных систем сводятся к росту выходной импульсной мощности и укорочению длительности зондирующего импульса. Это позволяет повысить уровень помехозащищенности РЛС, пространственное разрешение и контрастность изображений цели. Для обеспечения таких условий работы следует использовать релятивистский СВЧ-источник с мощностью излучения ~ 0,5 ГВт, длительностью импульса ~ 5 нс, рабочей длиной волны 3 см и частотой следования импульсов 100 Гц.

На рис. 17 показан экспериментальный макет РЛС, на которой установлен релятивистский наносекундный СВЧ-генератор (на рисунке показаны передатчик, передающая и приемная антенны).

Практическое применение РЛС подобного типа сопряжено со значительными эксплуатационными затратами. Применение криогенной магнитной систе-

мы (сверхпроводящего соленоида) требует дополнительного ее охлаждения жидким азотом или гелием, что значительно осложняет обслуживание комплекса.



1 – выпускная труба; 2 – катализатор; 3 – воздух для второй камеры; 4 – электрод для поджига газов; 5 – волновод; 6 – магнетрон; 7 – основная камера; 8 – воздух для основной камеры; 9 – воздушный клапан; 10 – воздуховод; 11 – дверца; 12 – СВЧ поглотитель; 13 – трубки для пропуска газов; 14 – подогреватель; 15 – вторая камера сжигания; 16 – термометр

Рис. 16. Схема установки для уничтожения бытовых отходов [319]

В этом плане заслуживают внимания результаты, которые получены в [259], и связаны с созданием источника мощного СВЧ-излучения наносекундной длительности. Общий вид такого источника показан на рис. 18. В его состав входит СВЧ-генератор (магнетрон), резонансная система компрессии, антенная система (двухзеркальная параболическая антенна) и источник автономного питания. Принцип действия основан на временном сжатии энергии СВЧ-импульса с помощью двойной резонансной компрессии, которая позволяет получить коэффициент усиления 20 дБ и обеспечивает степень сжатия импульса ~ 1500.



Рис. 17. Внешний вид макета РЛС на основе релятивистского наносекундного СВЧ-генератора (ЛОВ) [278]

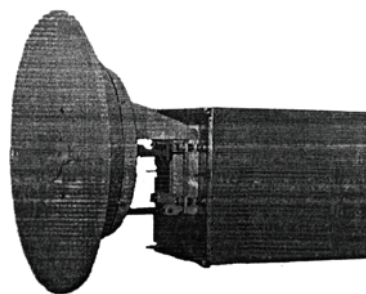


Рис. 18. Источник мощного СВЧ-излучения наносекундной длительности трехсантиметрового диапазона длин волн [259]

Основные технические характеристики источника: частота излучения 9,4 ГГц; длительность импульса 1 нс; частота следования импульсов 400 Гц; пиковая мощность 1 МВт (средняя мощность 800 Вт); масса 50 кг.

Аналогичная установка создана для работы в 2-х см диапазоне [257]. В последнее время рассматривается возможность разработки источника мощного ЭМИ в мм-диапазоне. Для этого предполагается использовать конструкцию магнетрона с двумя выводами энергии [333, 334].

Существуют портативные установки для формирования мощных наносекундных СВЧ-импульсов на основе генератора Маркса [222, 223, 228]. Основное их применение – функциональное поражение полупроводниковой элементной базы, которая наиболее подвержена действию мощного электромагнитного поля.

Процесс облучения современной радиоэлектронной аппаратуры мощными наносекундными СВЧ импульсами порождает эффект рассеивания нелинейными элементами (транзисторами, диодами, и т.п.) электромагнитных волн с наличием гармонических составляющих, которые отсутствуют в зондирующем сигнале. Так, например, при облучении объектов, содержащих полупроводниковые приборы, в отраженном сигнале наблюдается переизлучение преимущественно второй гармоники, которая будет иметь повышенный уровень по сравнению с другими гармониками (нелинейная радиолокация). Это позволяет проводить локацию объектов, содержащих нелинейные элементы даже при их скрытном расположении под землей на небольшой глубине или под снегом, а также в условиях вынужденной маскировки. В этом случае применение наносекундных СВЧ-импульсов обеспечивает высокое разрешение по дальности с точностью до  $\sim c \cdot \tau_{imp}$ .

На рис. 19 показан экспериментальный вариант мобильного нелинейного радиолокатора, в котором применена система сжатия радиоимпульсов коаксиальным резонансным СВЧ-компрессором. Данный вариант нелинейной РЛС обладает следующими параметрами: рабочая длина волны – 37 см; мощность

излучения – 20 МВт; длительность импульсов – 13 нс; частота следования – 800 Гц; коэффициент усиления по мощности – 20 дБ. К важной особенности данного нелинейного радиолокатора следует отнести тот факт, что создан он на основе штатной РЛС, в которой использовался магнетронный генератор, генерирующий СВЧ-импульсы длительностью  $\tau_{imp} = 3$  мкс, импульсной мощностью  $\sim 200$  кВт и с частотой следования 800 Гц. В качестве антенной системы применялись две рупорные антенны (рис. 19). Нижняя антенна является передающей, а верхняя используется для приема второй гармоники отраженного сигнала.



Рис. 19. Нелинейный радиолокатор [274]

Таким образом, применение режима сжатия СВЧ-импульсов позволяет активно развивать системы вооружения и расширять диапазон их боевого применения без значительных материальных и финансовых затрат.

### ВЫВОДЫ

СВЧ-электроника больших мощностей, сформировавшись как самостоятельная отрасль, именуемая СВЧ-энергетикой (или *High Power Microwave*), нашла широкое применение в научных исследованиях и технологических процессах многих отраслей науки и техники. Этому способствовал более чем 50-летний период теоретических и экспериментальных исследований в области физической электроники и электродинамики СВЧ, теории антенн и антенной техники, распространения электромагнитных волн и их взаимодействия со средами и объектами различной природы. Как результат [330], для применения в СВЧ-установках были разработаны серия нерелятивистских мощных СВЧ-генераторов (магнетронов непрерывного действия) для термической обработки больших объемов материалов (СВЧ нагрев) в диапазонах частот 152,5 МГц (мощностью сотни ватт для медицинских целей), 460 МГц (мощностью 50 кВт для промышленного нагрева и 300 Вт для медицинских целей), 915 МГц (мощностью 25 и 50 кВт для промышленности и 300 и 600 Вт для медицинских целей и лабораторных исследований), 2450 МГц (мощностью 0,8, 1,5, 3,0 и 5,0 кВт для бытового и промышленного применения). Накоплен опыт в экспериментальной разработке сверхмощных магнетронов в диапазоне частот 433 МГц (мощностью 100 и 300 кВт) и

915 МГц (мощностью 100 – 200 кВт).

Достижения релятивистской СВЧ-электроники позволили значительно повысить максимальный уровень импульсной мощности и создать СВЧ-источники (релятивистские магнетроны, гиротроны, виркаторы и т.д.), которые способны генерировать сверхмощные СВЧ-колебания  $\sim 10$  ГВт наносекундной длительности.

Прогноз развития мощных электровакуумных СВЧ-источников показывает [74], что исследования проводятся в направлении повышения уровня выходной мощности, расширения полосы усиливаемых частот, укорочения длины волны СВЧ-излучения и улучшение массогабаритных параметров СВЧ-генераторов.

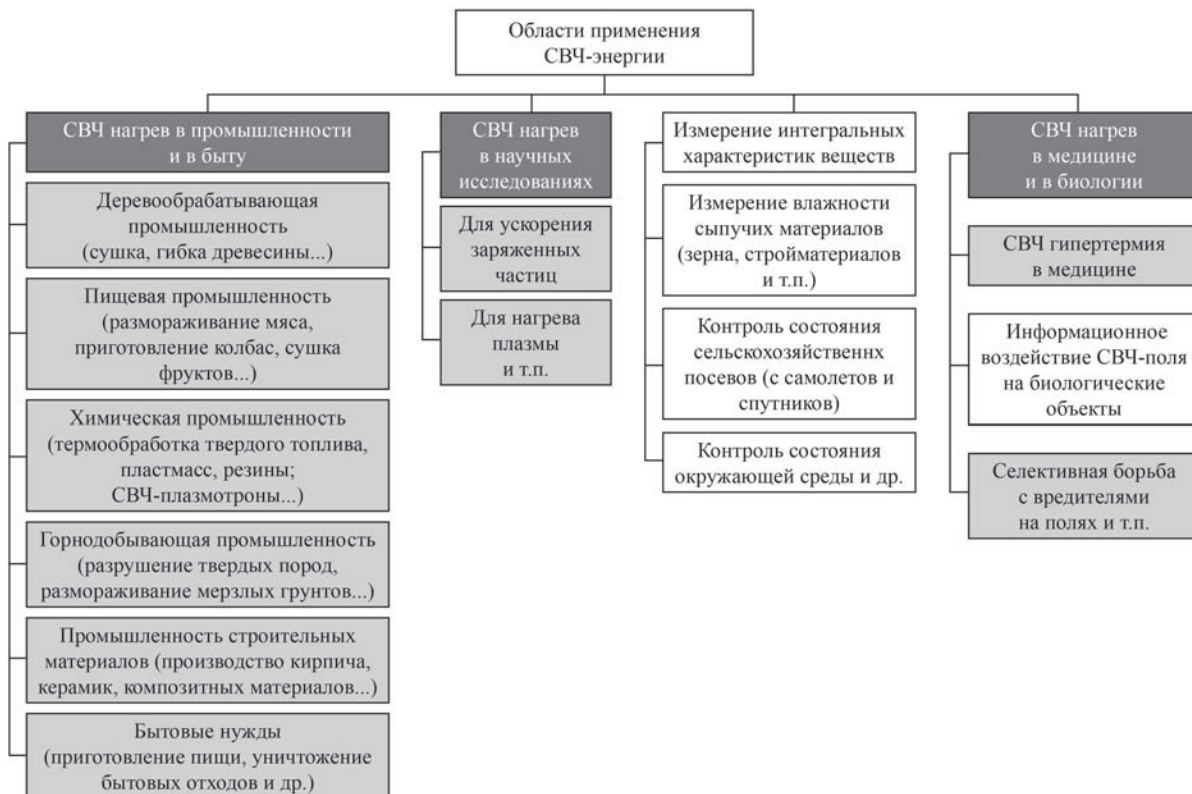
Другим направлением применения мощного импульсного СВЧ-излучения является сфера военных технологий и противодействие электромагнитному терроризму [90, 108, 229]. Создание высокоточного оружия меняет традиционную концепцию радиолокационного обнаружения объектов и заменяет ее распознаванием образов на больших расстояниях за счет высокого разрешения (системы радиовидения). В последнее время особый интерес вызывает появление данных о создании радиоэлектронного ЭМ оружия [109, 110, 229, 242 – 244] и его применении в сфере обнаружения радиоэлектронных систем (нелинейная радиолокация), а также системах РЭБ и РЭП для функционального поражения полупроводниковой элементной базы РЭА и РТС потенциального противника, в том числе компьютерной техники и сетей, активных ФАР РЛС и т.п. Подтверждением повышенного интереса к созданию и разработкам ЭМ оружия стало появление новой терминологии, которая более точно характеризует его возможности в потенциальных конфликтах с применением электронного оружия (*Electronic Warfare*).

В качестве источников для формирования мощных импульсов ЭМИ рассматриваются генераторы импульсного напряжения на основе схемы Маркса и СВЧ-модули, содержащие нерелятивистский СВЧ-генератор (магнетрон), резонансный СВЧ-компрессор и антенну [222, 223, 228, 257 – 259, 261]. Это позволяет создавать малогабаритные и недорогие СВЧ-установки для генерации наносекундных СВЧ-импульсов с пиковой мощностью до 1 МВт с длительностью 1...100 нс и частотой следования до нескольких килогерц. Для повышения надежности запуска и согласования СВЧ-генератора с компрессором в таких установках предлагается использовать магнетроны с двумя выводами энергии [333, 334].

Расширение сферы военных электронных технологий можно рассматривать как возможную перспективу применения мощных наносекундных СВЧ-импульсов в развитии современных систем вооружения и определения областей их боевого применения.



Сферы применения СВЧ-энергии



Автор выражает благодарность проф. А.А. Серкову за любезно предоставленные материалы, полезные обсуждения и советы, Исаевой Е.Б. и Сашковой Я.В. за помощь в подготовке материалов и оформлению графической информации, а также всему коллективу сотрудников лаборатории, которые принимали участие в подготовке рукописи к публикации.

**Литература**

- [1] Microwave Power Engineering. Edited by E.C. Okress. V. 1, 2. Academic press, New-York & London. 1968. СВЧ – энергетика. Т. 1. Генерирование, передача, выпрямление / Под ред. Э. Окреса. – М.: Изд-во Мир. 1970.
- [2] Диденко А.Н. СВЧ-энергетика. Теория и практика. – М.: Наука. 2003. – 445 с.
- [3] Диденко А.Н., Зверев Б.В. СВЧ-энергетика. – М.: Наука. 2000. – 262 с.
- [4] Капица П.Л. Электроника больших мощностей. – М.: Изд-во АН СССР. 1962. – 195 с.
- [5] C. E. Baum, “Reminiscences of High-Power Electromagnetics”, *IEEE Trans. EMC*, May 2007, pp 211-218.
- [6] Prather W.D., Giri D.V., and Gardner R.I., “Dr. Carl Baum: One Remarkable Career,” *Radio Science Bulletin (URSI)*, March 2005.
- [7] Sabbath F., Giri D.V., and Prather W.D., “Remembering Carl E. Baum,” *Proc. 30th URSI General Assembly*, Istanbul, Turkey, August 2011.
- [8] D.V. Giri, F.M. Tesche, and W.D. Prather, “Dr. Carl Edward Baum’s Life and Legacy,” *Proc. AP-S/URSI Conf.*, Spokane WA, July 2011.
- [9] Prather W.D., *Carl Baum’s Lasting Legacy. Book of Abstracts. EUROEM-2012*, 2-6 July 2012, Toulouse, France. – 20 p.
- [10] Баум К.Э. Новые методы нестационарного (широкополосного) анализа и синтеза антенн и рассеивателей. Труды Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, 1976, т. 64, № 11. – С. 53 – 74.
- [11] Астанин Л.Ю., Костылев А.А. Методы теоретического и экспериментального исследования нестационарного рассеивания и излучения электромагнитных волн. За рубежом радиоэлектроника, 1981, № 9. – С. 3 – 27.
- [12] Беннет С.Л., Росс Д.Ф. Время-импульсные электромагнитные процессы и их применение. Труды Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, 1978, т. 66, № 3. – С. 35 – 57.
- [13] Манькин И.А., Школьников В.Г. Сверхширокополосные сигналы в СВЧ системах. Часть 1. Нестационарные электромагнитные процессы и широкополосные системы. Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1983, вып. 3 (926). – 52 с.
- [14] Чудобяк У.Дж., Грей Р., Уайт Дж.С., Наносекундная импульсная РЛС X-диапазона. Труды Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, 1978, т. 66, № 4. – С. 186 – 188.
- [15] Бечмен. Некоторые последние достижения в технике измерений радиолокационного поперечного сечения. Труды Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, 1965, т. 53, № 8. – С. 1103 – 1114.
- [16] Астанин Л.Ю., Костылев А.А. Основы сверхшироко-

- полосных радиолокационных измерений. – М.: Радио и связь, 1989. – 191 с.
- [17] *Giri D.V.* High-Power Electromagnetics (HPEM). From the 1960s into the 21<sup>st</sup> century. *Book of Abstracts. EUROEM-2012*, 2-6 July 2012, Toulouse, France. – 16 p.
- [18] *Капица П.Л.* Электроника больших мощностей. – М.: Изд-во АН СССР. Сборник 2. 1963. – 166 с.
- [19] *Капица П.Л.* Электроника больших мощностей. – М.: Изд-во АН СССР. Сборник 3. 1964. – 243 с.
- [20] *Капица П.Л.* Электроника больших мощностей. – М.: Изд-во АН СССР. Сборник 6. 1969. – 188 с.
- [21] [https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic\\_spectrum](https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum)
- [22] *Аликаев В.В.* ВЧ и СВЧ-методы нагрева плазмы. – В кн.: Итоги науки и техники. Сер.: Физика плазмы, т. I, ч. 2, М., 1981. – С.80 – 99.
- [23] *Голант В.Е., Федоров В.И.* Высокочастотные методы нагрева плазмы в тороидальных термоядерных установках. – М.: Энергоатомиздат. 1986.
- [24] High-Frequency Plasma Heating. Ed. A.G. Litvak, AIP, New York. 1992.
- [25] *Файнберг Я.Б.* Физика плазмы. 1987, т. 13. – С. 607 – 625.
- [26] Мощный гиротрон 3-см диапазона для нагрева плазмы. Новости зарубежной СВЧ-техники. Сигнал, Бонти НПП «Исток», 21 (158), 1991. – 19 с.
- [27] XIV International Conf. on Infrared and MM-Wave, 1989, Conf. Digest, pp. 334-335.
- [28] Microwave & RF. – 1990. – Vol. 29, # 11. – P. 157-159.
- [29] *Overett T.* Phase locked magnetrons as accelerator RF sources / T. Overett, D. B. Remsen, E. Bowles etc. // IEEE Particle Accelerator Conference : int. conf., 16-19 mar. 1987. – Washington, USA 1987. – P. 1464–1465.
- [30] *Treado T.A.* Power-combining and injection-locking magnetrons for accelerator applications / T.A. Treado, T.A. Hansen, D.J. Jenkins // IEEE Particle Accelerator Conference : int. conf., 6-9 may 1991. – San Francisco, USA, 1991. – P. 702 – 704.
- [31] *Begin L.* Portable linac using a CW magnetron as power source / L. Begin, E. Black, H. Deruyter, etc. // IEEE Particle Accelerator Conference : int. conf., 22-26 june 1998. – Stockholm, Denmark, 1998. – P. 743 – 745.
- [32] *Glaser P.E.* Power from the Sun: its Future. Science, 1968, vol. 162, p. 857.
- [33] *Ванке В.А., Лопухин В.М., Савин В.Л.* Проблемы солнечных космических электростанций. Успехи физических наук, 1977, т. 123, вып. 4. – С. 633.
- [34] *Brown W. C.* Satellite power system (SPS) magnetron tube assessment study / W. C. Brown // NASA Contract NAS-8-33157 for MSFC. – July 10, 1980.
- [35] *Савин В.Л.* Проблемы и перспективы микроволновой передачи энергии. Научная сессия МИФИ-2008. Том 5. – С. 1.
- [36] Нетрадиционные применения СВЧ-энергии. Новости зарубежной СВЧ-техники. Сигнал, Бонти НПП «Исток», 20 (193), 1992. – 24 с.
- [37] *Викулов И.К.* Направления и результаты последних исследований в зарубежной СВЧ-электронике (по материалам международного симпозиума по СВЧ-технике 1991 года, Бостон (США)). Новости зарубежной СВЧ-техники. Сигнал, Бонти НПП «Исток», 23 (160), 1991. – 26 с.
- [38] Microwave Journal. – 1991. Vol. 34, No 2, pp. 26-36.
- [39] *Rosen A., Rosen H.D.* RF/Microwaves in Medical Application, and Future Research. IEEE MTT-S Newsletter, # 148, Spring 35-44.1998, pp. 35-44.
- [40] *Osepchuk J. M.* Microwave power applications / J. M. Osepchuk // IEEE on MTT. – 2002. – Vol. 50, №. 3. – P. 975 – 985.
- [41] *Edgar R. H.* Consumer, commercial, and industrial microwave ovens and heating systems / R. H. Edgar, J. M. Osepchuk. – Eds. New York : Marcel Dekker, 2001. – P. 215–278.
- [42] *Deruyter H.* Portable CW linac for commercial applications / H. Deruyter, R. Foose, A. V. Mishin etc. // IEEE Particle Accelerator Conference : int. conf., 29 mar.-2 apr. 1999. – New York, USA, 1999. – P. 590 – 591.
- [43] *Khan A.M.* A PLL based automated magnetron tuning mechanism for electron accelerators / A.M. Khan, M. Mahfooz, G. Sanjeev // Institute of Physics. – 2008. – № 25. – P. 1 – 10.
- [44] *Neubauer M.* Phase and frequency locked magnetrons for SRF Sources / M. Neubauer, R. P. Johnson, M. Popovic etc. // Particle Accelerator Conference : int. conf., 4-8 may 2009. – Vancouver, Canada, 2009. – P. 852 – 854.
- [45] *Overett T.* Phase locked magnetrons as accelerator RF sources / T. Overett, D. B. Remsen, E. Bowles etc. // IEEE Particle Accelerator Conference : int. conf., 16-19 mar. 1987. – Washington, USA 1987. – P. 1464 – 1465.
- [46] *Treado T.A.* Power-combining and injection-locking magnetrons for accelerator applications / T.A. Treado, T.A. Hansen, D.J. Jenkins // IEEE Particle Accelerator Conference : int. conf., 6-9 may 1991. – San Francisco, USA, 1991. – P. 702 – 704.
- [47] *Konrad G.T.* Application of Magnetrons with Medical Linear Accelerator / G.T. Konrad // Proceeding of the 1st International Workshop on Crossed-Field Devices, 15-16 August 1995. – Ann Arbor, USA, 1995. – P. 89 – 95.
- [48] *Shinohara N.* Solar power station/satellite (SPS) with phase controlled magnetrons / N. Shinohara, H. Matsumoto, K. Hashimoto // General Assembly for the International Radio Science Union : int. conf., 9-12 jan. 2002. – Boulder, USA, 2002. –P. 1475.
- [49] *Dickinson R.M.* Magnetron directional amplifier space solar power beamer concept design / R.M. Dickinson // 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit : int. conf., 24-28 july 2000. – Las Vegas, USA, 2000. – vol. 2. – P. 1469 – 1479.
- [50] *Matsumoto H.* New microwave tubes requirements for future SPS / H. Matsumoto, N. Shinohara //IEEE IVEC : int. conf., 28-30 May 2003. – Seoul, South Korea, 2003. – P. 6 – 7.
- [51] *Shinohara N.* Solar power station/satellite (SPS) with phase controlled magnetrons / N. Shinohara, H. Matsumoto, K. Hashimoto // IEICE Trans. Electron. – 2003. – vol. E86-C, No. 8. – P. 1550 – 1555.
- [52] *Shinohara N.* Phased array technology with phase and amplitude controlled magnetron for microwave power transmission / Shinohara N., Matsumoto H. // 4th International Conference on Solar Power from Space : int. conf., 30 june-2 july 2004. – Granada, Spain, 2004. – P. 117 – 124.
- [53] *Shinohara N.* Design of space solar power system (SSPS) with phase and amplitude controlled magnetron / N. Shinohara, H. Matsumoto // Radio science conference : int. conf., 18 march 2004. – Cairo, Egypt, 2004. – P. 624 – 626.
- [54] *Shinohara N.* Study on ubiquitous power source with microwave power transmission / N. Shinohara, T. Mitani, H. Matsumoto // General Assembly for the International Radio

- Science Union : int. conf., 21-29 oct. 2005. - New Delhi, India, 2005. – P. 10 – 14.
- [55] *Shinohara N.* Development of phase and amplitude controlled magnetron / N. Shinohara, T. Mitani, H. Matsumoto // *IEEE IVEC* : int. conf., 20-22 apr. 2005. – Noordwijk aan Zee, Netherlands, 2005. – P. 61 – 64.
- [56] *Mitani T.* Study on high-efficiency and low-noise wireless power transmission for solar power station/satellite sustainable energy and the environment / T. Mitani, N. Shinohara, K. Hashimoto etc. // *Sustainable energy and environment : the 2nd joint int. conf.*, 21-23 nov. 2006. – Bangkok, Thailand, 2006. – P. 1 – 3.
- [57] *Mitani T.* A study of oven magnetrons toward a transmitter for space applications / T. Mitani, H. Kawasaki, N. Shinohara etc. // *IEEE IVEC Int. Conf.*, 28-30 apr. 2009. - Rome, Italy, 2009. – P. 323 – 324.
- [58] *Shinohara N.* Recent wireless power transmission technologies in japan for space solar power station/satellite / N. Shinohara, S. Kawasaki // *IEEE Radio and Wireless Symposium : int. conf.*, 18-22 jan. 2009.- San Diego, USA, 2009. – P. 13 – 15.
- [59] *Sheik M. S.* Wireless power transmission – A next generation power transmission system / S. Sheik M., K. Ramasamy, T. Shanmuganantham // *International Journal of Computer Applications*. – 2010. – Volume 1, No. 13. – P. 102 – 105.
- [60] *Sheik M. S.* Wireless power transmission – A next generation power transmission system / S. Sheik M., K. Ramasamy, T. Shanmuganantham // *International Journal of Computer Applications*. – 2010. – Volume 1, No. 13. – P. 102 – 105.
- [61] *Королев А.Н.* Очистка текстильных материалов с помощью СВЧ-энергии / А.Н. Королев, Н.В. Абакумов, Е.В. Мицук и др. // *Электронная техника, сер. 1, СВЧ техника*. – 2007. – Вып. 1(489). – С. 107–108.
- [62] *Макаров В.Н.* Особенности микроволнового размораживания объемных биологических объектов / В.Н. Макаров // *Биомедицинская радиоэлектроника*. – 1999. – № 8.
- [63] *Макаров В.Н.* Криотерм 600. Размораживание органов и тканей после консервации / В.Н. Макаров // *Электроника: наука, технология, бизнес*. – 1999, № 1.
- [64] *Макаров В.Н.* Коагуляция тканей при хирургической операции / В.Н. Макаров // *Электроника: наука, технология, бизнес*. – 1998, № 3 – 4.
- [65] *Готье С.В.* Экспериментальное обоснование возможности применения контактного импульсного АИГ-НД лазерного и микроволнового скальпеля в хирургии / С.В. Готье, В.Н. Макаров, Г.Ф. Шереметьева // *Хирургия печени : матер. симпоз. с уч. спец.* – М., 1990. – С. 91 – 92.
- [66] *Ванке В.А.* СВЧ-электроника – перспективы в космической энергетике. *Электроника: Наука. Технология. Бизнес*. № 5, 2007. – С. 12 – 15.
- [67] *Brown W. C.* Beamed microwave power transmission and its application to space / W. C. Brown, E. E. Eaves // *IEEE Trans. on MTT*. – 1992. – Vol. 40, №. 6. – P. 1239 – 1250.
- [68] *Nikola Tesla* On His Work With Alternating Currents and Their Application to Wireless Telegraphy, Telephony and Transmission of Power, 1896. – P. 26 – 29.
- [69] *Nikola Tesla*: Guided Weapons & Computer Technology, 1902.
- [70] *Гриликес В.А.* Солнечные космические электростанции. – Л.: Наука, 1986.
- [71] *Нариманов Е.А.* Космические солнечные электростанции. – М.: Знание, 1991.
- [72] ДСУ. Прилади НВЧ. Методи вимірювання потужності від 1 кВт. ГОСТ 18127-72.
- [73] *Диденко А.Н., Юшков Ю.Г.* Мощные СВЧ-импульсы наносекундной длительности. – М.: Энергоатомиздат. 1984. – 111 с.
- [74] *Ушаков А.Б.* Об основных достижениях и направлениях развития мощных электровакуумных СВЧ-приборов. *Успехи современной радиоэлектроники*, № 5, 2004. – С. 41 – 45.
- [75] *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т.2. – М.: Физматлит. 2004. – 646 с.
- [76] *Ширман Я.Д., Манжос Р.Н.* Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
- [77] *Небабин В.Г., Сергеев В.В.* Методы и техника радиолокационного распознавания. – М.: Радио и связь 1984. – 220 с.
- [78] *Горелик А.Л. и др.* Селекция и распознавание на основе локационной информации. – М.: Радио и связь. 1990. – 240 с.
- [79] *Костенко А.А., Хлопов Г.И.* Когерентные системы ближней и сверхближней радиолокации миллиметрового диапазона. – Харьков: ИПЦ «Контраст», 2015. – 325 с.
- [80] *Андреев Г.А., Базарский О.В., Глауберман А.С. и др.* Визуализация и преобразование электромагнитных волн миллиметрового диапазона. *Зарубежная радиоэлектроника*. 1984, № 11. – С. 3 – 27.
- [81] *Starostenko V.V., Taran Ye.P., Churyumov G.I. and other.* Near Field Zone of a Integrated Circuit Exposed to an Electromagnetic Wave in a Waveguide. *Technical Physics Letters*, Vol. 29, No. 1, 2003. – P. 29 – 31.
- [82] *Григорьев Е.В., Старостенко В.В., Таран Е.Н., Чурюмов Г.И.* Влияние магнитной компоненты воздействующей электромагнитной волны на процессы в микроструктурных элементах интегральных микросхем. *Прикладная радиоэлектроника*. 2004, т. 3, № 1. – С. 53 – 57.
- [83] *Зуев С.А., Старостенко В.В., Терещенко В.Ю., Чурюмов Г.И., Унжаков Д.А., Григорьев Е.В.* Лавинный пробой в полевых транзисторах с затвором Шоттки на GaAs по результатам численного моделирования. *Прикладная радиоэлектроника*. 2005, т. 4, № 3. – С. 353 – 358.
- [84] *Грибский М.П., Григорьев Е.В., Зуев С.А., Старостенко В.В., Чурюмов Г.И., Унжаков Д.А.* Воздействие импульсных электромагнитных полей на экранированные микросхемы. *Прикладная радиоэлектроника*. 2007, т. 6, № 4. – С. 590 – 594.
- [85] *Churyumov G.I. and other.* Wunsch-Bell Criterial Dependence for Si and GaAs Schottky-Barrier Field-Effect Transistors. *Ultra-Wideband, Short Pulse Electromagnetics 9*. – Springer, 2010. – 522 с.
- [86] *Booske J.H., Dobbs R.J., Joys C.D., and other.* Vacuum Electronic High Power Terahertz Sources. *IEEE Trans. On Terahertz Science and Technologies*, vol. 1, # 1, September 2011. – P. 35 – 47.
- [87] *Fortov V., Parfenov Yu., Siniy I., and Zdoukhov L.*, “Russian Research of International Electromagnetic Disturbances over the Past Ten Years”, *Proceedings of the AMEREM 2006, Albuquerque (NM USA), July 2006*.
- [88] *Hoad R. and Sutherland*, “The Forensic Utility on Detect-



- ing Disruptive Electromagnetic Interference”, Proceeding of the 6<sup>th</sup> European Conference on Information Warfare and Security (ECIW 2007), July 2007.
- [89] Sabath F., “What Can be Learned from Documented International Electromagnetic Interference (IEMI) Attacks”, General Assembly and Scientific Symposium, 2011 XXXth URSI, 13-20 August 2011, pp. 1-4.
- [90] Sabath F., Threat of Electromagnetic Terrorism. *Book of Abstracts. EUROEM-2012*, 2-6 July 2012, Toulouse, France. – 17 p.
- [91] Kreth A., Doering O., Genender E., and Garbe H., Pre-detection for the Identification of Electromagnetic Attacks against Airports. *Book of Abstracts. EUROEM-2012*, 2-6 July 2012, Toulouse, France. – 81 p.
- [92] Rohe M. And Koch M., Breakdown Behavior of a Wireless Communication Network under UWB Impact. *Book of Abstracts. EUROEM-2012*, 2-6 July 2012, Toulouse, France. – 84 p.
- [93] Liang Zhou, Liang Lin, Wei Luo, and Wen-Yan Yin, Effects of Injected Electromagnetic Pulse (EMP) on the Failure of RF Power Amplifiers (PA). *Book of Abstracts. EUROEM-2012*, 2-6 July 2012, Toulouse, France. – 101 p.
- [94] Hoad R. and Radasky W.A., Progress in IEC SC77C Standards. *Book of Abstracts. EUROEM-2012*, 2-6 July 2012, Toulouse, France. – 59 p.
- [95] IEC/TR 61000-1-5, Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 1-5: General – High-Power Electromagnetic (HPEM) Effects on Civil Systems, 2004.
- [96] IEC/TR 61000-2-13, Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 2-13: Environments – High-Power Electromagnetic (HPEM) Environments – Radiated and Conducted, 2004.
- [97] IEC/TR 61000-4-35, Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-35: Testing and Measurement Techniques – High-Power Electromagnetic (HPEM) Simulator Compendium, 2009.
- [98] IEC/TR 61000-5-9, Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 5-9: Installation and Mitigation Guidelines – System-Level Susceptibility Assessments for High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and High-Power Electromagnetic (HPEM), 2009.
- [99] Sakharov K., Mikheev Ye., and Turkin V.A., National Standard of Russian Federation. *Book of Abstracts. EUROEM-2012*, 2-6 July 2012, Toulouse, France. – 90 p.
- [100] Picard N., Mazen S., Beillard B., Joly J.C., and Tournardre T., Radiated Susceptibility of Automotive Electronics: Car Stopper Application. *Book of Abstracts. EUROEM-2012*, 2-6 July 2012, Toulouse, France. – 50 p.
- [101] Picard N., Mazen S., Beillard B., Joly J.C., and Tournardre T., Electronic Disruptions by Radar Pulse: Car Stopper Application. *Book of Abstracts. EUROEM-2012*, 2-6 July 2012, Toulouse, France. – 109 p.
- [102] Толкачев А.А. О некоторых тенденциях развития радиолокационных и связных систем. Вакуумная СВЧ электроника. Сборник обзоров. – Нижний Новгород. 2002. СС. 7-13.
- [103] Military critical technology list. Section 8 : Electronics technology : undersecretary of defense, acquisition, technology and logistics // Pentagon, USA, September, 2006. – PP. 1-108.
- [104] Ребров С.И. Военная СВЧ-электроника в России / С.И. Ребров // Электронная техника, сер. 1, СВЧ техника. – 2009. – № 1 (500). – С. 71 – 76.
- [105] Nickel H.U., Zovo J., Schmid M. Refining Radar Architectures. *IEEE Microwave Magazine*, May 2016. V. 17, # 5. pp. 60 – 74.
- [106] Добыкин В.Д. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / В.Д. Добыкин, А.И. Куприянов, В.Г. Пономарев, Л.Н. Шустов ; под ред. А.И. Куприянова. – М. : Вузовская книга, 2007. – 468 с.
- [107] Житковский В.Д., Яцкевич В.А. Предложения по созданию перспективных радиотехнических средств для Вооруженных Сил РФ. Национальная оборона, № 3, март 2007. – С. 64 – 68.
- [108] Кравченко В.И. Электромагнитный терроризм. – Харьков: Изд-во «НТМТ». 2011. – 390 с.
- [109] Кравченко В.И. Оружие на нетрадиционных физических принципах. Электромагнитное оружие. – Харьков: Изд-во «НТМТ». 2009. – 266 с.
- [110] Кравченко В.И. Электромагнитное оружие. – Харьков: Изд-во НТУ «ХПИ». 2008. – 185 с.
- [111] Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высшая школа, 1988. – 448 с.
- [112] Конторович М.И. Операционное исчисление и процессы в электрических цепях. – М.: Сов. радио, 1975. – 320 с.
- [113] Бакулев П.А. Радиолокационные системы. – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.
- [114] Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
- [115] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т.1. – М.: Физматлит, 2004. – 496 с.
- [116] Релятивистская высокочастотная электроника. Под ред. А.В. Гапонова-Грехова. – Горький, ИПФ АН СССР, 1979. – 287 с.
- [117] Кулагин И.С., Милославский П.Ю., Новожилова Ю.В., Сморгонский А.В., Шмелев М.Ю. Релятивистская высокочастотная электроника. Зарубежная радиоэлектроника, 1986, № 12. – С. 3 – 34.
- [118] Nation J. – *Appl. Phys. Lett.*, 1970, v. 17, # 11.
- [119] Friedman M., Herndon M. – *Phys. Rev. Lett.*, 1972, v.28, # 4.
- [120] Granatstein V.L., Herndon M., Sprangle P., and other. – *Plasma Phys.*, 1975, v. 75, # T-1.
- [121] Черенков П.А. ДАН СССР, 2, 451 (1934), УФН 93 385 (1967).
- [122] Тамм И.Е., Франк И.М. ДАН СССР 14 107 (1937), УФН 93 388 (1967).
- [123] Гинзбург В.Л., Франк И.М. ЖЭТФ 16 15 (1946), Ginzburg V.L., Frank I.M. *J. Phys. USSR*, 9 353 (1945).
- [124] Гинзбург В.Л., Цытович В.Н. Переходное излучение и переходное рассеяние. – М.: Наука, 1984.
- [125] Тер-Микаелян М.Л. Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях. – Ереван: Изд-во АН Арм.ССР, 1969.
- [126] Болотовский Б.М., Галстян Е.А. УФН, 170, 809 (2000).
- [127] Багиян Р.А. Труды ежегодной научной конференции РАУ.: - Ереван, Изд. РАУ, 2007. – 207 с.
- [128] Ковалев Н.Ф. Когерентное черенковское излучение сильнооточных релятивистских электронных пучков. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности -1.04.04, 01.04.08. Ин-т прикладной физики. – Нижний Новгород, 1992. – 256 с.
- [129] Smith S.J., Purcell H.M. Visible Light from Localized

- Surface Charges Moving across a Grating. *Phys. Rev.* 1953, vol. 92. – P. 1069 – 1070.
- [130] Франк И.М. Эффект Доплера в преломляющейся среде. *Известия АН СССР, сер. Физ.* 1942, т. 6. – С. 3.
- [131] Сотников Г. Электродинамика плазменных и плазмopodobных замедляющих структур для СВЧ-генераторов больших мощностей и высокоградиентных ускорителей. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08. – Харьков, 2007. – 357 с.
- [132] Кочаровская Е.Р. Эффекты когерентного излучения классических и квантовых осцилляторов в широкополосных усилителях и импульсных генераторах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03. – Нижний Новгород, 2001. – 155 с.
- [133] Пегель И.В. Нестационарные процессы генерации сильноточных электронных пучков и мощных электромагнитных излучений. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04. – Томск, 2006. – 214 с.
- [134] Тотъменинов Е.М. Мощные релятивистские СВЧ-генераторы на основе ламп обратной волны с резонансным рефлектором. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04. – Томск, 2006. – 155 с.
- [135] Шестопалов В.П. Дифракционная электроника. – Харьков: Изд-во Вища школа, 1976. – 232 с.
- [136] Винтизенко И.И. Исследование релятивистских магнетронных СВЧ генераторов. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.20. – Томск, 2002. – 231 с.
- [137] Винтизенко И.И. Релятивистские магнетроны. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 360 с.
- [138] Иляков Е.В. Увеличение длительности импульсов излучения в мощных релятивистских СВЧ генераторах посредством предотвращения развития пробойных явлений. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04. – Нижний Новгород, 2002. – 146 с.
- [139] Баранов Р.В. Плазменный релятивистский СВЧ-генератор с управляемым в течение импульса спектром излучения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20. – Москва, 2013. – 105 с.
- [140] Ернылева С.Е. Длительность импульсов импульсных релятивистских сильноточных плазменных источников СВЧ-излучения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08. – Москва, 2015. – 94 с.
- [141] Лоза О.Т. Релятивистские одномодовые СВЧ-генераторы на основе сильноточных электронных ускорителей. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04. – Томск, 2006. – 221 с.
- [142] Заревич А.И. Автоколебательные процессы в релятивистском магнетроне с управляющими внешними связями. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03. – Томск, 2008. – 191 с.
- [143] Ельчанинов А.А. Мощные импульсные СВЧ-генераторы на основе лампы обратной волны в режиме сверхизлучения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20. – Томск, 2007. – 106 с.
- [144] Ким А.А. Пробой коаксиального диода поперек магнитного поля и методы увеличения длительности импульса тока электронного пучка. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04. – Томск, 1983. – 131 с.
- [145] Ayzatskiy N.I., Churyumov G.I., Dovbnya A.N., and other, Generation and Formation of Axially-Symmetrical Tubular Electron Beam in a Cold Metal Secondary-Emission Cathode Magnetron Gun – Part I: Experiment. *IEEE Transaction on Electron Devices*. Vol. 63, # 4, April 2016. – С. 1704–1709.
- [146] Ayzatskiy N.I., Churyumov G.I., Dovbnya A.N., and other, Generation and Formation of Axially-Symmetrical Tubular Electron Beam in a Cold Metal Secondary-Emission Cathode Magnetron Gun – Part II: Computer Modelling. *IEEE Transaction on Electron Devices*. Vol. 63, # 4, April 2016. – С. 1710–1714.
- [147] Полевин С.Д. Релятивистские одномодовые СВЧ-генераторы на основе сильноточных электронных ускорителей. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04. – Томск, 2006. – 221 с.
- [148] Flyagin V.A. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Technique*. 1977, v. MTT-25, No 6.
- [149] Ахуезер А.И., Файнберг Я.Б. *ДАН СССР*, т. 69. 1949. – С. 555.
- [150] Файнберг Я.Б., Блюх Ю.П., Корнилов Е.А. и др. Пучково-плазменный генератор. *Физика плазмы*, т. 20, № 9, 1994. – С. 777.
- [151] Переводчиков В.И., Боровиков П.В., Гусев С.И. и др. Мощные широкополосные пучково-плазменные усилители СВЧ-колебаний. В сб. обзоров «Вакуумная СВЧ электроника». – Нижний Новгород. 2002. – С. 138 – 143.
- [152] Селемир В.Д., Дубинов А.Е., Птицын Б.Г. и др. *Журнал технической физики*, т. 74, вып. 5. 2004. – С. 125 – 129.
- [153] Benford J. Phase-Locking of Relativistic Magnetron. *Phys. Rev. Lett.* 1989. V. 62? # 8. – P. 969 – 971.
- [154] Levine J.S. Design and Operation of a Module of Phase-Locked Relativistic Magnetrons. *J. Appl. Phys.* 1991. – V. 70, # 5. – P. 2838 – 2848
- [155] Magda I.I., Gadetski N.P., Kravtsova E.I., and other, “Relativistic Magnetron of Millimeter Waveband”. In Proc. 18<sup>th</sup> IEEE Int. Crimean Conf. Microw. Telecommun. Technol., Sevastopol’, Ukraine, 2008. – P. 637 – 639.
- [156] Maksymov I.S., Magda I.I., Ustyantsev M.A., Churyumov G.I., “Approach to Spectral Measurements of a Millimeter-Wave-Band Relativistic Magnetron”. *IEEE Trans. on Plasma Science*. Vol. 38, # 5. 2010. – P. 1086 – 1090.
- [157] Liu M., Liu C., Wang Z., Jiang W., and Schamiloglu E. “Optimizing the Parameters of a 12-Cavity Rising-Sun Relativistic Magnetron with Single-Stepped Cavities for  $\pi$  – Mode Operation,” *IEEE Trans. on Plasma Science*, vol. 44, # 11. 11, November. 2016. – P. 2852 – 2858.
- [158] Hashemi S.M.A. “Dielectric Cavity Relativistic Magnetron”. *Applied Physics Letters* 96, 081503 (2010).
- [159] Базылев В.А., Жеваго Н.К. Генерация интенсивного электромагнитного излучения релятивистскими части-

- цами. УФН, том 137, вып. 4, 1982. – С. 605 – 662.
- [160] Ясечко М.Н., Дохов А.И., Иванец М.Г., Тесленко О.В. Методы формирования и фокусировки электромагнитного излучения для воздействия на радиоэлектронные средства. Под ред. М.Н. Ясечко. – Харьков: 2015. – 214 с.
- [161] Prasad S., Roybal M., Buchenauer C.J., Prestwich K., Fuks M., and Schamiloglu E., “Experimental Verification of the Advantages of the Transparent Cathode in a Short-Pulse Magnetron”. *Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of New Mexico, Albuquerque*, 2009. – P. 81 – 85.
- [162] Andreev A.D., Hendricks K.J., Fuks M.I., and Schamiloglu E. “Analytical Calculation of Anode Current in Relativistic Magnetron”. *Air Force Research Laboratory & University of New Mexico, Albuquerque*, 2011. – P. 32-37.
- [163] Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ-импульсы наносекундной длительности. – М.: Энергоатомиздат. 1984. – 111 с.
- [164] Сазонов В.П. Приоритеты России в вакуумной СВЧ-электронике в XX столетии. – М.: Медпрактика. 2012. – 355 с.
- [165] A.S. Gilmour, Jr., *Klystrons, Traveling Wave Tubes, Magnetrons, Crossed-Field Amplifiers, and Gyrotrons*. Artech House. 2012. – 837 p.
- [166] Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. – М.: Изд-во «Сов. радио». 1974. – 254 с.
- [167] Месяц Г.А., Яландин М.И. Пикосекундная электроника больших мощностей. УФН. 2005. Т. 175. № 3. – С. 225 – 246.
- [168] Graybill S.E., Nablo S.V. *Appl. Phys. Rev.*, v. 8, # 1, 1966.
- [169] IEEE Trans. on Nuclear Science, v. NS-14, # 3, March 1967. – P. 777, 782, 789.
- [170] Preswitch K.R. IEEE Trans. on Nuclear Science, v. NS-18, # 3, March 1971. – P. 439.
- [171] Вакуумная СВЧ электроника: Сборник обзоров. – Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2002. – 160 с.
- [172] Friedman M., Hammer P.A. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, v. 21, # 4.
- [173] Friedman M., *Appl. Phys. Lett.*, 1975, v. 26, # 7.
- [174] Friedman M., Serlin V., Drobot A., e.a. *Phys. Rev. Lett.*, 1983, v. 50, # 24.
- [175] Friedman M., Serlin V., Drobot A., e.a. *J. Appl. Phys.*, 1984, v. 56, # 9.
- [176] Багян Р.А. Излучение заряженных частиц, взаимодействующих с границей раздела двух различных прозрачных сред. Известия НАН Армении, Физика, 2011, т. 46, № 5. – С. 307 – 312.
- [177] Слуцкий А.А. Механизм возбуждения колебаний в многосегментных магнетронах. ЖТФ, т. XVII, вып. 4, 1947. – С. 425 – 434.
- [178] Twiss R.Q. Radiation Transfer and the Possibility of Negative Absorption in Radio Astronomy. *Austral. J. Phys.* 1958, v. 11, # 4. P. 564.
- [179] Гапонов А.В. Взаимодействие непрямолинейных электронных потоков с электромагнитными волнами в линиях передач. Изв вузов. Радиофизика. 1959, т. 2, № 3. – С. 450.
- [180] Гапонов А.В. К статье: «Взаимодействие непрямолинейных электронных потоков с электромагнитными волнами в линиях передач». Письмо в редакцию «Изв вузов. Радиофизика». 1959, т. 2, № 5. – С. 836.
- [181] Schneider J. Stimulated Emission of Radiation by Relativistic Electrons in a Magnetic Field. *Phys. Rev. Lett.* 1959, v. 2, No 12. – P. 504.
- [182] Гапонов А.В. Доклад на сессии научно-технического общества радиотехники и электроники им. А.С. Попова. – М. 1959.
- [183] Pantell R.H. Electron Beam Interaction with Fast Waves. In: *The Proc. Symp. On Millimeter Waves*. Polytechnic Inst. Of Brooklin, N.Y.: Politechnic Press, 1959, v. 9. – P. 301.
- [184] Pantell R.H. Backward-Wave Oscillations in an Unloaded Waveguide. In: *The Proc. IRE*. 1959, v. 47, No. 6. P. 1146.
- [185] Гапонов А.В., Петелин М.И., Юлматов В.К. Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике. Изв вузов. Радиофизика. 1967, т. 10, № 9 – 10. – С. 1414.
- [186] Гапонов А.В., Петелин М.И. Мазеры на циклотронном резонансе. В кн.: Наука и человечество. – М.: Знание, 1980. – С. 283.
- [187] Цимринг Ш.Е. Мазеры на циклотронном резонансе. – Горький: Изд-во Горьк. гос. ун-та, 1988.
- [188] Кейер А.П., Нечипоренко В.О. Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ, вып. 12, (1075), 1984.
- [189] Нусинович Г.С. Гиротроны – источники мощного электромагнитного излучения миллиметрового диапазона. *Зарубежная радиоэлектроника*, 1984, № 11.
- [190] Madey J.M., Schwettman H.A., Fairbank W.M. *IEEE Trans. of Nuclear Science*, 1973, v. NS-20, No 2.
- [191] Mahaffey R.A., Sprangle P., Goden J., e.a. *Phys. Rev. Lett.*, 1977, v. 39, No 13.
- [192] Brandt H., Bromborsky A., Bruns H. *Proc. 2-nd Int. Conf. on High Power Electron and Ion Beam. Res. and Technol.*, Ithaca, N.Y., 1977, v. 2, p. 649.
- [193] Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. – М.: Изд-во Наука. 1973. – 309 с.
- [194] Чурюмов Г.И., Назаренко Ю.А. Исследование формирования электронного потока в электронно-оптических системах (ЭОС) магнетронного типа. *Радиотехника*. Респ. межв. научн.-техн. сб., 1993, вып. 96. – С. 101 – 105.
- [195] Гольденберг А.Л., Панкратова Т.Б., Петелин М.И. Электронная пушка магнетронного типа. А.С. СССР № 226044 от 21.06.1968.
- [196] Гольденберг А.Л., Петелин М.И. Известия вузов. Радиофизика. 1973, т. 16, № 1. С. 141-149.
- [197] Вилков М.В., Глявин М.Ю., Гольденберг А.Л., Петелин М.И. Магнетронно-инжекционная пушка с экстракцией отраженных электронов. *Письма в ЖТФ*, 2012, том 38, вып. 14. – С. 80 – 85.
- [198] Nusinovich G.S. Introduction to the Physics of Gyrotrons, MD, Johns Hopkins Univ. Press, 2004. – 352 p.
- [199] Диденко А.Н., Арзин А.П., Жерлицын А.Г. и др. Релятивистская высокочастотная электроника. – Горький: ИПФ АН СССР. 1984 № 4. – С. 104.
- [200] Granatstein V.L., Alexeff I. *High-Power Microwave Sources*. Artech House. Boston. London, 1987.
- [201] Benford J. *Microwave J.* 1987, No 12. – P. 97.
- [202] Диденко А.Н., Григорьев В.П., Жерлицын А.Г. Плазменная электроника. – Киев: Наук. думка, 1989. –



- С. 112.
- [203] Рухадзе А.А., Столбцов С.Д., Тараканов В.П. Радиотехника и электроника. 1992, № 3. – С. 385 – 396.
- [204] Селемир В.Д., Алехин Б.В., Ватрунин В.Е. и др. Физика плазмы. 1994, т. 20, № 7 – 8. – С. 689.
- [205] Alyokhin V.V., Dubinov A.E., Selemir V.D. et al. *IEEE Trans. on Plasma Science*. 1994. PS-22, No 5. – P. 945.
- [206] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. Сверхмощные СВЧ приборы с виртуальным катодом и фазированные антенные решетки на их основе. *Зарубежная радиоэлектроника*, 1995, № 4. – С. 54 – 60.
- [207] Коровин С.Д., Пегель И.В., Полевин С.Д. и др. Виркаторы. Вакуумная СВЧ электроника. Сборник обзоров. – Нижний Новгород. 2002. – С. 149 – 152.
- [208] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. Электронные приборы с виртуальным катодом. *Радиотехника и электроника*, 2002, том 47, № 6. – С. 645 – 672.
- [209] Винтизенко И.И., Жерлицын А.Г., Рябчиков А.И., и др. Разработка релятивистских СВЧ-генераторов в НИИ ядерной физики при ТПУ. *Известия Томского политехнического университета. Технические науки*. 2003, т. 306, № 1. – С. 101 – 105.
- [210] Жерлицын А.Г., Кузнецов С.И., Мельников Г.В. и др. *Авт. свид. СССР*, № 1522317. БИ № 42, 1988.
- [211] Жерлицын А.Г. Генерация СВЧ излучения в триоде с виртуальным катодом коаксиального типа. *Письма в ЖТФ*, том 16, вып. 22. – С. 78 – 81.
- [212] Vromborsky A., Agee F., Bollen M., et al. *SPIE Microwave and Particle Sources and Propagation*. 1988, v. 873. – P. 51.
- [213] Huttlin G.A., et al. *IEEE Trans. Of Plasma Science*. 1990. PS-18, No 3. – P. 618.
- [214] Шнак В.Г., Яландин М.И. Компактные микроволновые релятивистские генераторы. *Вакуумная СВЧ электроника. Сборник обзоров*. – Нижний Новгород. 2002. – С. 153 – 158.
- [215] Rukin S.N. High-Power Nanosecond Pulse Generators based on Semiconductor Opening Switches. *Instr. Exper. Tekh.* 1999, 42(4). – P. 439 – 467.
- [216] Swain D.W. *J. Appl. Phys.*, 1972, v. 43, No 1.
- [217] Miller P.A., Gerardo J.B., Pouckey J.W. *J. Appl. Phys.*, 1972, v. 43, No 7.
- [218] Olson C.L. *Phys. Rev. A*. 1975, v. A-11, No 1.
- [219] Yonas Y. *Sci. Amer.*, 1978, v. 239, No 1.
- [220] Смит Я. – В кн.: Накопление и коммутация энергии больших плотностей. Пер. с англ. – М.: Мир, 1979.
- [221] Miller R. B. *Nobel Prize Particle Beams*. – Plenum Press, N.-Y., 1982. (Пер. с англ. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. – М.: Мир, 1984).
- [222] Mayes J.R., Hatfield C.W., Mayes M.G. et al. A Compact High Power Wideband System. *Applied Physical Electronics L.C Austin, Texas USA*, 2010. – P. 612 – 616.
- [223] System Description of High Power Microwave Systems. *DIENL BGT Defence*. 2010.
- [224] Стариков С.М., Терентьев П.В. Генераторы импульсов высокого напряжения. – М.: Энергия. 1968.
- [225] Фрюнгель Ф. Импульсная техника. Генерирование и применение разрядов конденсаторов. Пер. с нем. – М.: Изд-во Энергия. 1965. – 487 с.
- [226] Булан В. Высоковольтный наносекундный генератор Маркса с импульсами квазипрямоугольной формы. *ПТЭ*. 1999, № 6. – С. 125 – 139.
- [227] Keller I.P., Walschon E.G. Simple Marx High Voltage Pulse Generator for Wide Gap Spark Chambers. *Rev. Sci. Instr.* 1966, v. 37, No 9, p. 1258.
- [228] Baryshevsky V.G., Borisevich A.E., Gurinovich A.A. et al. A Compact High Power Microwave (HPM) Source. *The IET European Pulsed Power Conference*. September 2009.
- [229] Giri D.V. High-Power Electromagnetic Radiators, Non-Lethal Weapons and Application. *Harvard University Press*. 2004.
- [230] Tatoian j., Giri D., Franceschetti G. et al. High Power Microwave System for Stopping Vehicles. *Euroem 2004, Magdeburg, Germany*. 2004.
- [231] Tehori A., Statlender J., Tokarsky A. Electromagnetic Vehicles Immobilization System (ELVIS). *European 2008. Lausanne. Switzerland*. 2008.
- [232] Martin B., Delmote P. The GIMLI: a Compact High-Power UWB Radiation Source. *European 2008. Lausanne. Switzerland*. 2008.
- [233] Hwang S.M., Hong J.I., and Huh C.S. Characterization of the Susceptibility of Integrated Circuits with Induction Caused by High Power Microwaves. *Progress in Electromagnetics Research. PIER 81*. 2008. – PP. 61 – 72.
- [234] Camp M., Garbe H., Nitsch D. UWB and EMP Susceptibility of Modern Electronics. *IEEE EMC. Montreal*. August 2001. – P. 1015 – 1020.
- [235] Nitsch D., Camp M. UWB and EMP Susceptibility of Modern Microprocessorboards. *EMC European, Brugge*. September 2000.
- [236] Benford J., Swegle J.A. and Schamiloglu E. High Power Microwaves. Second Edition. *CRC Press*. 2016. – 456 p.
- [237] Schamiloglu, E., High power microwave sources and applications, *Microwave Symposium Digest, 2004 IEEE MTT-S International*, 6-11 June 2004 Volume: 2, pp. 1001 – 1004 Vol.2
- [238] Bratman V.I., Denisov G.G., Ofitserov M.M. et al. Millimeter Wave HF Relativistic Electron Oscillators. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1987, vol. 15, no 1. – P. 2 – 15.
- [239] S.H. Gold and G.S.Nusinovich, “Review of high-power microwave source research,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 68, no. 11, pp. 3945-3974, November 1997.
- [240] K.R. Chu, “The electron cyclotron maser,” *Rev. Mod.Phys.* (to appear April 2004).
- [241] A.V. Gaponov-Grekhov and V.L. Granatstein, Eds., *Applications of High-Power Microwaves*, Norwood, MA: Artech House, 1994.
- [242] <http://vrtp.ru/index.php?act=categories&CODE=article&article=783>
- [243] Ni G., Gao B., Lu J. Research on High Power Microwave Weapons. *Proceedings of APMC*. 2005.
- [244] Weise, Th.H.G.G. Jung, M. Langhans, D. Gowin, M., Overview of directed energy weapon developments, *Electromagnetic Launch Technology 2004. 2004 12th Symposium on, 25-28 May 2005*. – P.483 – 489.
- [245] Jordan, U. Anderson, D. Backstrom etc, O., Microwave Breakdown in Slots, *Plasma Science, IEEE Transactions on*, Dec. 2004, Volume: 32, Issue: 6. – P. 2250 – 2262.
- [246] Meichu Guo, *The High Technology Wars Sword & Shield*, Military Scientific Publishing House, Beijing, February 2003, Chap. 1.
- [247] Korovin, S. D. Rostov etc, Pulsed power-driven high-power microwave sources, *Proceedings of the IEEE*, July 2004 Volume: 92, Issue: 7. – P.1082 – 1095
- [248] Hou De-tin, Hu Tao etc, Numerical calculation of high power microwave propagation trace in atmosphere. Pro-

- ceedings 6th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. 2003. – P.520 – 523.
- [249] *Lu Xun Hou De-tin Zhou Dong-fang* etc, Research on high power microwave pulse in the air breakdown, Proceedings 6th International SYmposium on Antennas, Propagation and EM Theory. 2003. – P. 537 – 540.
- [250] *Barker R.J. and Schamiloglu E.* High Power Microwave Sources and Technologies. – New York: IEEE Press / J. Wiley & Sons. 2001.
- [251] *Smith P.D. and Cloude S.R.* Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 5. – New York: Kluwer Academic / Plenum Publisher, 2002.
- [252] *Giri D.V. and Tesche F.M.* Classification of International Electromagnetic Interference. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol. 46, No 3. August 2004. – P. 322 – 328.
- [253] *Syrachev I.V.* et al. The Results of RF High Power Tests of X-Band Open Cavity RF Pulse. Compression System. Proc. Int. Conference Linac-94, Tsukuba, Japan, 1994. – P. 475 – 477.
- [254] *Wilson P.B.* et al. SLED II: A New Method of RF Pulse Compression. SLAC-PUB-5330.
- [255] *Балакин В.Е., Сырачев И.В.* Применение открытых резонаторов в системах умножения СВЧ-мощности. Препринт ФИЯФ 95-1.
- [256] *Юшков Ю.Г., Бадулин Н.Н., Бацула А.П.* и др. Наносекундный радиолокатор с временной компрессией СВЧ-импульсов передатчика. Электромагнитные волны & электронные системы. 1997, т. 2, № 6. – С. 71 – 76.
- [257] *Манько А.Н., Слинко В.Н., Чумерин П.Ю.* и др. Установка с резонансной импульсной компрессией для получения мощных сверхвысокочастотных импульсов двухсантиметрового диапазона. ПТЭ, 2004, № 3. – С. 106 – 109.
- [258] *Новиков С., Чумерин П., Шпунтов Ю.* и др. Способ наносекундной радиолокации с резонансной компрессией импульса передатчика. Патент РФ на изобретение № 2356065 от 08.05.2007.
- [259] *Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г., Ваулин В.А.* и др. Источник мощного СВЧ-излучения наносекундной длительности трехсантиметрового диапазона длин волн. ПТЭ, 2009, № 4, с. 183.
- [260] *Скрипкин Н.И.* Магнетроны 2- и 3-х мм диапазонов – новые разработки и перспективы их использования. Электроника: наука, технологии, бизнес. 2013, № 3. – С. 90 – 91.
- [261] *Скрипкин Н., Чумерин П., Юшков Ю.* Перспективы создания генераторных СВЧ-модулей на основе безнакальных магнетронов и резонансных СВЧ-компрессоров. Электроника: наука, технологии, бизнес. 2015, № 3. – С. 75 – 78.
- [262] *Панов В.В., Саркисян А.П.* Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ-средств функционального поражения. Зарубежная радиоэлектроника. 1993, № 10-12. – С. 3 – 10.
- [263] *Блудов С.Б., Гадецкий Н.П., Кравцов К.А.* и др. Генерирование мощных СВЧ-импульсов ультракороткой длительности и их воздействие на изделия электронной техники. Физика плазмы, 1994, том 20, № 7,8. – С. 712 – 717.
- [264] *Диденко А.Н., Жерлицын А.Г., Фортвов В.Е., Юшков Ю.Г.* Способ функционального поражения полупроводниковых радиоэлектронных средств и устройство его реализации. Патент РФ № 2148266, заявл. 12.10.1998.
- [265] *Бродский С., Манько А., Сырбу И.* и др. Перспективные направления развития средств функционального поражения РЭС на основе реализации технологии резонансной компрессии СВЧ-импульсов. Инновации в авиационных комплексах и системах военного назначения. Вопросы радиоэлектронной борьбы и информационного противоборства (часть 8). Сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 2009. Военный авиационный инженерный университет, 2009, с. 21-25.
- [266] *Диденко А.Н., Зеленцов В.И., Штейн Ю.Г., Юшков Ю.Г.* Радиотехника и электроника, 1972, 17, 7, с. 1545.
- [267] *Minami K., Hosoyama K.* J. Appl. Phys., 1979, 18 p. 85.
- [268] *Birx D.L., Dick G.J., Little W.A.* et all. Appl. Phys. Letters, 1978, 33, 5, p. 466.
- [269] *Десятков Н.Д., Диденко А.Н., Замятина Л.Я.* и др. Формирование мощных импульсов при накоплении СВЧ-энергии в резонаторе. Радиотехника и электроника, 1980, 25, 6. – С. 1227 – 1230.
- [270] *Baum C.E.* Compression of Sinusoidal Pulses for High Power Microwaves. Circuit and Electromagnetic System Design Note 48, March 2004.
- [271] *Baum C.E.* Coupling Ports in Waveguide Cavities for Multiplying Fields in Pulse-Compression Schemes. Circuit and Electromagnetic System Design Note 52, March 2006.
- [272] *Andreev A.D., Farr E.G., Schamiloglu E.* A Simplified Theory of Microwave Pulse Comprssion. Circuit and Electromagnetic System Design Note 57, August 2008.
- [273] *Новиков С.А., Разин С.В.* Устройства временной компрессии СВЧ-импульсов. Материалы 8-й Международной Крымской Микроволновой конференции КрыМиКо-98. – Севастополь, Крым, Украина. 1998, сс. 329-331. (Novikov S.A., Razin S.V. Microwave Pulse Compressors. Proceedings of 8<sup>th</sup> International Crimean Microwave Conference. – Sevastopol, Crimea, Ukraine. 1998, P. 329 – 331).
- [274] *Артемченко С.Н., Новиков С.А., Юшков Ю.Г.* Коаксиальные резонаторы в компрессорах СВЧ-импульсов. Известия Томского политехнического университета. Сер. Энергетика. 2009, т. 314, № 4. – С. 127 – 131.
- [275] *Артемченко С.Н., Каминский В.Л., Юшков Ю.Г.* Формирование наносекундных радиоимпульсов в ламповом СВЧ автогенераторе. Журнал технической физики, 1992, том 62, вып. 8. – С. 138 – 146.
- [276] *Чурюмов Г.И., Экезли А.И.* Исследование режима перестройки частоты в импульсном магнетроне с двумя выводами энергии. Электронная техника, сер. 1, СВЧ-техника. 2014, № 2 (521). – С. 39 – 45.
- [277] *Лобаев М.А.* Исследование разрядных явлений в плазменных коммутаторах СВЧ излучения большой мощности. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08. – Нижний Новгород, 2010. – 136 с.
- [278] *Ростов В.В.* Эффективные импульсно-периодические источники черенковского излучения на основе сильноточных электронных пучков. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04. – Томск, 2001. – 233 с.
- [279] *Ripin V.H., Manheimer W.* Microwave Pulse Compression in Dispersive Plasmas. US Patent No 4758795, July 19, 1988.

- [280] *Farkas Z.D., Hogg H.A., Loew G.A.* et al. SLED: A Method of doubling SLAC's Energy. Proc. 9<sup>th</sup> Int. Conf. On High Energy Accelerators. 1976. – P. 576.
- [281] *Вихарев А.Л., Горбачев А. Иванов О.А.* и др. Активный компрессор СВЧ импульсов на осесимметричной моде круглого волновода. Письма в ЖТФ, 1998, т. 24, № 20. – С. 6.
- [282] *Вихарев А.Л., Горбачев А. Иванов О.А.* и др. Активный береговский компрессор трехсантиметрового диапазона длин волн. Известия вузов. Радиофизика, 2008, т. 51, № 7. – С. 6.
- [283] *Yushkov Y.G., Avgustinovich V.F., Artemenko S.N.* et al. Powerful Microwave Compressors of RF Pulses. Proceedings of the 3th International Workshop “Strong Microwaves in Plasmas.”, - Russia, 1997, v. 2. – P. 911.
- [284] *Чурюмов Г.И.* Пути и методы повышения эффективности взаимодействия электронного потока с замедленными электромагнитными волнами в системах со скрещенными полями. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04. – Харьков, 1997. – 248 с.
- [285] Продукция НПП «ИСТОК» - СВЧ-электроника. – Россия. -2007.
- [286] <http://cpii.com/mpp/>
- [287] <http://pluton.msk.ru/en/>
- [288] [http://faza-don.ru/EL\\_device.htm](http://faza-don.ru/EL_device.htm) и <http://www.oaotantal.ru/tovar.php?id=3196>
- [289] National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. Research & Design Institute “Molniya”. 1954 – 2004. NTU “KhPI”, Kharkiv, 2004. – 35 p.
- [290] *Воскобойник М.Ф., Киселев А.Б., Морозов О.А., Соколов И.В.* Возможности применения СВЧ-энергии для поиска противопехотных мин. Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2000. – Вып. 2(476). – С. 57-59.
- [291] *Морозов О.А., Соколов И.В.* Современное состояние и тенденции развития магнетронов для СВЧ-нагрева в промышленности и медицине. Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2000. – Вып. 2(476). – С. 3-9.
- [292] *Диденко А.Н.* О возможности использования мощных СВЧ колебаний для технологических целей. Докл. РАН. 1993. Т. 331, № 5. – С. 571 – 572.
- [293] *Старец Я.А.* Перспективы развития генераторов магнетронного типа и их применение. Вакуумная СВЧ электроника. Сборник обзоров. – Нижний Новгород. 2002. – С. 36 – 38.
- [294] *Рувинский Г.В., Аристархова О.Н., Котюргин Е.А.* и др. Мощные ЛБВ сантиметрового диапазона длин волн. Вакуумная СВЧ электроника. Сборник обзоров. – Нижний Новгород. 2002. – С. 49 – 53.
- [295] *Гельвич Э.А., Жарый Е.В., Закурдаев А.Д.* и др. Многолучевые клистроны. Тенденции развития. Вакуумная СВЧ электроника. Сборник обзоров. – Нижний Новгород. 2002. – С. 54 – 61.
- [296] *Козорезов Г.Г.* Магнетроны с ферритовой развязкой для электронных ускорителей. Вакуумная СВЧ электроника. Сборник обзоров. – Нижний Новгород. 2002. – С. 67 – 70.
- [297] *Аликаев В.В., Денисов Г.Г., Запенвалов В.Е.* и др.
- [298] Гиротроны для УТС. Вакуумная СВЧ электроника. Сборник обзоров. – Нижний Новгород. 2002. – С. 71 – 76.
- [299] *Засыпкин В.Е.* Мощные гирорезонансные усилители. Вакуумная СВЧ электроника. Сборник обзоров. – Нижний Новгород. 2002. – С. 77 – 86.
- [300] *Братман В.Л., Денисов Г.Г., Калынов Ю.К.* и др. Новые разновидности мазеров на циклотронном резонансе. Вакуумная СВЧ электроника. Сборник обзоров. – Нижний Новгород. 2002. – С. 109 – 117.
- [301] *Кравченко В.И.* Электромагнитное оружие. – Харьков: Изд-во НТУ «ХПИ», 2008. – 185 с.
- [302] *Шлифер Э.Д.* Расчет многорезонаторных магнетронов. – Москва: 1966. – 142 с.
- [303] *Palevsky A., Bekefi G., and Drobot A.T.* Numerical Simulation of Oscillating Magnetrons. J. Appl. Physics, 1981, v. 52, No 8. – P. 4938 – 4941.
- [304] *Bekefi G., and Sheler R.E.* Appl. Phys. Letters, 1984, v. 44, No 3.
- [305] *Hirshfield J.I., and Wachtel J.M.* Phys. Rev. Lett., 1964, v. 12, No 19.
- [306] *Диденко А.Н. и др.* Физика плазмы, 1976, т. 2, вып. 3. – С. 514 – 518.
- [307] *Granatstein V.L.* et al. Plasma Phys., 1975, v. 17, No 1. – P. 23 – 28.
- [308] *Кременцов В.И.* и др. ЖЭТФ, 1978 т. 75, вып. 6(12). – С. 2151 – 2153.
- [309] *Efthimion P.C., and Schiesinger S.P.* Phys. Rev., 1977, v.16, No 2. – P. 633– 639.
- [310] *Granatstein V.L., Herndon V., Parker R.K.,* et al. J. Appl. Phys., 1975, v. 46, No 9.
- [311] *Deacon D.A., Elias L.K., Madey J.M.,* et al. Phys. Rev. Lett., 1977, v. 38, No 16.
- [312] Phys. Quantum Electronics, v. 8. – Wesley Publ. Comp. Inc., 1981, p. 49.
- [313] *Billardon M., Deacon D.A., Elleaume P.* Et al. Phys. Rev. Lett., 1983, v. 51, No 18.
- [314] *Дубинов А.Е., Селемир В.Д.* Сверхмощные СВЧ приборы с виртуальным катодом и фазированные антенные решетки на их основе. Зарубежная радиоэлектроника, 1995, № 4. – С. 54 – 60.
- [315] *Brodie I., Spindt C.A.* Vacuum Microelectronics. Advances in Electronics and Electron Physics. - Academic Press: 1992, v. 83, p. 2.
- [316] *Kardo-Sysoev A.F., Zazulin S.V., Efanov V.V.,* et al. High Repetition Frequency Power Nonosecond Pulse Generation. 11<sup>th</sup> IEEE International Pulsed Power Conference, 1997, Digest of Technical Papers, 1997. – P. 420 – 424.
- [317] *Grekhov I.G., Efanov V.M., Kardo-Sysoev A.F.,* et al. Formation of High Nanosecond Voltage Drop across Semiconductor Diode. Sov. Tech. Phys. Lett., vol. 9, 1983.
- [318] *Prokhorenko V., Ivashchuk V., Korsun S.* Drift Step Recovery Devices Utilization for Electromagnetic Pulse Radiation. The 10<sup>th</sup> International Conference on Ground Penetrating Radar, 21-24 June, 2004, - Delft, The Netherlands, pp. 1-4.
- [319] Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 1990, vol. 25, No 3. – P. 168 – 176.
- [320] *Farkas Z.D.* Binary Peak Power Multiplier and its Linear Accelerator Design. SLAC-PUB-3694, 1985.
- [321] *Wilson P.B., Farkas Z.D., Ruth R.D.,* et al. SLED-II: A new Method of RF Pulse Compression. Proc. Of Linear Accl. Conf., Albuquerque, NM, SLAC-PUB-5330, 1990.
- [322] *Mizuno H., Otake Y.* A new RF Power Distribution System for X-Band Linac Equivalent to RF Pulse Compression Scheme of Factor 2N. Proc. 17<sup>th</sup> Int. Linac Conf. Tsukuda, Japan, KEK-preprint-94-112, 1994.
- [323] *Ruth R.D.* The Next Linear Collider. SLAC-PUB-5406.



- [324] Braun H., Delahays J.P., De Roeck A., et al. CLIC here for the Future. CERN Courier, 2008, 48, No 7.
- [325] Новиков С.А., Разин С.В., Чумерин П.Ю. и др. Формирование мощных сверхширокополосных радиосигналов при последовательной временной компрессии СВЧ-энергии. ДАН, 1991, т. 321, № 3. – С. 518.
- [326] Августининович В.А., Новиков С.А., Разин С.В. и др. Формирование мощных радиоимпульсов наносекундной длительности трехсантиметрового диапазона. Известия вузов. Радиофизика, 1985, т. 28, № 10. — С. 1347.
- [327] Alvarez R.A. Some Properties of Microwave Resonant Cavities Relevant to Pulse-Compression Power Amplification. Rev. Sci. Instrum. 1986, v. 57, No 10, p. 2481.
- [328] Birx D.L., Scalapino D.J. Microwave Energy Compression Using High-Intensity Electron Beam Switch. J. Appl. Phys., 1980, v. 51, No 7, p. 3629.
- [329] Артеев М.С., Юшков Ю.Г. Формирователь наносекундных СВЧ-импульсов с лазерным поджигом коммутирующего разряда. ПТЭ, 1977, № 1, с. 99.
- [330] Соколов И.В. Магнетроны для СВЧ-нагрева и источники СВЧ-энергии. Электронная промышленность, 1996, № 3. – С. 4 – 8.
- [331] Морозов О.А., Воскобойник М.Ф., Каргин А.Н. и др. Второе рождение магнетронного направления. Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника, 2008, вып. 3(496). – С. 3 – 9.
- [332] Динамика радиоэлектроники-2/Под общ. Ред. Ю.И. Борисова. – М.: Техносфераб 2008. – 376 с.
- [333] Чурюмов Г.И., Экезели А.И. Исследование режима перестройки частоты в импульсном магнетроне с двумя выводами энергии. Электронная техника, сер. 1, СВЧ-техника. – 2014. – № 2 (521). – С. 39 – 45.
- [334] Churyumov G. The Theoretical and Experimental Investigation of Anode Block Electrodynamics Characteristics of the Magnetron with Two RF Output. Proc. of the First International Conference on “RadioElectronics and Info-Communications” (UkrMiCo'2016), Kyiv, September 11-16. – 2016.
- [335] Петелин М.И. К теории ультрарелятивистских мазеров на циклотронном резонансе. Изв. Вузов. Радиофизика, 1974, т. 17, № 6. – С. 902.
- [336] Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Нусинович Г.С. и др. Циклотронные и синхронные мазеры. Релятивистская высокочастотная электроника. Вып. 1. – Горький: ИПФ АН СССР, 1979. – С. 157.
- [337] Савилов А.В. Новые разновидности релятивистских электронных мазеров. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04. – Нижний Новгород, 2004. – 248 с.

Поступила в редколлегию 12.12.2016



**Чурюмов Геннадий Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физических основ электронной техники Харьковского национального университета радиоэлектроники, профессор Харбинского политехнического университета (г. Харбин, КНР),

IEEE Senior Member, European Microwave Association Member. Научные интересы: СВЧ техника и электроника, при-

менение микроволновых технологий, 2-D и 3-D математическое моделирование электронно-волновых процессов, электромагнитная совместимость.

УДК 537.533.2; 621.385.69

**НВЧ-електроніка великих потужностей: сучасний стан, перспективи розвитку і особливості застосування / Г.І. Чурюмов // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2016. — Том 15, № 4. — С. 270 – 300.**

У цьому огляді викладаються основні ідеї, методи і досягнення НВЧ-електроніки великих потужностей стосовно вирішення широкого кола фундаментальних проблем, пов'язаних з генерацією електромагнітної енергії і ефективністю її перетворення в інші види енергії в інтересах різних галузей науки і техніки, промисловості, сільськогосподарства, медицини і біології, а також сучасних військово-технічних застосувань. Показано, що цим досягненням сприяють прогрес вакуумної НВЧ-електроніки і, особливо, релятивістської НВЧ-електроніки, а також успіхи високовольтної імпульсної техніки.

Подано результати аналізу технологічної бази потужної релятивістської НВЧ-електроніки, яка є основою сучасної НВЧ-енергетики – нової перспективної галузі застосування електромагнітної енергії. Описано види та механізми електромагнітних випромінювань, що становлять основу роботи релятивістських НВЧ-генераторів: від класичних їх аналогів (ЛЗХ, ЛБХ, магнетрона, клістрона тощо) до мазерів на циклотронному резонансі (гіротрона) і їх секціонованих конструкцій (гіроЛБХ, гіроклістрона тощо), а також приладів з віртуальним катодом (віркатора, різні конструкції НВЧ-триода і т.п.) і лазерів на вільних електронах.

Обговорюються шляхи альтернативного розвитку радіоелектронних систем для генерації потужних імпульсів НВЧ-випромінювання, що відрізняються простотою технічного рішення і конструкції, а також зручністю експлуатації. Як такі джерела розглядаються генератори імпульсної напруги (генератор Маркса) і генераторні НВЧ-модулі, що містять нерелятивістський НВЧ-генератор (магнетрон) і резонансний НВЧ-компресор.

Наведено порівняльні енергетичні, частотні та часові характеристики і параметри електромагнітного випромінювання, отриманого за допомогою різних підходів. Описано перспективні сфери застосування технологічних установок для НВЧ-нагріву і обробки різних матеріалів і середовищ з метою надання їм нових властивостей.

Розглянуто пріоритетні напрямки розвитку оборонних технологій на основі використання принципово нових технічних рішень, в тому числі на нових фізичних принципах. Показано, що в умовах радіоелектронного й інформаційного протидії актуальним є проектування радіотехнічних засобів і пристроїв для функціонального ураження напівпровідникової елементної бази та радіотехнічних систем на її основі, а також радіолокаційного розпізнавання цілей з малою ефективною площею розсіювання і збільшення дальності їх виявлення на тлі пасивних завад. За певних умов, наведені результати можна розглядати, як спробу узагальнити накопичений досвід і показати шляху подальшого розвитку потужної НВЧ-електроніки в різних додатках НВЧ-технологій, особливо, в сфері оборони в ході створення перспективних зразків військової техніки з урахуванням збереження і забезпечення її працездатності.

*Ключові слова:* НВЧ-енергетика, НВЧ-електроніка, електромагнітне випромінювання, генератор імпульсної напруги, релятивістський НВЧ-прилад, резонансний НВЧ-компресор, електромагнітна зброя.

Табл.: 03. Іл.: 19. Бібліогр.: 337 найм.

UDC 537.533.2; 621.385.69

**High-power microwave electronics: current status, prospects of development and application features** /

G.I. Churyumov // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2016. – Vol. 15, № 4. – P. 270 – 300.

In this review the central ideas, methods and achievements of high-power microwave electronics for solving a wide variety of fundamental problems associated with generation of electromagnetic energy and efficiency of its transformation to other kinds of energy in the interests of different branches of science and engineering, industry, agriculture, medicine and biology as well as up-to-date military and technical applications are described. It is shown that the said achievements have been facilitated by a progress which was achieved by vacuum microwave electronics and relativistic microwave electronics, in particular, as well as a progress toward a high-voltage impulse technology.

The results of technological base analysis of relativistic high-power microwave electronics which is a building block of up-to-date microwave power engineering as a new perspective field of electromagnetic energy application are presented. The kinds and mechanisms of electromagnetic radiation which is a basis of work of different relativistic microwave generators from their classical analogs (magnetron, klystron and so on) to cyclotron-resonance masers (gyrotrons) and their sectioned designs (gyroTWT, gyroklystron, and so on) as well as virtual

cathode tubes (vircator, different designs of microwave triodes etc.) and free electron lasers are described.

Some ways of alternative development of radio electronic devices differing by a simplicity of engineering solution and design as well as serviceability are discussed. High-voltage generators (Marx's generators) and microwave modules including a non-relativistic microwave generator (magnetron) and resonant microwave compressor are considered as illustrations of such sources.

The energy, frequency and time characteristics and parameters of electromagnetic radiation are presented. The promising fields for application of technological plants for microwave heating and treatment of different materials and media with the aim of improving their properties are described.

The priority directions for developing the defense technologies that are based on the use of innovative engineering solutions including those on novel physical principles are considered. It is shown that in conditions of strong electronic and information opposition, the development of radio-technical facilities and devices for disrupting or even destroying electronic hardware components becomes a very important and topical problem. In specific situations the obtained results can be considered as an attempt to generalize an experience and to show the ways of further development of high-power microwave electronics in a variety of applications of microwave technologies, especially, in the sphere of national defense for creating advanced prototypes of weaponry in view of steps to be made for the maintenance of its operability in conditions of external electromagnetic attack.

*Keywords:* microwave power engineering, high-power microwave electronics, electromagnetic radiation, high-voltage impulse generator, relativistic microwave device, resonant microwave compressor, electromagnetic weapon

Tab.: 03. Fig.: 19. Ref.: 337 items.