ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ МАГНЕТРОНОВ*

М. И. Фукс¹, И. Шамильоглы¹, Н. Ф. Ковалев²

¹Department of Electrical & Computer Engineering, University of New Mexico
Albuquerque, NM 87131-1 356, USA

²Институт Прикладной физики РАН
Россия, 603950 Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46
E-mail: fuchs@unm.edu; edls@unm.edu; kovalev@appl.sci-nnov.ru

В статье отражены основные этапы развития релятивистских магнетронов. Описаны конструкции, устраняющие ряд недостатков, присущих традиционным магнетронам с радиальным выводом излучения через узкую щель из одного резонатора. К таким ограничениям относятся: работа только на невырожденных колебаниях, кратных π -моды, и низкий порог высокочастотного пробоя. Конструкция магнетрона, рассматриваемая в данной статье, имеет дифракционный вывод излучения, все резонаторы анодного блока продолжены в коническую антенну до сечения, превышающего сечение, соответствующее частоте отсечки излучаемой волны. Такой магнетрон с аксиальным симметричным выводом излучения может работать на любой моде, и перескок на вырожденный вид колебаний не приводит к катастрофе, как это иногда случается в традиционных магнетронах. Для резонаторов, продолженных с увеличивающейся глубиной в антенну, оптимизированный вывод позволил значительно увеличить эффективность релятивистского магнетрона. Так, в первом же эксперименте достигнут электронный КПД более 60%. Замена сплошного катода на «прозрачный» для азимутального электрического поля синхронной волны сократила фронт излучаемой волны до фронта приложенного напряжения. Такой катод состоит из отдельных эмиттеров, продолженных вдоль оси, периодически расположенных на окружности с радиусом катода. Высокая эффективность получена и для магнетрона с протяженным виртуальным катодом, что позволило устранить плазму, ограничивающую длительность генерируемого импульса, и электронную бомбардировку, сокращающую жизнь катода. Показана возможность преобразования непосредственно в антенне колебаний π -моды в излучение с более простой структурой, включая излучение со структурой, подобной гауссовой. При этом возможна реализация более компактной конструкции магнетрона. При быстром переключении мод внешним сигналом оценено влияние шумов, приводящее к размыванию граничных магнитных полей между областями, присутствующими различными модами. При работе магнетрона с магнитными полями в этих расширенных границах генерация конкретных соседних мод становится непредсказуемой. На карте режимов работы магнетрона наблюдаются чередующиеся области магнитных полей, соответствующие стабильным и нестабильным режимам генерации, что затрудняет переключение мод слабым внешним сигналом.

Ключевые слова: Релятивистский магнетрон, катод, дифракционный вывод излучения, скрещенные поля, дрейфовое движение электронов.

DOI: 10.18500/0869-6632-2016-24-6-39-53

Ссылка на статью: Фукс М.И., Шамильоглы И., Ковалев Н.Ф. Этапы развития релятивистских магнетронов // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2016. Т. 24, № 6. Р. 39–53.

*Статья написана по материалам доклада авторов на XI международной школе-конференции «ХАОС–2016», 3–8.10.2016, Саратов, Россия.

RELATIVISTIC MAGNETRONS' DEVELOPMENT STAGES

M. I. Fuks¹, E. Schamiloglu¹, N. F. Kovalev²

¹Department of Electrical & Computer Engineering, University of New Mexico
Albuquerque, NM 87131-1 356, USA

²Institute of Applied Physics of the RAS
Ul'yanov St., 46, 603950 Nizhny Novgorod, Russia
E-mail: fuchs@unm.edu; edls@unm.edu; kovalev@appl.sci-nnov.ru

A paper presents the main stages of relativistic magnetrons' development. We describe the designs eliminating conventional magnetrons' shortcomings and restrictions which are associated with a radial output of radiation through a narrow slot in one of the magnetron resonators. A low breakdown threshold and an operation in only nondegenerate modes are among these restrictions. In the paper we consider the design of the magnetron with a diffraction output of radiation, where all magnetron's resonators are extended into conical antenna to the cross-section where the cutoff frequency is lower than the frequency of generation. This magnetron with axial symmetrical output of radiation can operate in any mode and a switch to the degenerate oscillation does not lead to a catastrophe which may occur in conventional magnetrons. We managed to increase an efficiency of the magnetron by optimizing its diffraction output with a depth of resonators increasing in the antenna. In the first experiment the electron efficiency of the magnetron achieved the value exceeding 60%. The replacement of a solid cathode to the cathode transparent to azimuthal electric field of synchronous wave, allowed us to shorten the leading edge of radiated wave to the duration of leading edge of accelerating voltage. Transparent cathode consists of separate emitters oriented along the axis and periodically placed at the circle with a radius of the cathode. High efficiency was also achieved in the magnetron with a long virtual cathode, the use of which allowed us to eliminate both plasma responsible for a pulse shortening and an electron bombardment reducing a cathode's lifespan. We showed a possibility to transform the operating π -mode into the output radiation with a simplified structure including the radiation with the structure similar to Gaussian. This can be achieved in a compact design of the magnetron. In a regime of fast mode switching induced by external signal, we estimated the influence of noise leading to the blurring of the boundary magnetic fields intrinsic to different modes. In magnetic fields within these broaden boundaries the generation of neighboring magnetron operating modes becomes unpredictable. Alternate regions of magnetic fields with stable and unstable regimes of generation are observed on the map of generation regimes of the magnetron, which makes it difficult to switch the operating modes by small external signal.

Keywords: Relativistic magnetron, cathode, diffraction output of radiation, crossed fields, drift motion of electrons.

DOI: 10.18500/0869-6632-2016-24-6-39-53

Paper reference: Fuks M.I., Schamiloglu E., Kovalev N.F. Relativistic magnetrons' development stages. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2016. T. 24, № 6. P. 39–53.

Введение

В релятивистских высокочастотных источниках О-типа в излучение преобразуется кинетическая энергия электронов, движущихся со скоростями, близкими к скорости света c . В приборах М-типа в скрещенных электрическом E и магнитном H полях преобразование потенциальной энергии электронов происходит с дрейфовыми, отнюдь не с релятивистскими, скоростями

$$\vec{v} = [\vec{E} \vec{H}] / H^2,$$

здесь $H^2 = \sum_i H_i^2$, $i = r, \theta, z$ – координаты трехмерного пространства. Правильнее было бы называть такие приборы высоковольтными, но первый такой прибор [1] был назван «релятивистским», и все последующие, по инерции, сохранили это название.

Конструкция первого релятивистского магнетрона [1] не отличалась от конструкции обычного нерелятивистского магнетрона с радиальным выводом излучения через узкую щель одного из резонаторов анодного блока, что и явилось причиной некоторых ограничений. Из-за такой азимутально-

несимметричной конструкции вырожденные моды расщепляются на две стоячие моды: одна с синусоидальным распределением поля, другая – с косинусоидальным; одна с пучностью поля на резонаторе с выводом излучения, а другая – с узлом (рис. 1). Мода с пучностью на резонаторе слабо связана с выводом, поэтому ее Q -фактор выше; поле в такой системе нарастает быстрее, и магнетрон будет работать именно с этой модой практически без вывода излучения, нагревая электроды магнетрона до их разрушения при длительной работе. Поэтому перескок с π -моды на вырожденную моду, что иногда случается, крайне опасен.

Рис. 1. Анодный блок традиционного магнетрона с излучением через узкую щель: 1 – мода с пучностью поля на резонаторе с выводом; 2 – мода с узлом на резонаторе с выводом

1. Концепция магнетрона с аксиальным азимутально-симметричным выводом излучения

Аксиальный азимутально-симметричный дифракционный вывод излучения через коническую антенну, в которую все резонаторы анодного блока продолжены до сечения, превышающего отсечку для излучаемой волны, представляется наиболее адекватным для релятивистских магнетронов. Первый такой магнетрон (рис. 2) с резонаторами с уменьшающейся глубиной, продолженных в антенну, был разработан в 1977 году [2]. Хотя эффективность таких магнетронов была небольшой (их электронный КПД $\eta_e = P/UI_a \approx 13\%$ [2, 3], где P – мощность излучения, U – приложенное напряжение и I_a – анодный ток), но они обладали несомненными преимуществами: возмож-

Рис. 2. Первый релятивистский магнетрон с аксиальным выводом излучения через коническую антенну, содержащую резонаторы с уменьшающейся глубиной [2]

Рис. 3. Вид магнетрона с увеличивающейся глубиной резонаторов в конической антенне ($\phi_0 > \phi_1$) [6]

Рис. 4. Расчетные зависимости излучаемой мощности P и электронного КПД η_e для π -моды и для (-1) -й пространственной гармоники $(2\pi/3)$ -моды

Рис. 5. a – электронные спицы; b – структура поля $(2\pi/3)$ -моды

Рис. 6. Экспериментальный магнетрон с оптимизированным выводом излучения [9]

ность работы на любой моде, высокий порог для высокочастотного пробоя. Кроме того, такая конструкция автоматически обеспечивала селекцию продольных мод [4]; поскольку Q -фактор максимален, дифракционная добротность $Q_{dif} \approx 30/n(L/\lambda)^2$ для простейшей продольной структуры поля с одной вариацией ($n = 1$) при любых длинах L резонаторной системы и волны λ .

Конфигурация антенны сильно влияет на работу магнетрона. Используя компьютерные расчеты с ПИК-кодом по программе MAGIC [5], авторы [6] показали, что продолжение резонаторов с увеличивающейся глубиной в коническую антенну (рис. 3) повышает электронный КПД до 37%. Оптимизация углов такой антенны ($\phi_0 = 32^\circ$, $\phi_1 = 17.5^\circ$) с использованием «прозрачного» катода [7] увеличило КПД: свыше 70% для работы на (-1) -й пространственной гармонике $(2\pi/3)$ -моды (результат компьютерного расчета [8] приведен на рис. 4 и рис. 5) и свыше 60% в эксперименте с оптимизированным магнетроном (рис. 6) [9], изготовленным из нержавеющей стали. Здесь указывается только электронный КПД η_e , так как полный КПД η учитывает также ток I_{end} электронов, покидающих магнетрон без взаимодействия с высокочастотным полем. Имеются несколько способов уменьшить этот ток, например, использовать сплошную насадку на конце катода [9], эмитирующую сплошной пучок с током, меньшим в $2 \ln(R_a/R_b)/[1 + 2 \ln(R_a/R_b)]$ раз тока трубчатого тонкостенного электронного пучка (здесь R_a – радиус анода, R_b – радиус пучка) [10,11]. Низкая эффективность в экспериментах [2,3] объяснялась близостью размеров выходного цилиндрического волновода к его частоте отсечки, что приводило к слишком большому отражению.

2. Прозрачный катод для азимутального электрического поля синхронной волны как средство для быстрого старта генерации

Для многих гражданских и военных применений, например, для синхронизации магнетронов [12] необходимо обеспечить быстрый старт колебаний (генерации). Для этого предложено [7] использовать катод, прозрачный для азимутального синхронного электрического поля $\tilde{E}_\theta$, ответственного за скорость радиального дрейфа электронов $v_r = c [\tilde{E}_\theta \times H_{0z}] / H^2$. Практически это означает скорость передачи энергии электронов высокочастотному полю. Здесь H_{0z} – статическое аксиальное магнитное поле магнетрона, $H^2 = H_{0z}^2 + H_\theta^2$, $H_\theta = 2I_z / cR_c$, I_z – продольный ток катода и R_c – его радиус. Прозрачный катод состоит из отдельных продольных эмиттеров периодически расположенных на окружности с радиусом катода (рис. 7).

На поверхности сплошного катода тангенциальное поле $\tilde{E}_\theta$ равно нулю (рис. 8, кривая 1), следовательно, оно довольно слабое и на электронной втулке Δ , дрейфующей вокруг катода, что определяет медленное движение электронов к аноду. Последнее ведет к задержке начала генерации. Напротив, в конструкции с прозрачным катодом поле $\tilde{E}_\theta$, проникающее через катод, намного сильнее на электронной втулке Δ (рис. 8, кривая 2), что обеспечивает быстрое движение электронов к аноду, то есть быстрый старт генерации.

Для магнетрона с прозрачным катодом [7], к которому приложено напряжение 400 кВ с фронтом 10 нс, расчет показывает практически столь же короткий фронт генерации (рис. 9).

Рис. 7. Прозрачный катод [7]

Рис. 8. Поле $\tilde{E}_\theta$ в магнетроне со сплошным (1) и с прозрачным (2) катодом [7]

Рис. 9. Выходная мощность 1.2 ГВт (а) на частоте 1.5 ГГц (б) и фронтом генерации 10 нс магнетрона [8] с прозрачным катодом и приложенным напряжением в 400 кВ (со сплошным катодом фронт генерации свыше 40 нс)

3. Эффективный магнетрон с протяженным виртуальным катодом

Катоды в пространстве взаимодействия магнетрона подвержены бомбардировке электронами в неблагоприятных фазах рабочей волны. Чем сильнее поле, тем интенсивнее бомбардировка, что имеет место в релятивистских магнетронах. Кроме

того, как правило, в релятивистских высокочастотных источниках используются катоды с взрывной эмиссией. Эти катоды являются источниками не только электронов, но также прикатодной плазмы, которая быстро распространяется поперек приложенного аксиального магнитного поля со скоростью $v_p \approx (2 - 3)$ см/мкс [13]. Наличие прикатодной плазмы сокращает межэлектродный промежуток d ($d_{eff} = d - v_p t$, здесь t – время), уменьшая тем самым электронный КПД $\eta_e = 1 - \Delta/d_{eff}$, что приводит к быстрому ограничению генерируемого импульса. Эти причины стимулируют устранение катода из пространства взаимодействия, заменив его на протяженный виртуальный катод (ВК) с потенциалом, близким к потенциалу реального катода. Для образования локального ВК, как известно [11], ток I трубчатого тонкостенного электронного пучка с радиусом R_b должен превысить предельный ток I_{max} в цилиндрическом канале с радиусом R , ограниченный собственным пространственным зарядом пучка,

$$I > I_{max} = \frac{mc^3}{e} \frac{(\gamma_a^{2/3} - 1)^{3/2}}{2 \ln(R/R_b)}. \quad (1)$$

Здесь e и m – заряд и масса электрона, $mc^3/e = 17.04$ кА,

$$\gamma_a = 1 + \frac{eU}{mc^2}, \quad (2)$$

$mc^2/e = 511$ кВ. Для образования протяженного ВК формируют два локальных ВК на концах пространства взаимодействия (рис. 10, а, область II) таким образом,

Рис. 10. а – области формирования локальных виртуальных катодов; б – магнетрон, рассчитанный с использованием программы MAGIC [5]. Рисунок из работы [14]

чтобы прямой пучок от первого ВК и отраженный от второго ВК образовали пространственный заряд с потенциалом, близким к потенциалу реального катода. Для этого перед анодным блоком устанавливается дополнительный анод (в области I) и после анодного блока пучок продолжается в широкую часть магнетрона (область III) [8]. Данная конструкция (рис. 10, б) предложена для демонстрации работы магнетрона с протяженным ВК на основе расчетов, приведенных в [14]. В натурном эксперименте предполагается использовать секционированную электронную пушку с магнитной компрессией для того, чтобы использовать катод с большой площадью эмиссии. В этом случае необходимый ток можно получить без взрывной эмиссии, то есть без образования плазмы.

В результате между локальными ВК (рис. 11, а, б) образуется протяженный ВК (рис. 11, в) с потенциалом $U \approx 0$, и расчетный электронный КПД η_e (рис. 12, а) [14] получается близким к КПД высокоэффективного магнетрона [8]. На рис. 12, б показаны структуры электронных пучков и высокочастотных полей для расчетных мод.

Рис. 11. а – образование первого ВК; б – первый и второй локальные ВК; в – процесс формирования протяженного ВК [14]

4. Коническая антенна как преобразователь мод

Многочисленные примеры работы магнетронов показывают устойчивую работу на π -моде (рис. 12, б), когда в магнетроне число одинаковых резонаторов (без связок) $N \leq 8$. В данном случае возможно преобразование этого типа колебаний в излучение с более простой структурой непосредственно в конической антенне. Для этого достаточно продолжить в антенну только те резонаторы анодного блока, поляризация поля в которых соответствует структуре излучаемой волны [15]. При этом нарушается азимутальная симметрия, но для работы на π -моде это не является препятствием. Если, например, продолжить в антенну каждый второй резонатор (резонаторы с одинаковыми фазами поля), на выходе будет возбуждаться TE_{01} -мода (рис. 13). Если в 6-резонаторном магнетроне продлить только диаметрально противоположные резонаторы или 4 резонатора за исключением вышеуказанных диаметрально противоположных резонаторов, на выходе будет TE_{11} -мода (рис. 14),

Рис. 12. a – характеристики рабочих мод: излучаемая мощность P , электронный КПД η_e , полный КПД η ; b – электронные спицы и структуры электрических полей расчетных мод [14]

Рис. 13. a – сечения резонаторов, продолженных в антенну для возбуждения TE_{01} -моды на выходе; b – структура TE_{01} -моды

Рис. 14. a – сечения резонаторов в 6-резонаторном магнетроне, продолженных в антенну для возбуждения TE_{11} -моды на выходе; b – структуры радиального и азимутального поля TE_{11} -моды

структура которой близка к гауссовой. В последнем случае возможна реализация компактного магнетрона (рис. 15), так как максимальный радиус резонаторов магнетрона может превышать критический размер, соответствующий частоте отсечки для излучаемой волны [16].

Рис. 15. Компактный магнетрон [16]

5. Быстрое переключение мод

Для некоторых применений как, например, для работы радаров и синхронизации магнетронов, необходимо быстрое переключение частоты излучения, что проще всего осуществить переключением излучаемой моды. Как реально можно быстро изменить рабочую моду магнетрона? Каждой моде соответствует своя область магнитных полей, однако, невозможно быстро изменить магнитное поле. Более реально использовать внешний сигнал, то есть режим захвата. Это можно осуществить коротким слабым сигналом, что видно из такой механической аналогии, как шар на гребне между двумя долинами. Такой шар находится в неустойчивой позиции, но если слегка сдвинуть его, например, влево, он неминуемо покатится в левую долину. Однако, когда шар еще находится близко к гребню, коротким слабым толчком его можно перекинуть через гребень вправо, и он покатится в правую долину. Аналогичная ситуация в магнетроне. Установив магнитное поле близко к граничному значению H_{00} между областями (см. рис. 4), соответствующими соседним модам, осуществляем переключение на соседнюю моду в 400 кВ магнетроне [8] коротким (15 нс) 400 кВ сигналом (рис. 16, а) с частотой соседней моды. На рис. 16, б видно, что мощность излучения переключенной моды продолжает нарастать несмотря на то, что внешнее воздействие закончилось. На рис. 17 показана эволюция спектра колебаний. После внешнего воздействия частота «старой» моды продолжает уменьшаться, пока не установится единственная частота переключенной моды.

Переключение мод невозможно осуществить очень малым сигналом, поскольку неизбежные шумы в магнетроне размывают граничное магнитное поле H_{00}

Рис. 16. а – короткий сигнал в 15 нс, переключающий моды; б – мощность излучаемой волны (вертикальная черта фиксирует время окончания внешнего воздействия) [17]

Рис. 17. Изменение спектра излучения во время внешнего воздействия и после него

(см. рис. 4) между областями, соответствующими соседним модам. Внутри такой уширенной граничной полосы при очередном включении магнетрона любая из соседних мод может быть реализована. Поскольку для каждого магнетрона уровень шумов сильно различается (от 40 дБ [18] до 20 дБ [19]) по отношению к генерируемой мощности, трудно прогнозировать насколько граничное поле уширится в том или ином случае. С одной стороны, представляется обоснованным, что устранение электронной бомбардировки катода и плазмы в пространстве взаимодействия путем замены реального катода протяженным ВК и заменой катода с взрывной эмиссией катодом без образования плазмы в электронной пушке, расположенной вне пространства взаимодействия, должно приводить к снижению уровня шумов. Тем не менее, из-за большого разброса по энергиям электронов в протяженном ВК (см. рис. 11, в) снижение уровня шумов не происходит. С другой стороны, в статье [20] показано, что снизить уровень шумов возможно азимутальной модуляцией аксиального магнитного поля. Применение прозрачного катода [7] в магнетроне также приводит к возникновению дополнительного азимутального магнитного поля H_θ вокруг каждого эмиттера с радиусом r из-за продольного тока I_z в нем ($H_\theta = 2I_z/cr$). Таким образом, электронная втулка, дрейфующая вокруг прозрачного катода, должна также азимутально модулировать аксиальное магнитное поле магнетрона. Однако влияние этого поля на работу релятивистского магнетрона требует отдельного изучения. Поэтому мы не приводим здесь конкретного примера, ограничиваясь общим замечанием.

Заключение

Таким образом, мы привели наиболее, на наш взгляд, значимые этапы развития релятивистских магнетронов, хотя многие исследования не приняты во внимание, как например: развитие теории магнетронов, описанных в работах [12, 21–24]; переключение мод в различных магнетронах [25, 26] и разделение мод в них [27, 28]; уменьшение тока электронов, не взаимодействующих с синхронной волной, и другие. Коротко перечислим вышеприведенные достижения, отличающиеся, на наш взгляд, релятивистские магнетроны.

1. Аксиальный вывод излучения через азимутально-симметричный вывод, что позволяет использовать любую моду как рабочую волну; существенно увели-

чить электрическую изоляцию по отношению к высокочастотному пробую; улучшить селекцию продольных колебаний.

2. Оптимизация вывода позволила получить электронный КПД более 70% в расчетах и более 60% в эксперименте.
3. Предложен прозрачный катод для азимутального поля синхронной волны, что позволило осуществить быстрый старт генерации.
4. Реализация протяженного виртуального катода вместо реального катода, подверженного электронной бомбардировке, сокращает время жизни магнетрона. Кроме того, внешняя электронная пушка может, в принципе, использовать катод, не порождающий плазму, сокращающую длительность генерируемого импульса.
5. Возможность использования вывода в качестве преобразования рабочей π -моды в излучение с более простой структурой поля.
6. Возможность реализации компактного магнетрона со структурой излучения, подобной гауссовой.
7. Возможность быстрого переключения мод.

Библиографический список

1. *Bekefi G., Orzechowski J.J.* Giant microwave burst beam magnetron // *Phys. Rev. Lett.* 1976. Vol. 37, Issue 6. P. 379–382.
2. *Ковалев Н.Ф., Кольчугин Б.Д., Нечаев В.Т., Офицеров М.М., Солуянов Е.И., Фукс М.И.* Релятивистский магнетрон с дифракционным выводом // *Письма в ЖТФ.* 1977. Вып. 3. С. 430431.
3. *Ковалев Н.Ф., Крестелев Е.Г., Кузнецов М.И., Майне А.М., Офицеров М.М., Пападичев В.А., Фукс М.И., Чеканова Л.Н.* Высокомощный релятивистский 3-см магнетрон // *Письма в ЖТФ.* 1980. Вып. 6. С. 197–198.
4. *Власов С.Н., Жислин Г.М., Орлова И.М., Петелин М.И., Рогачева Г.Г.* Открытые резонаторы в форме волноводов с переменным сечением // *Изв.вузов. Радиофизика.* 1969. Vol. 12, Issue 8. С. 1236–1244.
5. *Goplen B., Ludeking L., Smithe D., Warren G.* User-configurable MAGIC for electromagnetic PIC calculations // *Comput. Phys. Commun.* 1995. Vol. 87, Issue 1. P. 54-86.
6. *Daimon M., Jiang W.* Modified configuration of relativistic magnetron with diffraction output for efficiency improvement // *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol. 91, Issue 19. P. 191503–191505.
7. *Fuks M.I., Schamiloglu E.* Rapid start of oscillations in a magnetron with a «transparent» cathode // *Phys. Rev. Lett.* 2005. Vol. 95. 205101-1-4.
8. *Fuks M.I., Schamiloglu E.* 70% efficient relativistic magnetron with axial extraction of radiation through a horn antenna // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2010. Vol. 38, Issue 6. P. 1302–1312.
9. *Leach C., Prasad S., Fuks M., Schamiloglu E.* Suppression of leakage current in a relativistic magnetron using a novel cathode endcap design // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2011. Vol. 40, Issue 8. P. 819–822.

10. Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. Устойчивость РЭП и проблема предельных токов // УФН. 1971. Т. 103. С. 609–613.
11. Брейзман Б.Н., Рютов Д.Д. Атомная физика. 1974. Т. 14. С. 873–907.
12. Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. Синхронизация: Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003.
13. Бугаев С.П., Ким А.А., Кошелев В.И. Движение катодной плазмы и вакуумный пробой в коаксиальных диодах с магнитной изоляцией // Эмиссионная электроника высоких токов. Новосибирск: Наука, 1984.
14. Fuks M., Prasad S., Schamiloglu E. Efficient magnetron with virtual cathode // IEEE Trans. Plasma Sci. 2016. Vol. 44(1), Issue 8. P. 1298–1302.
15. Fuks M.I., Kovalev N.F., Andreev A.D., Schamiloglu E. Mode conversion in a magnetron with axial extraction of radiation // IEEE Trans. Plasma Sci. 2006. Vol. 34, Issue 3. P. 620–626.
16. Prasad S., Leach C., Fuks M.I., Schamiloglu E. Compact relativistic magnetron with Gaussian radiation pattern // IEEE Trans. Plasma Sci. 2012. Vol. 40, Issue 11. P. 3116–3120.
17. Liu M., Michel C., Prasad S., Fuks M.I., Schamiloglu E., Liu C.-L. RF mode switching in a relativistic magnetron with diffraction output // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 97, Issue 1. P. 251501-11-3.
18. Liu M., Liu C.-L., Galbreath D., Michel C., Prasad S., Fuks M.I., Schamiloglu E. Frequency switching in a relativistic magnetron with diffraction output // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 110, Issue 3. P. 039303-1-7.
19. Liu M., Fuks M.I., Schamiloglu E., Liu C.-L. Mode switching in a 12-cavity relativistic magnetron with axial extraction of radiation // IEEE Trans. Plasma Sci. 2012. Vol. 40, Issue 6. P. 1569–1574.
20. Yamamoto K., Kuranuma H., Koinuma T., Tashiro T. A study of magnetron noise // IEEE Trans. Electron Dev. 1987. Vol. ED-34, Issue 5. P. 1223–1226.
21. Tahir I., Dexter A., Carter R. Noise performance of frequency- and pulse-locked CW magnetrons operated as current-controlled oscillators // IEEE Trans. Electron Devices. 2005. Vol. 52, Issue 9. P. 2096–2103.
22. Neculae V.B., Gilgenbach R.M., Lau Y.Y. Low-noise microwave magnetrons by azimuthally varying axial magnetic field // Appl. Phys. Lett. 2003. Issue 83. P. 1938–1940.
23. Нечаев В.Е., Петелин М.И., Фукс М.И. О перспективах использования релятивистских электронных потоков в приборах магнетронного типа // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3, № 15. С. 763-767.
24. Fuks M.I., Nechaev V.E. Theoretical and experimental study of relativistic magnetrons // IEEE/MTT-s Int. Microwave Symp. Digest. Orlando. 1979. P. 79–84.
25. Andreev A.D., Hendricks K.J., Fuks M.I., Schamiloglu E. Analytic calculation of anode current in relativistic magnetron // Pulse Power Conference. 2009. P. 502–506.
26. Andreev A.D., Hendricks K.J., Fuks M.I., Schamiloglu E. Elementary theory of

a relativistic magnetron operation: Dispersion diagram // J. Directed Energy. 2013. Vol. 5, Issue 1. P. 1–41.

27. *Liu M., Liu C.-L., Fuks M.I., Schamiloglu E.* Hysteresis dependence of mode separation on time-varying applied voltage in a relativistic magnetron with diffraction output // IEEE Trans. Plasma Sci. 2012. Vol. 40, Issue 6. P. 1569–1574.
28. *Fuks M.I., Schamiloglu E., Prasad S., Galbreath D.* Mode separation in a magnetron with diffraction output driven by a transparent cathode // IVEC. 2010.

Поступила в редакцию 7.11.2016

References

1. *Bekefi G., Orzechowski J.J.* Giant microwave burst beam magnetron // Phys. Rev. Lett. 1976. Vol. 37, Issue 6. P. 379–382.
2. *Kovalev N.F., Kol'chugin B.D., Nechaev V.T., Ofitserov M.M., Soluyanov E.I., Fuks M.I.* Relativistic magnetron with diffraction output // Tech. Phys. Lett. 1977. Issue 3. P. 430–431.
3. *Kovalev N.F., Krastelev E.G., Kuznetsov M.I., Maine A.M., Ofitserov M.M., Papadichev V.A., Fuks M.I., Chekanova L.N.* High power relativistic 3-cm magnetron // Tech. Phys. Lett. 1980. Issue 6. P. 197–198.,
4. *Vlasov S.N., Zhislin G.M., Orlova I.M., Petelin M.I., Rogacheva G.G.* Opened resonators as waveguides with varying cross sections // Radiophysics and Quantum Electronics. 1969. Vol. 12, Issue 8. P. 1236–1244,
5. *Goplen B., Ludeking L., Smithe D., Warren G.* User-configurable MAGIC for electromagnetic PIC calculations // Comput. Phys. Commun. 1995. Vol. 87, Issue 1. P. 54–86.
6. *Daimon M., Jiang W.* Modified configuration of relativistic magnetron with diffraction output for efficiency improvement // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 91, Issue 19. P. 191503–191505.
7. *Fuks M.I., Schamiloglu E.* Rapid start of oscillations in a magnetron with a «transparent» cathode // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95. 205101-1-4.
8. *Fuks M.I., Schamiloglu E.* 70% efficient relativistic magnetron with axial extraction of radiation through a horn antenna // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. Vol. 38, Issue 6. P. 1302–1312.
9. *Leach C., Prasad S., Fuks M., Schamiloglu E.* Suppression of leakage current in a relativistic magnetron using a novel cathode endcap design // IEEE Trans. Plasma Sci. 2011. Vol. 40, Issue 8. P. 819–822.
10. *Bogdankevich L.S., Rukhadze A.A.* Stability REB and a problem of critical currents // Achievements of Physical Sciences. 1971. Vol. 103. P. 609–613.
11. *Breizman B.N., Rutov D.D.* // Nuclear Physics. 1974. Vol. 14. P. 873–907 (in Russian).
12. *Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J.* Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Sciences. Cambridge University Press, 2003.
13. *Bugaev S.P., Kim A.A., Koshelev V.I.* Plasma motion and vacuum breakdown in coaxial diodes with magnetic insulation // Emission High Current Electronics. Novosibirsk: Science, 1984.

14. Fuks M., Prasad S., Schamiloglu E. Efficient magnetron with virtual cathode // IEEE Trans. Plasma Sci. 2016. Vol. 44(1), Issue 8. P. 1298–1302.
15. Fuks M.I., Kovalev N.F., Andreev A.D., Schamiloglu E. Mode conversion in a magnetron with axial extraction of radiation // IEEE Trans. Plasma Sci. 2006. Vol. 34, Issue 3. P. 620–626.
16. Prasad S., Leach C., Fuks M.I., Schamiloglu E. Compact relativistic magnetron with Gaussian radiation pattern // IEEE Trans. Plasma Sci. 2012. Vol. 40, Issue 11. P. 3116–3120.
17. Liu M., Michel C., Prasad S., Fuks M.I., Schamiloglu E., Liu C.-L. RF mode switching in a relativistic magnetron with diffraction output // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 97, Issue 1. P. 251501-11-3.
18. Liu M., Liu C.-L., Galbreath D., Michel C., Prasad S., Fuks M.I., Schamiloglu E. Frequency switching in a relativistic magnetron with diffraction output // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 110, Issue 3. P. 039303-1-7.
19. Liu M., Fuks M.I., Schamiloglu E., Liu C.-L. Mode switching in a 12-cavity relativistic magnetron with axial extraction of radiation // IEEE Trans. Plasma Sci. 2012. Vol. 40, Issue 6. P. 1569–1574.
20. Yamamoto K., Kuranuma H., Koinuma T., Tashiro T. A study of magnetron noise // IEEE Trans. Electron Dev. 1987. Vol. ED-34, Issue 5. P. 1223–1226.
21. Tahir I., Dexter A., Carter R. Noise performance of frequency- and pulse-locked CW magnetrons operated as current-controlled oscillators // IEEE Trans. Electron Devices. 2005. Vol. 52, Issue 9. P. 2096–2103.
22. Neculae V.B., Gilgenbach R.M., Lau Y.Y. Low-noise microwave magnetrons by azimuthally varying axial magnetic field // Appl. Phys. Lett. 2003. Issue 83. P. 1938–1940.
23. Nechaev V.E., Petelin M.I., Fuks M.I. Perspectives of relativistic electron beams in devices of magnetron types // Tech. Phys Lett. 1977. Vol. 3, Issue 15. P. 763–767.
24. Fuks M.I., Nechaev V.E. Theoretical and experimental study of relativistic magnetrons // IEEE/MTT-s Int. Microwave Symp. Digest. Orlando. 1979. P. 79–84.
25. Andreev A.D., Hendricks K.J., Fuks M.I., Schamiloglu E. Analytic calculation of anode current in relativistic magnetron // Pulse Power Conference. 2009. P. 502–506.
26. Andreev A.D., Hendricks K.J., Fuks M.I., Schamiloglu E. Elementary theory of a relativistic magnetron operation: Dispersion diagram // J. Directed Energy. 2013. Vol. 5, Issue 1. P. 1–41.
27. Liu M., Liu C.-L., Fuks M.I., Schamiloglu E. Hysteresis dependence of mode separation on time-varying applied voltage in a relativistic magnetron with diffraction output // IEEE Trans. Plasma Sci. 2012. Vol. 40, Issue 6. P. 1569–1574.
28. Fuks M.I., Schamiloglu E., Prasad S., Galbreath D. Mode separation in a magnetron with diffraction output driven by a transparent cathode. IVEC, 2010.

Михаил Исаакович Фукс родился в Горьком (ныне Нижний Новгород), Россия. Получил степень кандидата наук по физической электронике в Институте Прикладной физики РАН. С 1963 года поступил в Горьковский Радиофизический Институт, а с 1977 года – в Институт Прикладной физики РАН, где занимался мощной электроникой сверхвысоких частот как научный сотрудник, затем старший научный сотрудник и руководитель научной группы. С 1999 года работал в США по радарной технологии, в интересах предприятий противоракетной защиты. С 2000 года работает в Департаменте Электрической и компьютерной технологии Университета Новой Мексики в качестве профессора-исследователя. Область научных интересов: формирование и транспортировка электронных пучков, развитие и применение различных источников мощного излучения и электродинамических (в том числе метаматериальных) систем. Опубликовал более 80 статей (в том числе и в соавторстве) в реферируемых научных журналах и более 200 статей в Трудах конференций, имеет 3 американских и 5 российских патентов.

Albuquerque, NM 87131-1 356, USA
Department of Electrical & Computer Engineering, University of New Mexico
E-mail: fuchs@unm.edu

Edl Schamiloglu родился в Бронксе (штат New York, USA, 1959). Получил степени бакалавра (1979) и магистра (1981) в Школе технологии и прикладной науки в Колумбийском Университете (New York), а в 1988 году получил степень PhD по прикладной физике и математике в Корнельском Университете в Итаке (штат New York). В 1988 году начал работать как помощник профессора электрической и компьютерной технологии в Университете Новой Мексики (Albuquerque, США). В настоящее время профессор электрической и компьютерной технологии и руководитель Лаборатории импульсной мощности, пучков и микроволн. В 1990 году читал лекции в Школе американского ускорителя частиц Гарвардского Университета в Кембридже (штат Массачусетс, США), а в 1997 году – в Массачусетском Институте технологии (Кембридж, США). Соиздатель (вместе с R.J. Barker) книги по современным источникам мощных микроволн и технологиям (Piscataway, NJ: IEEE, 2001), соавтор (вместе с J. Benford и J. Swegle) книги «High-Power Microwaves» 2nd Ed. (New York, NY: Taylor & Francis, 2007). Соиздатель Трудов Института Электрических инженеров по мощным импульсным технологиям и применениям. Соавтор более 90 статей в реферируемых журналах и 150 статей в Трудах конференций. Имеет 4 патента. Является Старшим издателем Трудов IEEE Plasma Science. Область научных интересов: физика и технология заряженных частиц, мощные микроволновые источники, физика и диагностика плазмы, распространение электромагнитных волн, импульсные и сложные системы.

Albuquerque, NM 87131-1 356, USA
Department of Electrical & Computer Engineering, University of New Mexico
E-mail: edls@unm.edu

Ковалев Николай Федорович родился в 1943 году, окончил Горьковский политехнический институт (ныне Нижегородский технический университет) в 1966 году. После окончания ГПИ поступил на работу в НИРФИ и с 1977 года по настоящий день работает в ИПФ РАН заведующим лабораторией. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата (1983) и доктора (1992) физико-математических наук в области релятивистской СВЧ-электроники. Опубликовал свыше 130 научных статей и докладов по направлениям: гигаваттная СВЧ-электроника, сильнозамагниченные релятивистские электронные пучки, электродинамика. Лауреат государственной премии СССР.

Россия, 603950 Нижний Новгород, БОКС-120, ул.Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: kovalev@appl.sci-nnov.ru