

НЕТРАДИЦИОННАЯ ВАКУУМНАЯ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА НА ОСНОВЕ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА

Одна из первых фундаментальных работ, посвященных концепции поперечного группирования электронных пучков, была опубликована в 1949 году С.Л. Суссия [1]. Лишь десять лет спустя, приблизительно одновременно в США и СССР, появились публикации по параметрическим, а позже и по электростатическим, усилителям, использующим взаимодействие электромагнитного поля с быстрой циклотронной волной электронного потока. Вскоре были получены рекордно низкие значения шумовой температуры усилителей – порядка 60–200 К [2–4]. Современные достижения в области трехмерного моделирования взаимодействий электронных пучков и электродинамических систем, а также накопленный экспериментальный опыт позволяют с уверенностью говорить о возможности разработки новых классов СВЧ-приборов с уникальными параметрами. Что же собой представляют эти приборы?

ВВЕДЕНИЕ

К мощному выходному усилителю передатчика и малому входному усилительному тракту приемника, используемых в современных СВЧ-системах радиолокации, навигации и связи, предъявляется комплекс достаточно жестких требований, которые, к сожалению, трудно совместимы друг с другом (рис.1). В первую очередь следует выделить требование к линейности основных характеристик этих приборов, что необходимо для достижения определяющих параметров современных СВЧ-систем. При этом для

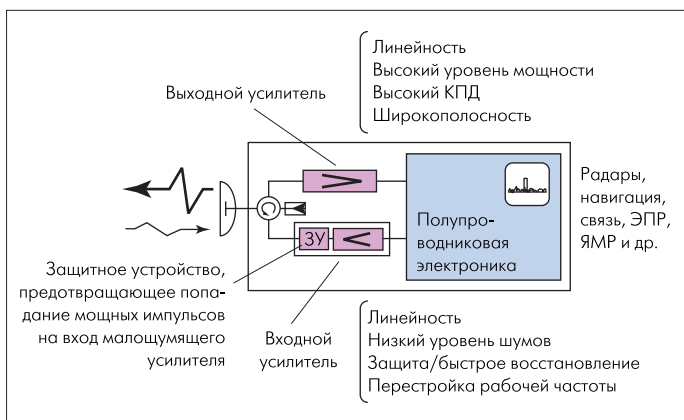


Рис. 1. Схема СВЧ-системы

Ю.Будзинский,
С.Быковский,
В.Ванке

выходного усилителя линейность должна сочетаться с высоким уровнем выходной мощности, широкой полосой рабочих частот, большим коэффициентом усиления и высоким значением КПД. Для входного каскада приемника важно, помимо линейности, обеспечить защиту от СВЧ-перегрузок, полное отсутствие пиков просачиваемой мощности и быстрое восстановление параметров приёмника после окончания перегрузок. Необходим также низкий коэффициент шума в сочетании с широким динамическим диапазоном и достаточно большим коэффициентом усиления. Кроме того, в связи с развитием техники беспроводной передачи электроэнергии (БПЭ) стала актуальной проблема обратного преобразования СВЧ-энергии высокого уровня в энергию постоянного тока. Вполне возможно, что в будущем СВЧ-технологии найдут широкий спектр применений в области наземных и космических систем БПЭ.

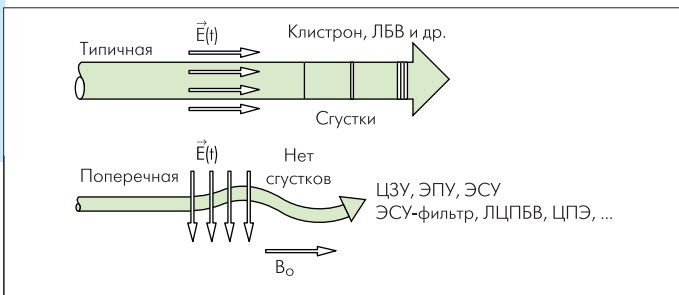


Рис. 2. Продольная и поперечная группировки электронного потока: $\vec{E}(t)$ – переменное во времени электрическое поле, B_0 – постоянное магнитное поле

Для традиционных вакуумных СВЧ-приборов с продольной группировкой электронов (ЛБВ, клистронов и т.п.) существуют принципиальные проблемы, связанные с нелинейным характером кулоновских сил, играющих важную роль при формировании плотных электронных сгустков. При поперечной группировке электронного луча, дрейфующего в постоянном продольном магнитном поле, большая часть этих проблем может быть исключена. Принцип поперечной группировки электронов основан на использовании силы Лоренца

Представляем авторов статьи

БУДЗИНСКИЙ Юрий Афанасьевич, ФГУП "НПП "Исток";
БЫКОВСКИЙ Сергей Васильевич, канд. тех.наук, ФГУП
"НПП "Исток", e-mail: serbyko@mail.ru. Тел.: (095)
465-88-47, 8-916-553-60-07.

ВАНКЕ Владимир Александрович, д-р.физ.-мат.наук,
профессор, МГУ, e-mail: vanke@orc.ru



как упругой силы, приводящей к деформации электронного луча в поперечном направлении без образования электронных сгустков (рис.2). Это позволяет преодолеть значительную часть фундаментальных ограничений, характерных для приборов с продольной группировкой (вакуумных и твердотельных) и обусловленных нелинейным влиянием полей пространственного заряда на процессы усиления СВЧ-сигнала. В результате появляется возможность создания СВЧ-усилителей, генераторов и преобразователей с улучшенными характеристиками. Принципы поперечного взаимодействия электромагнитного поля с электронным лучом достаточно широко исследовались и применялись при разработках вакуумных электронных приборов в течение нескольких последних десятилетий главным образом в России [3–14].

Рассмотрим кратко основные физические процессы, происходящие при поперечной модуляции электронных пучков. В электронном пучке, дрейфующем в продольном постоянном магнитном поле, могут быть возбуждены четыре типа поперечных волн: две циклотронные и две синхронные [8]. В каждом случае луч принимает форму однородно заряженной пространственной спирали, не содержащей сгустков заряда. Следует еще раз подчеркнуть, что такой механизм взаимодействия обеспечивает линейность процесса энергообмена с внешними полями. В отличие от волн пространственного заряда, фазовая скорость циклотронных волн зависит от циклотронной частоты, т.е. от значения постоянного магнитного поля, распределение которого в пространстве взаимодействия задается лишь магнитной системой. Фазовые скорости синхронных волн равны продольной скорости дрейфа электронного луча. Все четыре поперечные волны имеют круговую поляризацию.

Круговая поляризация циклотронных волн, стабильность и определенность их фазовых скоростей обеспечивают высокий уровень селективности взаимодействия с циркулярно-поляризованными полями электродинамических структур, что, в свою очередь, позволяет обеспечить высокие значения параметров приборов, основанных на взаимодействии с поперечными волнами электронного потока.

ЦИКЛОТРОННОЕ ЗАЩИТНОЕ УСТРОЙСТВО И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ

Простейшее устройство, в котором используется селективное взаимодействие электромагнитного поля с быстрой циклотронной волной (БЦВ), – резонатор с поперечным электрическим полем. В случае циклотронного резонанса такой резонатор способен передать практически всю СВЧ-энергию из внешней цепи в БЦВ электронного луча и/или вывести энергию этой волны во внешнюю цепь. Два подобных резонатора, соединенных между собой электронным лучом, образуют СВЧ-цепь, затухание сигнала в которой может быть достаточно мало (порядка 0,5 дБ и менее).



Рис.3. Циклотронное защитное устройство 3-см диапазона. В верхней части – транзисторный усилитель (разработчик – НПП "Исток")

При высоком уровне входного сигнала электронный луч перехватывается ламелями входного резонатора, и СВЧ-цепь оказывается разорванной. Таким образом, появляется возможность создания автономного защитного устройства, располагаемого между ан-

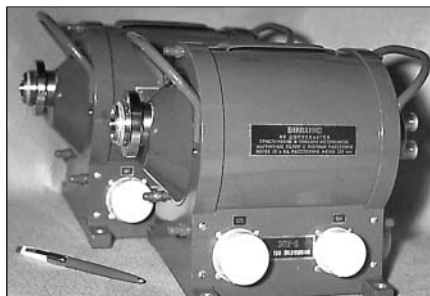


Рис.4. Один из первых промышленных ЭПУ, разработанных в России С.П. Кантюком (НПП "Исток")

тенной и входным усилителем приемника (например, РЛС). В случае, когда электронный луч перехватывается во входном резонаторе, условия согласования проводимостей электронного луча и внешней цепи резко нарушаются. КСВН возрастает до нескольких десятков единиц, и

большая часть СВЧ-энергии отражается от входа устройства [7]. Таким образом, высокий уровень допустимой входной мощности, глубокая защита (70 дБ и более), малое время восстановления параметров и отсутствие пиков просачивающейся мощности – типичные характеристики циклотронных защитных устройств (рис.3).

Если между входным и выходным резонаторами поместить дополнительный резонатор СВЧ-накачки с квадрупольным электрическим полем и питать его от внешнего генератора на удвоенной, по отношению к циклотронной, частоте, получим электронно-лучевой параметрический усилитель (ЭПУ) вырожденного типа, который сохранит все защитные функции предыдущего устройства. Кроме этого, входной резонатор будет эффективно удалять шумы БЦВ электронного луча. Такие усилители были разработаны в США и в России в конце 1950-х – начале 1960-х годов (рис.4).

Один из недостатков ЭПУ вырожденного типа – увеличение коэффициента шума за счет шумов разностного (холостого) канала на частоте, равной разности частоты накачки и циклотронной частоты. Введение в ЭПУ второго (компенсирующего) луча позволяет подавить разностный канал. Квадрупольные поля в резонаторах накачки должны иметь одинаковую интенсивность и быть сдвинутыми по фазе на π радиан (рис.5).

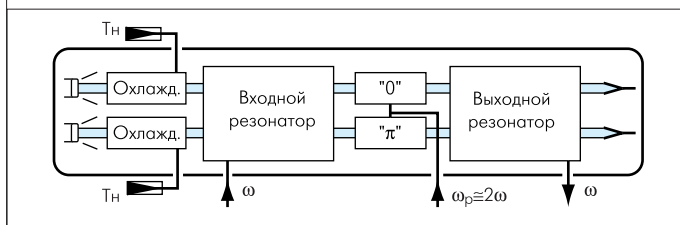


Рис.5. Схема двухлучевого параметрического усилителя с подавленным разностным каналом

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ

Вместо резонатора СВЧ-накачки в приборах на БЦВ электронного потока для усиления сигнала может применяться электростатическая квадрупольная спираль, формирующая закрученное вокруг оси квадрупольное электростатическое поле, или электростатическая двухсторонняя гребенка с чередованием потенциала на "зубьях". При движении электронов вдоль оси такой системы они "чувствуют" переменное во времени электрическое поле, и при соблюдении условий резонанса на удвоенной циклотронной частоте амплитуда БЦВ электронного луча будет нарастать. Усиление БЦВ в такой системе достигается за счет активной связи с медленной циклотронной волной, которая не взаимодействует с полем резонатора. Высокий уровень магнитного поля на эмитирующей поверхности катода и последующее снижение этого уровня обеспечивают низкий уровень шума циклотронных волн электронного луча на входе в пространство взаимодействия.

На рис.6 показан общий вид типичного электростатического усилителя, которые выпускаются только в России ФГУП НПП "Исток" (всего предприятием выпущено более 10 тысяч приборов разных модификаций данного класса) [5,9,11].



Рис.6. Общий вид электростатического усилителя 4-см диапазона (НПП "Исток")

Усилитель — уникальный прибор, который при использовании в качестве входного усилителя приемника обеспечивает низкий уровень собственных шумов и широкий динамический диапазон. Кроме того, он устойчив к перегрузкам, обеспечивает надежную защиту последующих каскадов при малом времени восстановления параметров и отсутствии пиков просачивающейся мощности.

Система связи с электронным потоком на основе принципа бегущей волны может быть использована для создания перестраиваемого электростатического усилителя. В качестве устройства связи может использоваться замедляющая система в виде обычной гребенки. При этом сохраняется высокая степень селективности энергообмена с БЦВ электронного потока. Рабочая полоса частот такого устройства связи достаточно узка (приблизительно 1% или менее), однако она может перестраиваться в достаточно широком диапазоне при изменении уровня магнитного поля и/или потенциала электронного луча [14].

ЛАМПА С БЕГУЩЕЙ ЦИРКУЛЯРНО-ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ВОЛНОЙ

Один из интересных приборов на поперечных волнах электронного потока — лампа с бегущей циркулярно-поляризованной волной (ЛБЦПВ). Каждый электрон, инжектированный вдоль оси циркулярно-поляризованной замедленной электромагнитной волны (рис.7) со скоростью, равной фазовой скорости этой волны, будет равномерно и монотонно тормозиться продольным электрическим полем этой волны. Поперечное электрическое поле волны при взаимодействии с продольным статическим магнитным полем (сила Лоренца) будет смещать электрон в область тормозящего электрического поля циркулярно-поляризованной волны. Важно подчеркнуть, что сте-

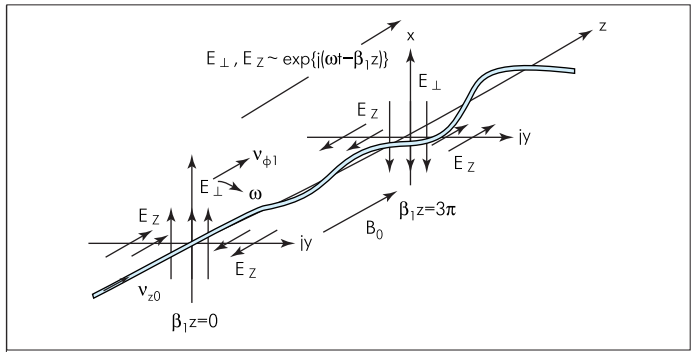


Рис.7. Принцип действия лампы с бегущей циркулярно-поляризованной волной

пень торможения электрона не зависит от времени его влёта в поле волны. Поэтому нитевидный электронный поток после взаимодействия остаётся моноэнергетичным и его можно эффективно рекуперировать с помощью коллектора с пониженным потенциалом.

На рис. 8 показаны результаты компьютерного моделирования и оптимизации ЛБЦПВ с электронным лучом конечного поперечного сечения: электронный КПД составляет приблизительно 40%, КПД с учетом рекуперации в одноступенчатом коллекторе — до 80% в полосе частот шириной до 30% и более по отношению к центральной частоте ($\Delta\lambda/\lambda_0$). Подчеркнем, что нелинейность фазочастотных характеристик в нелинейных режимах в данном случае на несколько порядков меньше, чем в обычных ЛБВ. Это — прямое следствие нового типа пространственного группирования электронного луча, который не связан с формированием электронных сгустков. В качестве замедляющей системы можно использовать пространственно скрученную двухрядную гребенку, позволяющую разделить фазовые скорости ЦПВ с правой и левой поляризацией.

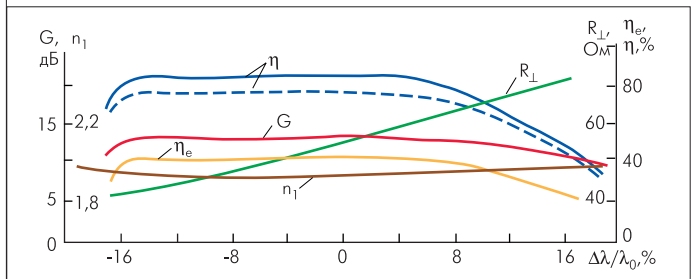


Рис.8. Результаты моделирования мощного варианта ЛБЦПВ: G — коэффициент усиления, η_e — электронный КПД, η — КПД с рекуперацией в одноступенчатом коллекторе, l_1 — коэффициент замедления, R_{\perp} — сопротивление связи

Основные эксперименты в области ЛБЦПВ проводились в России, когда не было удовлетворительных трехмерных моделей электронного пучка с конечным поперечным сечением и, соответственно, отсутствовали эффективные способы оптимизации устройств подобного рода. Тем не менее, была продемонстрирована работоспособность ЛБЦПВ в непрерывном режиме при выходной мощности около 2 кВт (рис.9). Очевидно, мощные ЛБЦПВ вполне реали-



Рис.9. Общий вид экспериментального макета ЛБЦПВ



зумы, могут обладать уникальными параметрами и перспективны для многих технических применений.

ЦИКЛОТРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СВЧ-ЭНЕРГИИ В ЭНЕРГИЮ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В связи с проведением успешных экспериментов по передаче энергии СВЧ-лучом и развитием соответствующих перспективных тенденций в технике появилась задача создания простого, надежного и мощного устройства для обратного преобразования СВЧ-энергии в энергию постоянного тока. В циклотронном преобразователе СВЧ-энергия вводится в БЦВ электронного потока, преобразуется в энергию продольного движения в области реверса статического магнитного поля и затем в процессе рекуперации в тормозящем поле коллектора выделяется на внешней полезной нагрузке (рис. 10).

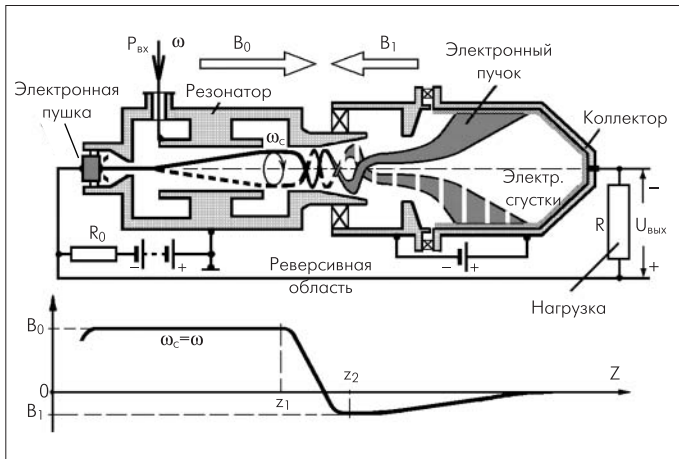


Рис. 10. Схема циклотронного преобразователя энергии

Достоинства циклотронных преобразователей, благодаря которым обеспечивается высокое выходное напряжение, — высокий КПД при высоком уровне входной СВЧ-мощности, устойчивость к перегрузкам по высокочастотной цепи и цепи постоянного тока [6, 9, 13, 14].

Непрерывная входная мощность экспериментального образца, разработанного совместно МГУ и НПП "Торий" (рис. 11), составила ~10 кВт, а КПД достигал 83%. Испытывались также образцы циклотронных преобразователей на уровень мощности 30–40 Вт с КПД около 70–74% и на уровень мощности до 1 кВт [9].

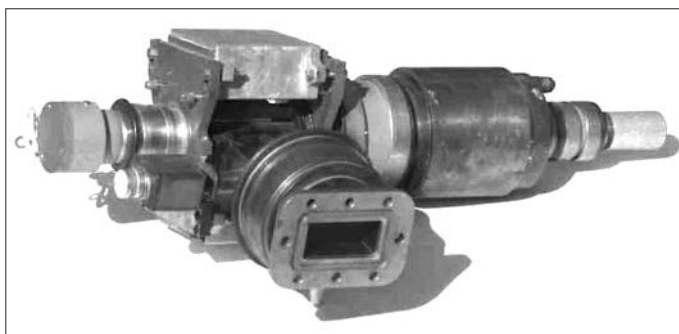


Рис. 11. Макет экспериментального циклотронного преобразователя энергии

КЛИСТРОН С КОМБИНИРОВАННЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

Еще одну интересную идею расширения рабочей полосы частот клистрона можно проиллюстрировать на основе мощного клистро-

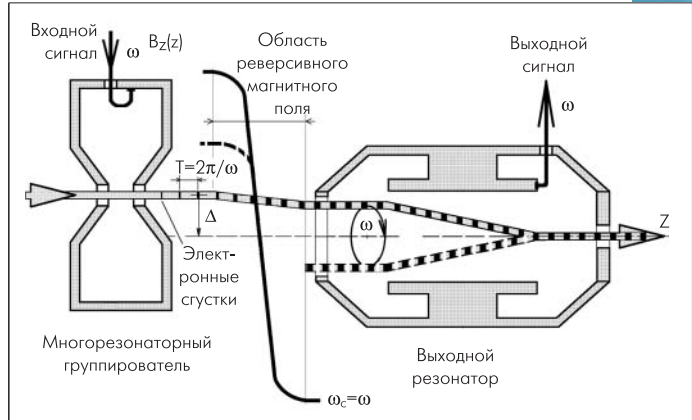


Рис. 12. Схема клистрона с комбинированным продольно-поперечным взаимодействием

на с комбинированным (продольно-поперечным) взаимодействием. Во входной области такого клистрона обычный многорезонаторный группирователь создаёт электронные сгустки, которые инжектируются в область с реверсированным магнитным полем, ось которого смещена относительно первоначальной оси электронного пучка (рис. 12). В выходной области большая часть продольной энергии электронного пучка может быть преобразована в энергию его вращения вокруг оси z. Кроме того, при выполнении условий циклотронного резонанса все электронные сгустки будут расположены на одной прямой линии, вращающейся вокруг оси z. В резонаторе с поперечным электрическим полем эта энергия практически полностью может быть выведена из пучка.

Поперечное электрическое поле резонаторного зазора однородно, поэтому при достаточно протяженном пространстве взаимодействия расплывание электронных сгустков в продольном направлении уже не играет существенной роли. Это позволяет обеспечить в 10–15 раз более эффективную нагрузку резонатора электронным лучом. Таким образом, при высокой эффективности (более 75–80%) может быть обеспечена частотная полоса взаимодействия порядка 8–10% и более.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К принципиальным достоинствам приборов, работа которых основана на взаимодействии электромагнитного поля с циклотронными и синхронными волнами электронного луча, относятся:

- отсутствие нелинейности, связанной с формированием сгустков пространственного заряда. Релятивистская (нелинейная) зависимость массы электрона от его энергии здесь не используется;
- круговая поляризация поперечных волн, стабильность и предсказуемость их фазовых скоростей, благодаря чему обеспечивается высокий уровень селективности энергообмена с внешними электромагнитными полями;
- значительное превышение уровнем СВЧ-энергии, вводимой в электронный луч, начальной энергии инжектированного электронного луча.

Эти, на первый взгляд, простые факторы позволяют преодолеть ряд существенных ограничений, которые сегодня сдерживают развитие вакуумной СВЧ-электроники.

Рассмотренные в статье принципы взаимодействия с электронным лучом позволяют создавать различные типы приборов с весьма привлекательными параметрами:

- **циклотронные защитные устройства** (включая перестраиваемые [14]) автономного типа с предельно высокой устойчивостью к СВЧ-перегрузкам (до 500–1000 кВт в импульсе), малым временем восстановления (~10 нс), отсутствием пиков просачивающейся мощности, низкими питающими напряжениями для защиты приемников в радиолокации, навигации, связи, ЭПР, ЯМР и др.;
- **малошумящие параметрические усилители** (включая двухлучевые с подавленным разностным каналом) и **электростатические усилители** с низкой шумовой температурой (30–150К), исключительно линейными фазовыми характеристиками и высокими защитными свойствами;
- **узкополосные фильтры и усилители-фильтры** с быстрой перестройкой частоты в диапазоне порядка 50% или более, а также с высокими защитными свойствами;
- **мощные ЛБВ с замедленной циркулярно-поляризованной электромагнитной волной** с высокими значениями КПД (до 35–40%, а при рекуперации односекционного коллектором до 80%), широкой полосой рабочих частот ($\Delta\lambda/\lambda_0$ до 30% и более) и с высокой линейностью фазовых характеристик;
- **мощные преобразователи СВЧ-энергии** с КПД до 80–90% с односекционным коллектором, при высоких уровнях мощности (до 50–100 кВт) и высоких выходных напряжениях (10–100 кВ), с устойчивостью к перегрузкам;
- **клизотроны с комбинированным взаимодействием** с расширенной полосой рабочих частот (до 8–10%) на различных уровнях мощности (50–100 кВт);
- **циклотронные фазовращатели** на различных уровнях мощности (10–50 кВт) с управлением фазой в широком диапазоне (0–360°), малым затуханием сигнала и высокой скоростью управления фазой.

Приборы подобного типа могут оказаться весьма перспективными и конкурентоспособными (даже быть вне конкуренции) в различных областях современной радиоэлектроники, радиоастрономии, высококачественной и специфической радиолокации (в том числе наносекундной), ЭПР, ЯМР, а также в будущих космических солнечных энергосистемах и разнообразных трактах передачи энергии СВЧ-пучком наземного и космического базирования.

Авторы считают своим приятным долгом с чувством глубокого уважения и благодарности вспомнить Самсона Давидовича Гвоздова, Владимира Михайловича Лопухина и Сергея Павловича Кантюка, по инициативе и под прямым руководством которых были начаты изложенные в статье работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cuccia C.L. The Electron Coupler – a Developmental Tube for Amplitude Modulation and Power Control at UHF. – RCA Rev., 1949, v.10, p. 270.
2. Люиселл У. Связанные и параметрические колебания в электронике. – М.: ИИЛ, 1963.
3. Лопухин В.М. и др. Шумы и параметрические явления в электронике СВЧ. – М.: Наука, 1966.
4. Ванке В.А., Лопухин В.М., Саввин В.Л. Сверхмалошумящие усилители циклотронных волн. – Успехи физических наук, 1969, т.99, вып. 4, с.545.
5. Budzinsky Yu.A., Kanyuk S.P. A New Class of Self-Protecting Low-Noise Microwave Amplifiers. – Proc. IEEE MTT-S Microwave Symposium, Atlanta, USA, Digest, 1993, v.2, p.1123.
6. Vanke V.A., Matsumoto H., Shinohara N. High Power Converter of Microwaves into DC. – Journal of Radioelectronics, 1999, N 9, Web Site: <http://jre.cplire.ru/jre/sep99/1/text.html>
7. Vanke V.A., Matsumoto H., Shinohara N. Cyclotron Wave Electrostatic Amplifier. – Journal of Radioelectronics, 1999, N 10, Web Site: <http://jre.cplire.ru/jre/oct99/1/text.html>
8. Vanke V.A. Cyclotron and Synchronous Oscillations and Waves of the Electron Beam. General Relations. – Journal of Radioelectronics, 2002, N.1, Web Site: http://jre.cplire.ru/jre/jan02/2/text_e.html
9. Будзинский Ю.А., Быковский С.В., Канток С.П., Матрюков М.А. Электронные приборы СВЧ на быстрой циклотронной волне. – М.: Радиотехника, 1999, N 4, с.32.
10. Vanke V.A. Microwave Electronics Based on Electron Beam Transverse Waves Using (Invited). Technical Report of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (Japan), ED99-247, 1999, p.1.
11. Boudzinski I.A., Bykovski S.V. Amplifying and Protective Devices Based on Electron Beam Fast Cyclotron Wave. – Proc of the 2nd International Vacuum Electronics Conference, Noordwijk, The Netherlands, April 2–4, 2001, p.153.
12. Vanke V.A. Non-Traditional Microwave Electronics Based on Electron Beam Transverse Grouping. – Proc. of the 23rd International Conference on Microelectronics, Nis, Yugoslavia, May 12–15, 2002, p.132.
13. Быковский С.В. и др. Циклотронный преобразователь СВЧ-энергии. Патент России №2119691 от 27 октября 1999 г.
14. Matsumoto H., Vanke V.A., Shinohara N. Microwave/D.C. Cyclotron Wave Converter Having Decreased Magnetic Field. US Patent, No. 6,507,152 B2 ; 2003 January 14.