

Магნიконы — мощные высокоэффективные ВЧ-усилители. Современное состояние и перспективы*

И.А.Запругаев, Е.В.Козырев, И.Г.Макаров, А.А.Никифоров,
Г.Н.Острейко, Г.В.Сердобинцев, В.В.Тарнецкий, С.В.Шелкунов
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера РАН, Новосибирск, Россия

Введение

Уже несколько десятилетий в ИЯФ СО РАН ведутся работы по созданию электронных СВЧ-приборов с нетрадиционным способом модуляции электронного потока. Как известно, в большинстве мощных приборов используется либо модуляция электронов по скорости (например, клистроны, ЛБВ, ЛОВ и др.), либо модуляция плотности электронного потока (лампы с сеточным управлением). В 1967 году академик Г.И.Будкер предложил новый ВЧ-усилитель [1, 2], в котором непрерывный релятивистский электронный пучок модулируется изменением своего пространственного положения путем круговой развертки. Применение релятивистских пучков и отсутствие электронных сгустков позволяло рассчитывать теоретически на получение высокой мощности и эффективности таких приборов.

1. Первые приборы с круговой разверткой пучка — гироконы

В 1970 году в Новосибирском институте ядерной физики был создан и испытан первый прибор с модуляцией электронного пучка путем круговой развертки, получивший название гирокона [1, 2]. Схема прибора изображена на рис. 1. В импульсном режиме работы на частоте 430 МГц был достигнут электронный КПД более 80%. Вслед за этим в Новосибирске на той же частоте был создан 65-МВт импульсный гирокона (рис. 1) для питания линейного ускорителя с энергией 50 МэВ [2, 4]. Этот прибор работает в составе электрон-позитронного источника ускорительного комплекса ВЭПП-4 с 1978 года по настоящее время. Кроме того, в нашем Институте были созданы 400-кВт гирокона непрерывного действия на частоте 180 МГц (рис. 1) [2, 4] и импульсный 7-ГГц гирокона, работающий на второй гармонике входной частоты [5]. Гирокона непрерывного действия работал в составе ВЧ-системы комплекса ВЭПП-4 с 1980 по 1982 год. Импульсный же 7-ГГц гирокона (рис. 1) создавался как прототип микроволнового СВЧ-источника для питания ускоряющей структуры электрон-позитронного коллайдера ВЛЭПП [6]. Исследования гирокона велись также и за рубежом. Так, в Los Alamos National Laboratory (LANL, США) был создан импульсный гирокона на частоту 450 МГц [7, 8]. Экспериментальные параметры перечисленных приборов сведены в табл. 1.

Теоретические и экспериментальные исследования гироконов различных конструкций и на различные параметры подтвердили их применимость в ускорительной технике, но вместе с тем вскрыли ряд ограничений, препятствующих получению высоких мощностей при продвижении в области коротких длин волн. К таковым относятся перегрев и пробой резонаторов из-за уменьшения их размеров, все возрастающая с увеличением частоты сложность проведения электронного пучка через узкие щели в выходном резонаторе без магнитной фокусировки и, соответственно, невозможность снижения энергии электронов пучка, т.е. увеличения микропервееанса.

*Работа поддерживается РФФИ.

Таблица 1:

Гирокон	Первый	Непр. ВЭПП-4	Имп. ВЭПП-4	Имп. ВЛЭПП	Имп. LANL
Рабочая частота, МГц	430	182	430	7000	450
Мощность, МВт	0.6	0.4	65	60	0.15
Длит. импульса, мкс	20	CW	10	0.7	50
Напряжение пучка, кВ	320	240	1600	1200	82
КПД, %	65	60	75	25	23
Усиление, дБ	7	17	26	60	—

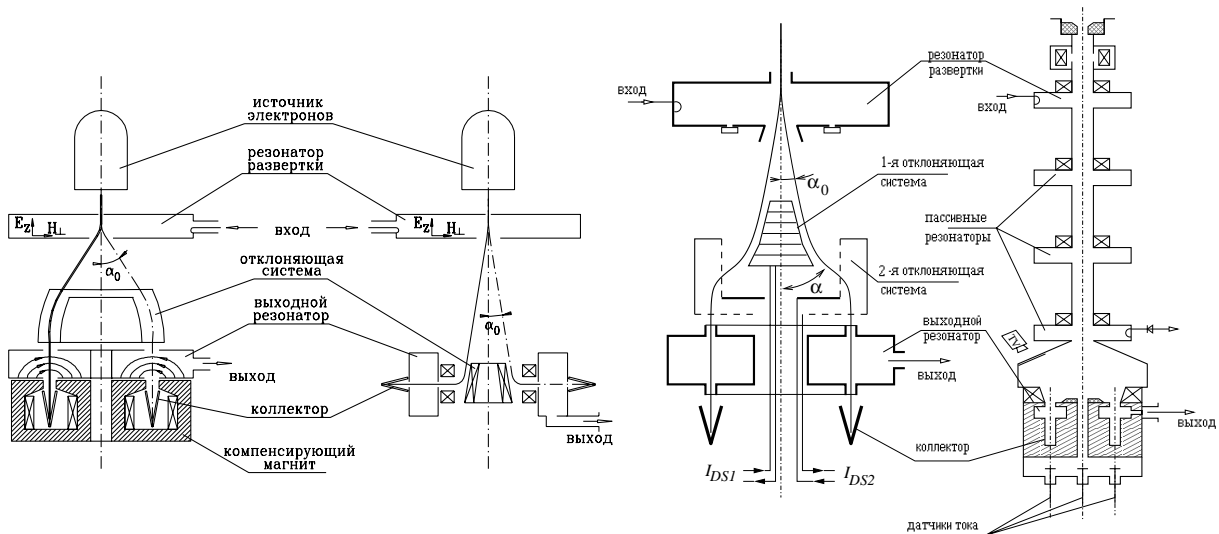


Рис. 1: Гироконны ИЯФ.

2. Магниконы

Дальнейшее развитие электронных приборов с круговой разверткой стало возможно с изобретением и созданием “гирокона с магнитным сопровождением”, получившего название магникон [9, 10]. Применение постоянного магнитного поля сопровождения и использование циклотронного резонанса обеспечивают длительное взаимодействие электронов с ВЧ-полями резонаторов и существенно облегчают транспортировку мощного электронного пучка. В магниконе электронный пучок пересекает все резонаторы прибора через центральные отверстия в торцевых стенках. Причем продольные размеры резонаторов системы модуляции составляют около половины длины волны, а выходного резонатора — несколько длин волн. Это приводит к значительному снижению напряженности ВЧ-полей и удельного тепловыделения в стенках резонаторов, к упрощению конструкции и увеличению эффективности прибора.

Первые испытания магникона — прототипа непрерывного (квазинепрерывного) микроволнового усилителя были проведены в нашем Институте в середине 80-х годов [11] и продемонстрировали рекордные результаты. На частоте 915 МГц были достигнуты мощность 2.6 МВт и электронный КПД 85% при работе на согласованную нагрузку. Затем были проведены испытания работы магникона на ускоряющую структуру разрезного микротрона [12]. На выходе ускорителя был получен ток 50 мА с энергией 6 МэВ в импульсе 30 мкс. В этих экспериментах было проверено еще одно замечательное свойство магникона — воз-

возможность работы на изменяющуюся резонансную нагрузку без циркулятора. Это свойство чрезвычайно важно при создании современных ускорительных комплексов в связи с высокой стоимостью вентиляльных устройств большой мощности. Схематическое устройство первого магнিকона изображено на рис. 2.

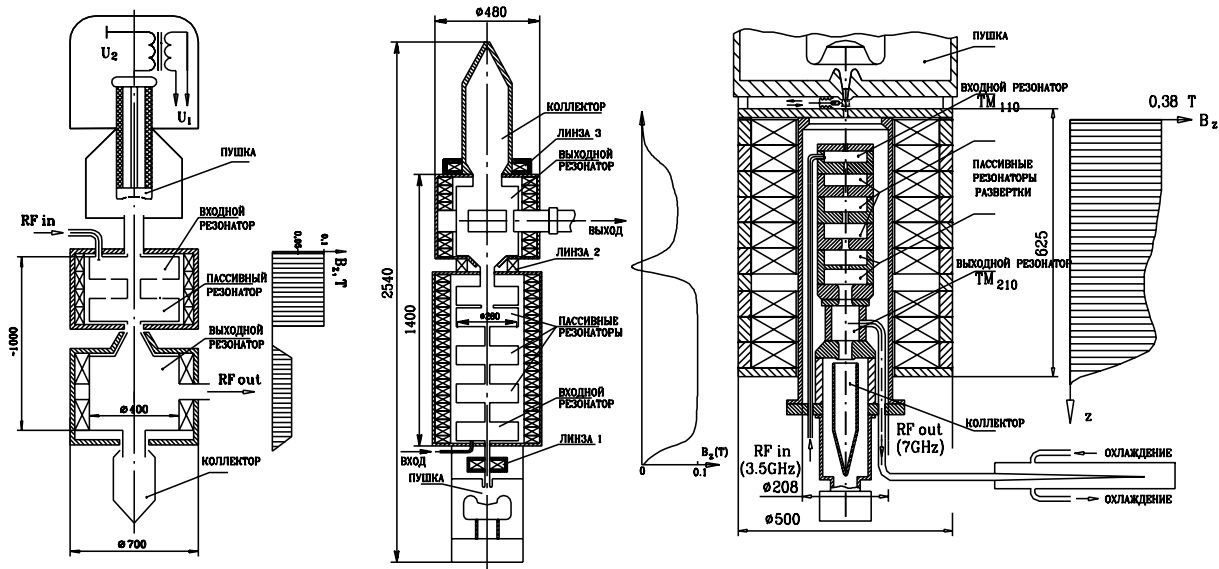


Рис. 2: Магнিকоны 915 МГц, 1300 МГц и 7 ГГц.

Опыт первого магнিকона позволил нам разработать альтернативный ВЧ-источник для проекта сверхпроводящего линейного электрон-позитронного коллайдера TESLA (Германия). Анализ показал возможность создания на частоте 1300 МГц магнিকона мощностью 10 МВт в непрерывном или длинноимпульсном режиме работы (рис. 2) с эффективностью более 70% [13]. На наш взгляд, этот магникон перспективен также в качестве ВЧ-источника протонных линейных ускорителей большой мощности для утилизации радиоактивных отходов.

В начале 90-х годов в ИЯФ начались работы по созданию продвинутой версии магнিকона. Этот магникон был предложен как прототип микроволнового источника для линейных суперколлайдеров [14]. Схема магнিকона приведена на рис. 2. Прибор работает на второй гармонике входной частоты и отличается от магнিকона усилителя тем, что постоянное магнитное поле сопровождения едино для системы модуляции и выходного резонатора.

Параллельно с экспериментальной работой шло совершенствование программного обеспечения для расчета электронной оптики, электромагнитных систем и динамики электронного пучка как в установившемся, так и в переходном режиме [15, 16, 17]. Был создан и успешно прошел испытания источник электронов с уникальными параметрами [18], исследованы различные варианты конструкции как самого прибора, так и отдельных его элементов [14]. По результатам численного моделирования и экспериментальных исследований был создан действующий импульсный магникон. На частоте 7000 МГц достигнута мощность 55 МВт при электронном КПД 56%. Основные экспериментальные параметры магниконов приведены в табл. 2 [19], здесь же указаны расчетные параметры магнিকона для TESLA.

Таблица 2:

Магникон	Первый	Для TESLA (проект)	Импульсный
Рабочая частота, МГц	915	1300	7000
Входная частота, МГц	915	1300	3500
Уск. напр. пучка, кВ	300	250	427
Ток пучка, А	12	51	230
Микропервеанс	0.073	0.4	0.86
Мощность пучка, МВт	3.6	12.8	99
Частота след. имп., Гц	1	10	1-2
Выходная мощность, МВт	2.6	10	55
Электронный КПД, %	85	76	56
Длит. ВЧ импульса, мкс	30	2000	1.1
Усиление, дБ	30	52	72

Заключение

Успешное создание в ИЯФ СО РАН приборов с круговой разверткой пучка открывает перспективы дальнейшего развития этого направления. Разработанные и исследованные магниконы не уступают по параметрам лучшим современным приборам таким, как клистроны и гироклистроны. А способность магникона работать на изменяющуюся нагрузку без использования циркулятора делает его чрезвычайно привлекательным с точки зрения экономии капитальных затрат для больших ускорительных комплексов. Импульсные магниконы большой мощности могут найти свое применение при создании линейных суперколлайдеров, а магниконы непрерывного (квазинепрерывного) действия помимо ускорительной техники перспективны для прикладных целей.

Список литературы

- [1] G.I. Budker et al. Microwave electron discharge device. U.S. Patent No. 3,885,193, 1975.
- [2] G.I. Budker et al. The Gyrocon — an Efficient Relativistic High-Power VHF Generator. Particle Accelerators, vol. 10, pp. 41–59, 1979.
- [3] М.М. Карлинер и др. Сильноточный линейный ускоритель комплекса ВЭПП-4. Система высокочастотного питания. Препринт ИЯФ СО АН СССР 84–110, Новосибирск, 1984.
- [4] Г.И. Будкер и др. Высокочастотная система электрон-позитронного накопителя ВЭПП-4 на основе гирокон — мощного УКВ генератора с несгруппированным релятивистским пучком. Труды 5-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. 1, стр. 284–287, 1977.
- [5] В.Е. Балакин и др. Исследование макета импульсного гирокон сантиметрового диапазона. Труды 10-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. 1, стр. 277–280, 1987.
- [6] В.Е. Балакин А.Н. Скринский. Проект ВЛЭПП. Вестник АН СССР, т.3, стр. 66–77, 1983.
- [7] P.J. Tallerico. Status of the Los Alamos Gyrocon. IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. NS-28, pp. 2797–2800, 1981.
- [8] P.J. Tallerico. A 150 kW, 450 MHz Gyrocon RF Generator. IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. NS-30, No 4, pp. 3420–3422, 1983.

- [9] М.М. Карлинер и др. Электронный прибор СВЧ-магникон. А.С. 1110335, Б.И., 4, 1986.
- [10] A.N. Belov et al. Magnicon — a New Microwave Generator for Accelerators. Proc. XIII International Part. Accel. Conf. (Novosibirsk, 1986), vol. 2, pp. 300–302, 1987.
- [11] М.М. Карлинер et al. The Magnicon — an Advanced Version of the Gyrocon. NIM-A, vol. A269, No 3, pp. 459–473, 1988.
- [12] В.Е. Акимов и др. Ускоряющая структура разрезного микротрона. Препринт ИЯФ СО АН СССР 89–162, Новосибирск, 1989.
- [13] O. Nezhevenko et al. Magnicon — high power RF source for TESLA. In: Proc. of The Fourth European Part. Accel. Conf., v.3, pp. 1924–1926, 1994.
- [14] E.V. Kozyrev et al. Performance of the High Power 7 GHz Magnicon Amplifier. Particle Accelerators vol.55, pp.55–64, 1996.
- [15] B. Fomel et al. Computer-Aided Electron Gun Design. Proc. XIII Int. Conf. on High-Energy Accel., vol 1, 1987, стр. 353–355.
- [16] D. Myakishev and V. Yakovlev. The New Possibilities of SuperLANS Code. Proc. of Part. Acc. Conf., Dallas, 1995.
- [17] V. Yakovlev et al. Numerical Simulation of Magnicon Amplifier. Proc. of Part. Acc. Conf., Dallas, 1995.
- [18] Y.V. Baryshev et al. A 100 MW Electron Source with Extremely High Beam Area Compression. NIM, vol. A 340, pp.241–258, 1994.
- [19] E.V. Kozyrev et al. The New Results of the 7 GHz Pulsed Magnicon Amplifier Investigation. Proc. of Europ. Part. Acc. Conf., Stockholm, 1998, (to be published).