

Результаты последних испытаний импульсного магникона на 7 ГГц

И.А. Запрягаев, Е.В. Козырев, И.Г. Макаров, О.А. Нежевенко Г.Н. Острейко,
Б.З. Персов, Г.В. Сердобинцев, В.В. Тарнецкий, С.В. Щелкунов, В.П. Яковлев
Институт ядерной физики им.Г.И.Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Магникон [1] относится к новому классу микроволновых усилителей с круговой разверткой электронного пучка. В этой статье мы представляем результаты испытаний нового варианта магникона, разработанного в ИЯФ в качестве прототипа мощного ВЧ-источника для линейных коллайдеров и детально описанного нами в трудах RF 94 [2].

Схематическое устройство магникона показано на рис. 1. Прибор состоит из источника электронов, ВЧ-системы, магнитной системы и коллектора. ВЧ-система содержит систему развертки для модуляции электронного пучка и выходной резонатор, в котором пучок преобразует свою энергию в электромагнитные колебания.

Магнитная система обеспечивает длительное синхронное взаимодействие пучка с ВЧ-полем в резонаторах, а также фокусирует электронный пучок. Прибор работает в режиме удвоения частоты входного сигнала. Во всех резонаторах развертки возбуждается TM_{110} мода. Входной резонатор 3 возбуждается внешним генератором. Пассивные резонаторы 4,5 возбуждаются отклоненным электронным пучком. Последний пассивный резонатор 5 состоит из двух связанных резонаторов, возбуждаемых на π -виде колебаний, и в нем реализуется режим “суммирования” углов отклонения [1]. Это позволяет получить угол отклонения $\alpha > 50^\circ$ при напряженности электрических полей на поверхности резонаторов не более 250 кВ/см. В выходном резонаторе 6 возбуждается TM_{210} мода. Соленоид 8 создает необходимое распределение магнитного поля. Для эффективной работы прибора магнитное поле сопровождения в выходном резонаторе должно быть таким, чтобы циклотронная частота вращения электронов в $1,5 \div 2$ раза превосходила частоту развертки [4].

Длина выходного резонатора более см, при этом расчетная максимальная напряженность электрического поля на поверхности не превышает 250 кВ/см.

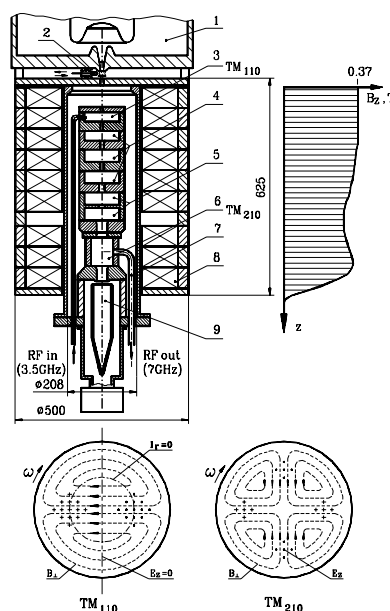


Рис. 1: Схематическое устройство магникона: 1 – источник электронов; 2 – шибер; 3 – входной резонатор; 4,5 – пассивные резонаторы развертки; 6 – выходной резонатор; 7 – волноводы ($\times 2$); 8 – соленоид; 9 – коллектор.

Проектные параметры магнিকона и параметры, достигнутые при начальных испытаниях, приведены в таблице.

Параметры прибора	Проектные	Достигнутые
Рабочая частота, ГГц	7	7.006
Мощность, МВт	55	30
Длительность импульса, мкс	1.5	0.7
Частота повторения, Гц	5	3
КПД, %	56	35
Частота развертки, ГГц	3.5	3.503
Усиление, дБ	53	55
Напряжение пучка, кВ	420	401
Ток пучка, А	240	210

Мы проводили численное моделирование поведения пучка в процессе отклонения и торможения специально созданными программами расчеты установившегося режима и переходного процесса [2,5]. Измеренная зависимость между выходной мощностью и управляющим сигналом (рис.2а) находится в хорошем соответствии с результатами моделирования.

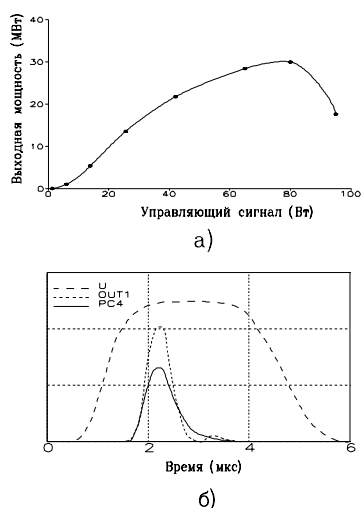


Рис. 2: а – зависимость между выходной мощностью и управляющим сигналом; б – осциллограммы.

Результаты численного моделирования и измерения на атмосфере подтверждают присутствие в выходном и последнем пассивном резонаторе колебания на этой частоте (имеет квадрупольный характер).

Основной причиной отличия КПД от проектного является больший (4 мм), чем расчетный (2,8 мм), диаметр пучка.

Для эффективной работы магнিকона магнитное поле соленоида должно быть около 0.37 Т. В экспериментах мы использовали пушку, спроектированную на величину магнитного поля 0,45 Т [3]. Уменьшение магнитного поля на 20% привело к тому, что максимальный диаметр пучка составил $d_{max} \approx 4$ мм. Зависимость КПД от диаметра пучка показана на рис. 3.

На рис. 2б представлены осциллограммы напряжения пучка (U), сигнала из последнего пассивного резонатора ($PC4$) и выходного сигнала ($OUT1$).

Основные проблемы при испытаниях были связаны с тренировкой выходного резонатора, волноводов и нагрузок, которые являются единым вакуумным объемом. Во время тренировки в выходном резонаторе появились, а затем исчезли самовозбуждения на частотах 11,8, 5,92 ГГц. Нам не удалось подавить в этой конструкции самовозбуждение на 12,04 ГГц, и оно ограничивает длительность импульса при мощности свыше 20 МВт (на более низких мощностях длительность импульса 1,5 мкс). Результаты численного моделирования и измерения

Ясно, что при $d_{max} \approx 4$ мм КПД не может превысить 42%, а проектная величина 56% достижима только при $d_{max} \leq 3$ мм. Более того, нагруженная добротность $Q \approx 200$ является оптимальной только при КПД 56%. Для пучка с большим поперечным сечением КПД уменьшается, и для максимальной отдачи мощности необходима более высокая величина нагруженной добротности.

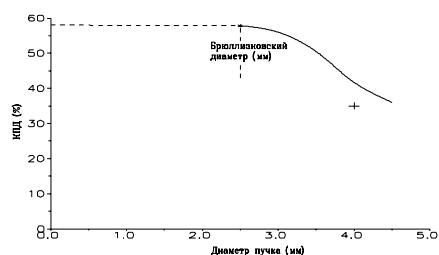


Рис. 3: Зависимость КПД от диаметра пучка.

Достигнутый при реальном пучке КПД составляет 0,8 от расчетного. Для улучшения ситуации изготовлен и установлен новый фокусирующий электрод, а для лучшего согласования пучка с магнитным полем увеличена дистанция между пушкой и соленоидом. Испытания показали, что максимальный измеренный диаметр пучка в сопровождающем магнитном поле 0,37 Т стал менее 3 мм.

Другой причиной, уменьшающей КПД, является значительное возмущение распределения ВЧ-полей в выходном резонаторе, вызванное присутствием окон связи. Карта силовых линий магнитного поля (численное $2D$ моделирование [5]) ортогональных TM_{210} мод, суперпозиция которых определяет распределение ВЧ-поля в выходном резонаторе, представлена на рис. 4. Для компенсации возмущения, вносимого окнами связи, в существующем резонаторе сделано два "отверстия – компенсатора". Однако, их присутствие оказалось недостаточным, и распределения полей обеих мод существенно различаются. Нагруженная добротность Q этих мод также различна (180 и 220 соответственно). Результатом является нерегулярное взаимодействие с пучком вдоль азимута, приводящее к уменьшению КПД.

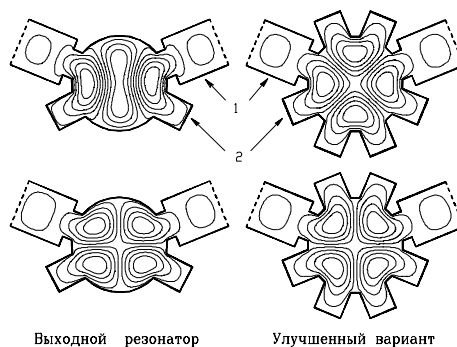


Рис. 4: Силовые линии магнитного поля ортогональных TM_{210} мод: 1 – волноводы; 2 – “отверстия – компенсаторы”.

Одно из возможных решений проблемы – увеличение числа “компенсаторов”. (См. карту силовых линий на рис. 4.)¹ Однако, как показывают численное моделирование и макетные испытания, указанный способ устранения азимутальной нерегулярности ВЧ-поля приводит к значительному усилению продольного возмущения поля в сравнении с резонатором без боковых отверстий (см. рис. 5а,б). Результатом является значительное снижение электронного КПД взаимодействия. Присутствие отверстий при моделировании отражено эквивалентной проточкой, выбранной так, что частота моды TM_{210} , рассчитанная численным методом, равна измеренной.

Для устранения возмущений ВЧ-поля мы делаем в резонаторе компенсирующие проточки вблизи верхнего и нижнего торцов (рис. 5в). Проточки однородны вдоль азимута и не вызывают азимутальной нерегулярности. Сейчас улучшенный вариант выходного резонатора находится в стадии изготовления.

¹Измеренные нагруженные добротности мод на макете резонатора с увеличенным числом “компенсаторов” равны в пределах погрешности измерений.

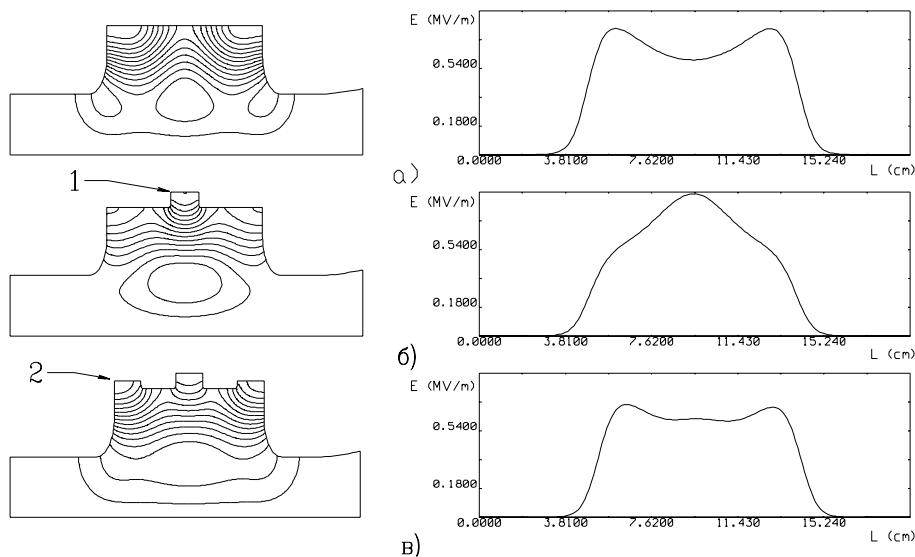


Рис. 5: Карта изолиний магнитного поля и зависимость продольной составляющей электрического поля от высоты в резонаторе: а – без боковых отверстий; б – с окнами связи и “отверстиями – компенсаторами” (моделируются эквивалентной проточкой 1); в – с добавлением компенсирующих проточек 2 вблизи торцов.

Следует отметить, что для получения колебания с круговой поляризацией в отклоняющем резонаторе магнিকона в настоящее время использован классический способ. Возбуждение производится через два ввода мощности, разнесенных по азимуту на 90° сигналами равной амплитуды со сдвигом по фазе 90° [1]. В магниконе пучок “замагничен” и его гиротропные свойства приводят к эффекту самостабилизации круговой поляризации электромагнитного поля, т.е. если в резонаторе присутствуют колебания с эллиптической поляризацией, то в присутствии пучка эллиптичность значительно уменьшается [1,2]. Эксперименты показывают, что этот эффект столь силен, что можно возбуждать входной резонатор только через один ввод мощности (подобно клистрону) без потерь выходной мощности и КПД.

Во время испытаний магнিকона были обнаружены различные эффекты, препятствующие его нормальной работе [2], и найдены способы их устранения. В ближайшее время мы собираемся установить в магниконе новый выходной резонатор и продолжить эксперименты.

Список литературы

- [1] O.A. Nezhevenko. “Gyrocons and Magnicons: Microwave Generators with Circular Deflection of the Electron Beam,” in *IEEE Trans. of Plasma Science* vol. 22, No. 5, October 1994, pp. 756–772.
- [2] O.Nezhevenko et al. “7 GHz Pulsed Magnicon,” in *AIP Conf. Proc. 337 (RF94 Workshop)*, Montauk, NY, 1994, pp. 174–183.
- [3] Y.V. Baryshev et al. “A 100 MW Electron Source with Extremely High Beam Area Compression,” *NIM-A*, vol. A 340, 1994, pp. 241–258.
- [4] M.M. Karliner et al. “An Approximate Theory of the Magnicon,” Preprint INP 88–66, Novosibirsk, 1988 (in Russian).
- [5] V. Yakovlev et al. “Numerical Simulation of Magnicon Amplifier,” in *Proc. Part. Accel. Conf.*, Dallas, 1995, (to be published).