



Сибирское отделение Российской Академии наук
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им.Г.И. Будкера

3.33

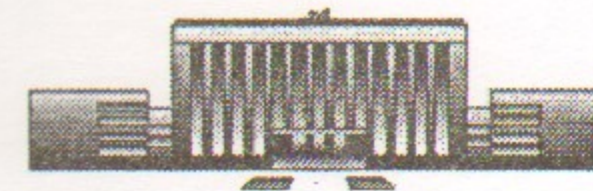
1998

И.А. Запрягаев, И.В. Казарезов, Е.В. Козырев,
Г.И. Кузнецов, Д.Г. Мякишев, О.А. Нежевенко,
Б.З. Персов, М.А. Тиунов, В.П. Яковлев

100 МВТ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ
ДЛЯ 7 ГГц ИМПУЛЬСНОГО МАГНИКОНА

ИЯФ 98-70

<http://www.inp.nsk.su/publications>



НОВОСИБИРСК

1998

100 МВт источник электронов для 7 ГГц импульсного магнотрона

*И.А. Запрыгаев, И.В. Казарезов, Е.В. Козырев,
Г.И. Кузнецов, Д.Г. Мякишев, О.А. Нежевенко,
Б.З. Персов, М.А. Тиунов, В.П. Яковлев*

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера
630090 Новосибирск, Россия

Аннотация

В работе описан 100 МВт источник электронов 7 ГГц импульсного магнотрона. Излагаются особенности формирования высокопервечного пучка с высокой плотностью тока, необходимого для работы магнотрона. Приводятся результаты расчетов электронно-оптической системы и ее экспериментального исследования. Описаны конструктивные особенности отдельных узлов источника электронов. Разработанный источник электронов позволил достичь в экспериментах на 7 ГГц магнотроне выходной мощности 55 МВт и КПД 56%.

A 100 MW electron source for 7 GHz pulsed magnicon

*I.A. Zapryagaev, I.V. Kazarezov, E.V. Kozyrev,
G.I. Kuznetsov, D.G. Myakishev, O.A. Nezhevenko,
B.Z. Persov, M.A. Tiunov, V.P. Yakovlev*

The 100 MW electron source for 7 GHz pulsed magnicon is described. The peculiarities of the formation of the high perveance super dense beam which is necessary for magnicon operation are considered. The results of computer simulation and experimental investigation of the electron optical system are shown. The peculiarities of source elements design are described. This electron source has permitted to achieve output RF power of 55 MW and efficiency of 56% in experiments with 7 GHz magnicon.

1 Введение

На сегодняшний день решение ряда фундаментальных и прикладных проблем невозможно без использования либо мощных, либо высокоэффективных СВЧ-источников (усилителей). Одним из таких источников может стать магнотрон – прибор нового типа, модуляция пучка в котором осуществляется путем круговой развертки [1]. Применение нетрадиционного типа модуляции электронного пучка позволяет достичь высокого КПД. Так, созданный в середине 80-х годов в качестве прототипа непрерывного прибора импульсный магнотрон имел на частоте 915 МГц выходную мощность 2.6 МВт и электронный КПД 85% [2]. С целью продвижения в область более высоких частот и мощностей была разработана новая схема магнотрона со сплошным магнитным сопровождением. Анализ возможностей этой схемы магнотрона показал реальность получения в сантиметровом диапазоне мощностей в сотни мегаватт при КПД 50–60%. В результате был разработан импульсный 7 ГГц магнотрон (рис. 1) – прототип источника для питания ускоряющих структур будущих линейных коллайдеров [3].

Одной из характерных особенностей магнотрона является то, что для достижения высокого КПД ему необходим "тонкий" пучок. Для работы 7 ГГц магнотрона необходимо было разработать 100 МВт источник электронного пучка (400 кВ, 250 А) с поперечным размером электронного пучка в магнитной системе (4.5 кГс) не более 2-3 миллиметров. Такой источник был разработан, изготовлен и успешно испытан [4]. В ходе этих испытаний был получен слабопульсирующий пучок с поперечным размером, близким к бриллюэновскому.

Последующие эксперименты на 7 ГГц магнотроне показали, что для работы магнотрона необходимо снизить магнитное поле с 4.5 кГс до

3.5 ÷ 3.8 кГц [5]. Это снижение привело к тому, что увеличились как амплитуда пульсаций пучка, так и "средний" поперечный размер пучка в магнитной системе магнотрона (рис. 1). В дальнейшем с этим пучком на 7 ГГц магнотроне была достигнута выходная мощность 30 МВт при КПД 35% [5].

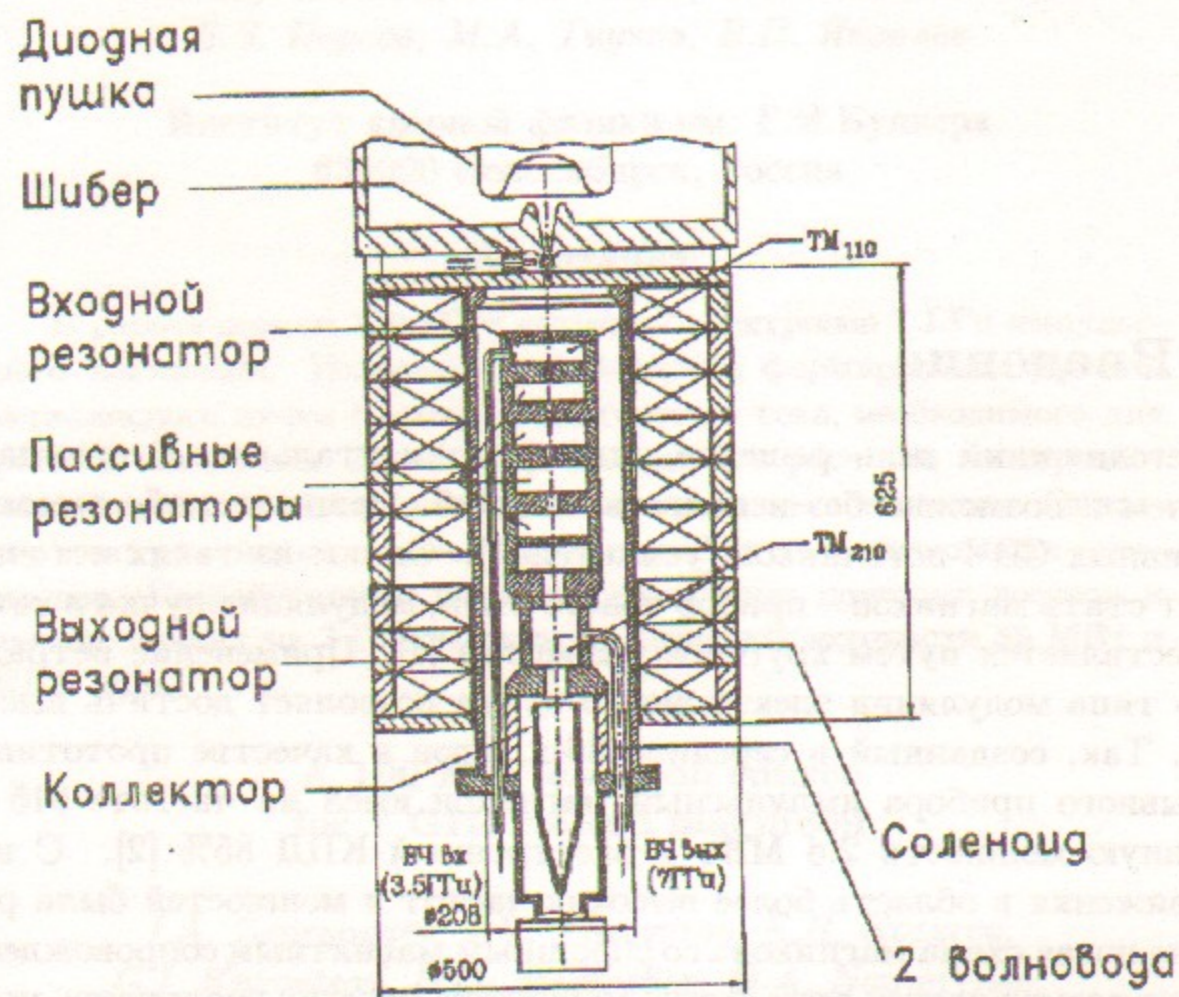


Рис. 1: Схема 7 ГГц магнотрона.

Для уменьшения размера пучка было решено переделать источник электронов. Расчет электронной оптики проводился при помощи новых компьютерных программ [7], позволяющих учесть более тонкие эффекты, недоступные ранее. Оказалось, что для перехода на более низкое магнитное поле достаточно переделать фокусирующий электрод и увеличить на 8 мм расстояние от катода до магнитной системы магнотрона. Последующие измерения параметров электронного пучка показали, что вновь получен слабопульсирующий пучок с поперечным размером, близким к бриллюэновскому. С этим пучком была достигнута выходная мощность 46 МВт при КПД 49% без какой-либо модернизации ВЧ-системы магнотрона [8].

2 Формирование высокопереванского пучка с большой плотностью тока

В настоящее время развитие мощных электронных СВЧ приборов направлено на освоение более высоких частот и мощностей. Это неизбежно приводит к необходимости получения мощных электронных пучков с высокой плотностью тока. Однако, плотность тока, отбираемого с термоэмиссионных катодов, ограничена величиной $\leq 10 \text{ А/см}^2$. Поэтому возникает необходимость создания электронно-оптических систем, позволяющих получить пучки с плотностью тока, превышающей плотность тока, отбираемую с термокатодов на порядок и более.

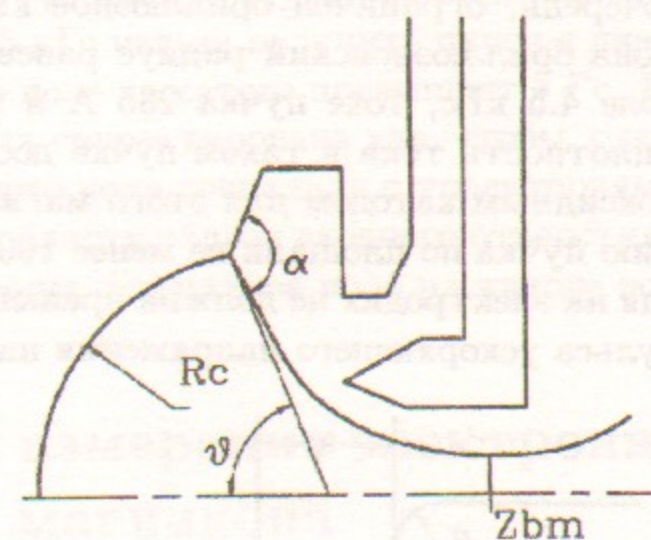


Рис. 2: Схема электронной пушки ИМИ.

В свое время для формирования пучков с высокой плотностью тока была разработана схема электронной пушки с высокой электростатической компрессией, изображенная на рис. 2. Данная схема использовалась для получения электронного пучка в источнике многозарядных ионов (ИМИ) [9], где плотность тока должна превышать 1 кА/см^2 , а также для пушек мощных клистронов [10, 11]. Однако, данная схема имеет следующие основные недостатки.

Во-первых, так как фокусирующий электрод имеет угол значительно больше "пирсовского", то существует сильная неоднородность эмиссии тока с катода. В разных вариантах геометрии неоднородность может достигать значений 3 ÷ 5. Такая неоднородность эмиссии является причиной сильной катодной абберрации пучка и приводит к расфокусировке пучка, а также к неоднородному распределению плотности тока по сечению пучка на выходе из пушки.

Во-вторых, для того, чтобы добиться в этой схеме высокой компрессии, фокусирующий электрод должен иметь довольно сложную форму. При этом расстояние между фокусирующим электродом и анодом получается сравнительно малым. Это приводит к тому, что рабочие напряжения не могут быть высокими.

Все это ведет к тому, что такая схема электронной пушки не годится для формирования мощного релятивистского пучка с большой плотностью тока и с малым поперечным эмиттансом.

Как уже говорилось выше, для высокой эффективности работы магнотрона необходимо иметь пучок с минимальными поперечным размером, который, в свою очередь, ограничен бриллюэновским радиусом. Так, для 7 ГГц магнотрона бриллюэновский радиус равен 1.05 мм при ведущем магнитном поле 4.5 кГс, токе пучка 235 А и энергии электронов 430 кэВ. Средняя плотность тока в таком пучке достигает 1.8 кА/см². Поэтому пушка с оксидным катодом для этого магнотрона должна обеспечивать компрессию пучка по площади не менее 1000, а напряженность электрического поля на электродах не должна превышать 200 кВ/см при длительности импульса ускоряющего напряжения на пушке 2 мкс.

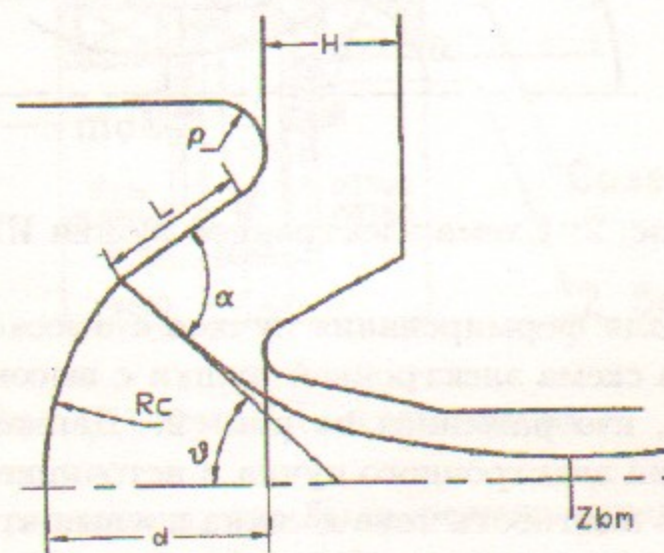


Рис. 3: Схема электронной пушки магнотрона.

Нами была разработана диодная пушка, удовлетворяющая перечисленным выше требованиям [4]. Схема этой пушки приведена на рис. 3. Особенность данной схемы заключается в том, что фокусирующий электрод имеет угол α , близкий к пирсовскому. Необходимая компрессия достигается соответствующим выбором длины фокусирующего электрода L и угла α . При этом неравномерность плотности тока по поверхности катода не превышает 2, и возникающая абберация пучка, связанная с

неоднородностью плотности тока на катоде, компенсируется абберацией пучка в анодной линзе; в результате на выходе из пушки получается пучок с минимальным поперечным эмиттансом и однородной плотностью тока.

Пучок с поперечным размером, близким к бриллюэновскому, необходимый для работы магнотрона, формируется в два этапа: на первом этапе используется электронная пушка с электростатической компрессией ~ 1500 , на втором этапе происходит согласование пучка с ведущим магнитным полем и дополнительное адиабатическое сжатие пучка в магнитном поле в два раза по площади. Известно, что наличие магнитного поля на катоде ограничивает величину минимального размера пучка в магнитной системе. В нашем случае для катода диаметром 120 мм и магнитного поля 4.5 кГс нельзя получить пучок с диаметром меньшим 3 мм, если магнитное поле на катоде превышает 3 Гс. Поэтому магнитная система должна быть спроектирована так, чтобы, с одной стороны, силовые линии магнитного поля совпадали с траекториями частиц в пучке в возможно большей области вблизи входного отверстия в магнитном экране, а с другой стороны, магнитное поле на катоде должно практически отсутствовать.

3 Расчет и измерения электронно-оптической системы магнотрона

3.1 Электронно-оптическая система магнотрона

Схема электронно-оптической системы 100 МВт источника электронов для 7 ГГц магнотрона показана на рис. 4. Она включает в себя диодную электронную пушку, соленоид и коллектор.

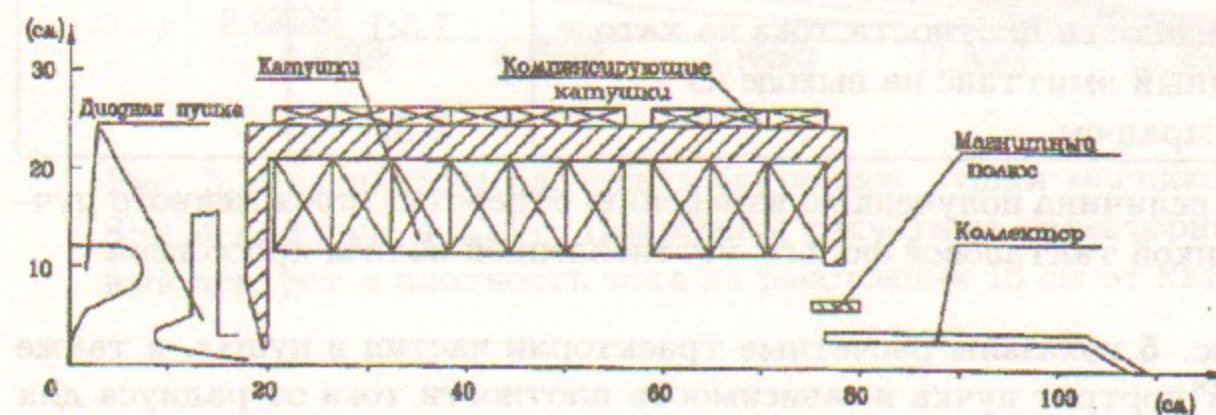


Рис. 4: Схема электронно-оптической системы магнотрона.

Схема диодной пушки изображена на рис. 3. Ее основные размеры приведены в таблице 1.

Таблица 1

| Размеры | "горячие" (расчет) | "холодные" |
|---|-----------------------|------------|
| R_c , мм – радиус кривизны катода | 101.47 | 100 |
| d , мм – расстояние анод-катод | 91.9 | 92.9 |
| D_c , мм – диаметр катода | 120 | 118.4 |
| L , мм – длина конусной части фок. электрода | 47.57 | 47.25 |
| ρ , мм – радиус кривизны фок.электрода | 25.18 | 25 |
| H , мм – зазор фок.электрод-анод | 51.4 | 52.4 |
| α , градусы - угол фок.электрода | 60.9 | |

В таблице 2 приведены расчетные и измеренные параметры пушки.

Таблица 2

| Параметры | расчетные | измеренные |
|--|-----------|------------|
| Мощность, МВт | 100 | 102.5 |
| Напряжение, кВ | 430 | 434 |
| Ток, А | 233 | 236 |
| Микропервеанс | 0.83 | 0.824 |
| Электростатическая компрессия по площади | 1500 | > 700* |
| Макс. поле на прикатодном электроде, кВ/см | 140 | |
| Макс. поле на аноде, кВ/см | 195 | |
| Макс. плотность тока на катоде, А/см ² | 2.4 | |
| Неоднородность плотности тока на катоде | 1.5:1 | |
| Поперечный эмиттанс на выходе из пушки, мрад·см | 2.5π | |

* Эта величина получена по измерению отверстия, прожженного пучком, в тонкой танталовой фольге, установленной вблизи кроссовера.

На рис. 5 показаны расчетные траектории частиц в пушке, а также "фазовый" портрет пучка и зависимость плотности тока от радиуса для плоскости $z = 16$ см.

Для определения точностей изготовления, необходимых для достижения проектных параметров, численно исследовалась зависимость основных параметров пушки от варьирования ее геометрических размеров.

SuperSAM V1.1 :nim_06
R(CM)

Date:02/16/98

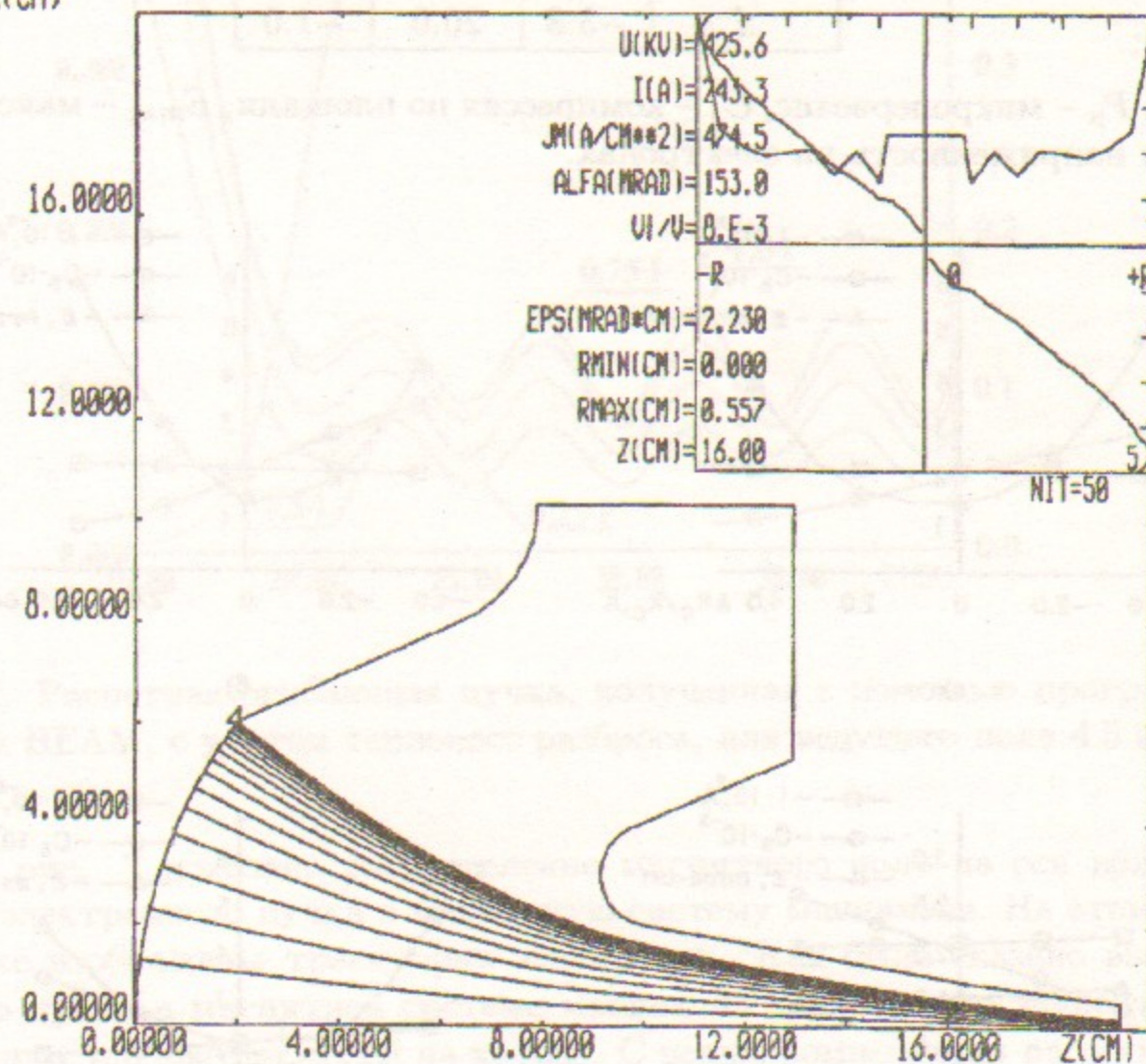


Рис. 5: Результаты расчета электронной пушки магнотрона программой SSAM для поля 4.5 кГс. Приведены расчетные траектории пучка, фазовый портрет и плотность тока на расстоянии 16 см от катода.

Зависимости приведены на рис. 6, а в таблице 3 приведены коэффициенты чувствительности, рассчитанные по формуле: $S_x^f = \frac{x}{f} \frac{\partial f}{\partial x}$.

Таблица 3

| $x \downarrow, f \rightarrow$ | P_μ | C_s | E_{\max} |
|-------------------------------|---------|-------|------------|
| α | 1.4 | -19.0 | — |
| R_c | 0.5 | 13.0 | — |
| l | -0.4 | 4.5 | 1.2 |
| d | -3.3 | 20.0 | -1.0 |

где P_μ — микропервеанс, C_s — компрессия по площади, E_{\max} — максимальная напряженность на электродах.

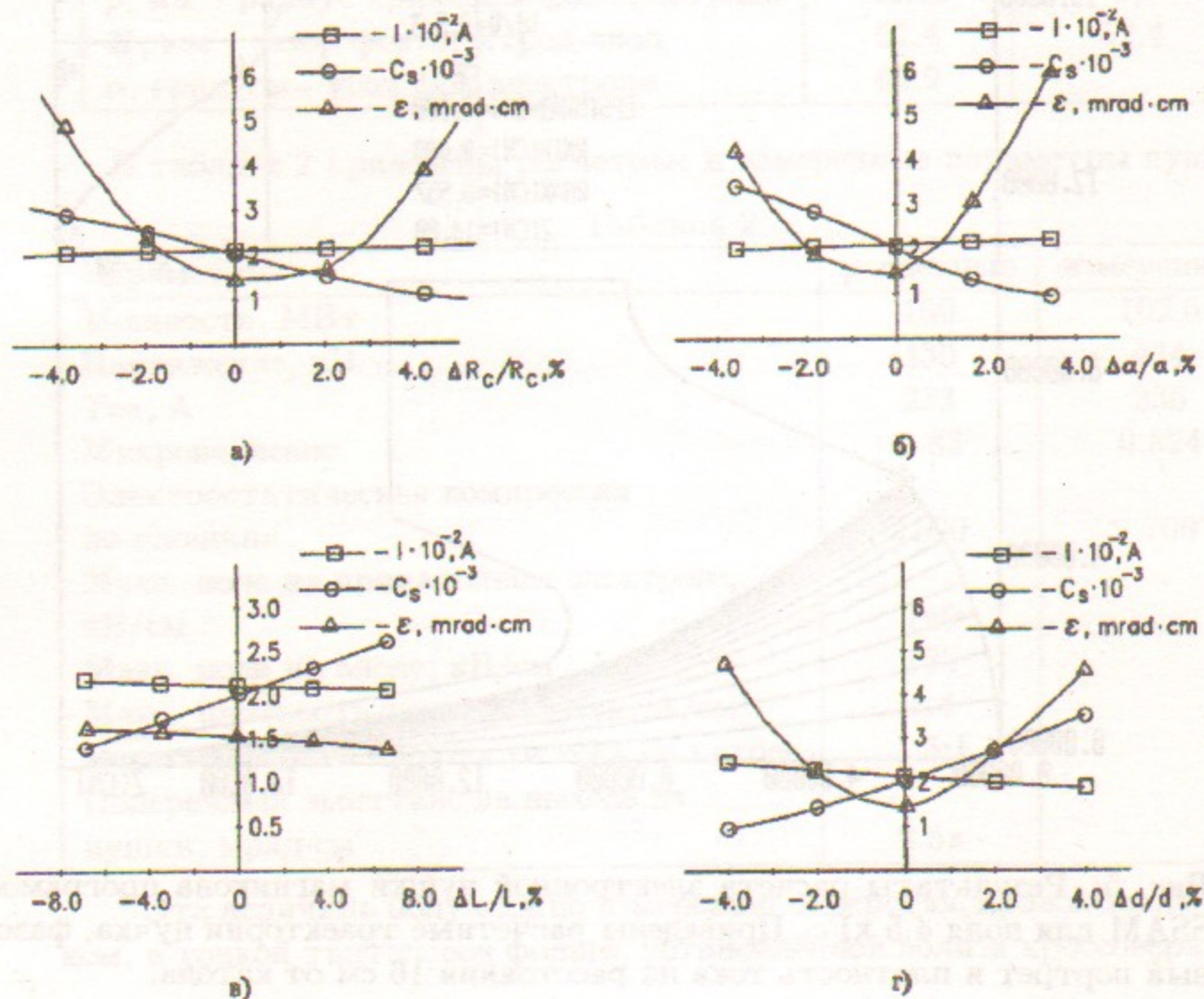


Рис. 6: Зависимости тока, компрессии по площади и эффективного эмиттанса от вариации геометрических параметров пушки.

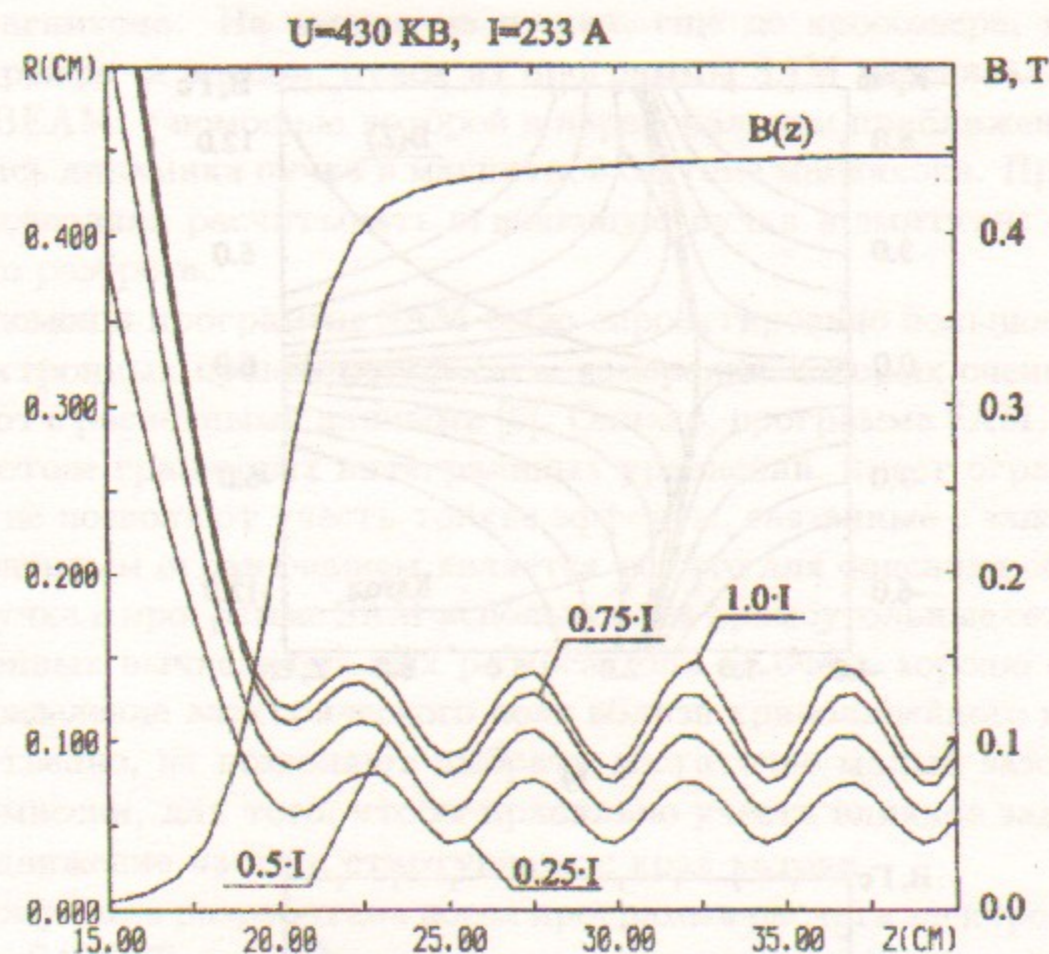
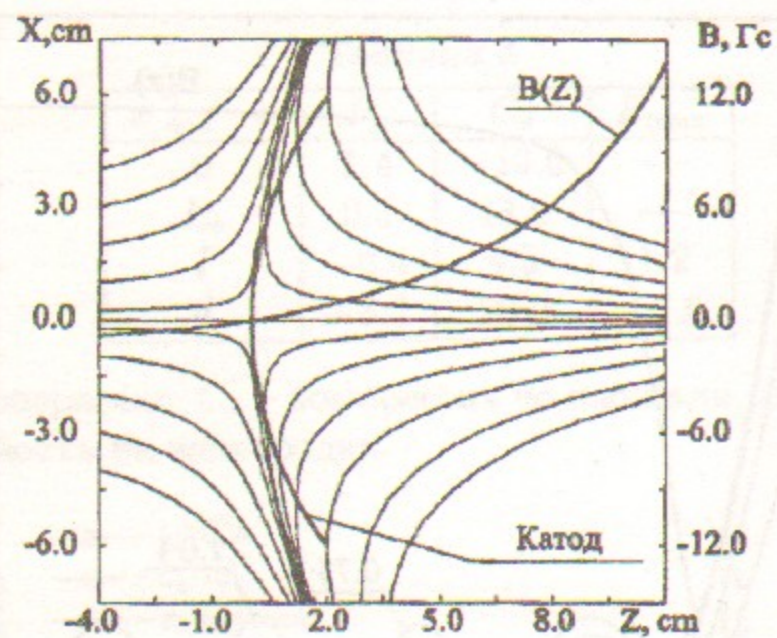


Рис. 7: Расчетная огибающая пучка, полученная с помощью программ SAM и BEAM, с учетом теплового разброса, для ведущего поля 4.5 кГц.

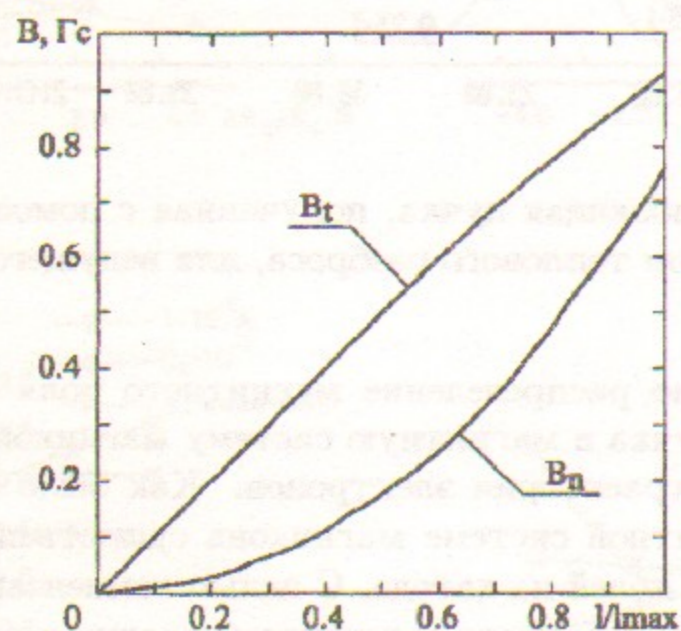
На рис. 7 показано распределение магнитного поля на оси вблизи влета электронного пучка в магнитную систему магнिकона. На этом же рисунке изображены траектории электронов. Как было сказано выше, размер пучка в магнитной системе магнिकона существенно зависит от рассеянных магнитных полей на катоде. С целью компенсации рассеянного магнитного поля, создаваемого соленоидом, предусмотрена специальная компенсирующая катушка, намотанная поверх магнитного экрана (см. рис. 4). Результирующее расчетное магнитное поле вблизи катода показано на рис.8.

3.2 Расчет электронно-оптической системы

Все расчеты электронно-оптической системы магнिकона для ведущего поля 4.5 кГц проводились программами SAM [6] и BEAM. Программа SAM использовалась при расчете электронной пушки и магнитной си-



а)



б)

Рис. 8: Распределение ведущего магнитного поля вблизи катода: а) карта поля, б) распределение нормальной и тангенциальной компонент поля вдоль поверхности катода (l – расстояние от оси вдоль поверхности катода).

стемы магнотрона. На выходе из пушки, еще до кроссовера, но уже в трубке дрейфа за анодом, пучок из программы SAM передавался в программу BEAM, с помощью которой в параксиальном приближении моделировалась динамика пучка в магнитной системе магнотрона. Программа BEAM позволяла рассчитывать огибающую пучка и эмиттанс с учетом теплового разброса.

При помощи программы SAM было спроектировано большое количество электронных пушек, результаты измерений которых очень хорошо совпадают с расчетными данными [6]. Однако, программа SAM, основанная на методе граничных интегральных уравнений, имеет ограничения, которые не позволяют учесть тонкие эффекты, связанные с заделкой катода. Основным ограничением является то, что для описания объемного заряда пучка в программе SAM используются прямоугольные сетки. При ограниченных вычислительных ресурсах они не очень хорошо описывают распределение электрического поля вблизи криволинейного катода и, соответственно, не позволяют выбрать достаточно малый зазор δ [6] в модели эмиссии, для того, чтобы правильно учесть влияние заделки катода на движение частиц, стартующих с края катода.

Поэтому была разработана новая программа расчета электронных пушек SuperSAM [7], основанная на методе конечных элементов, позволяющем описывать разномасштабные элементы геометрии при сравнительно небольшом количестве узлов сетки. Конечно-элементную сетку можно построить так, чтобы она была согласована с пучком как в области катода, так и в области кроссовера. В частности, сгущением сетки вблизи катода можно выбрать достаточно малый зазор δ для того, чтобы более аккуратно учесть влияние заделки катода на край пучка. Кроме того, программа позволяет рассчитывать пучок в пушке с высокой компрессией вплоть до кроссовера без значительной потери точности.

В нашем случае при использовании одинаковых расчетных параметров SuperSAM дал те же результаты, что и SAM [7]. Однако при расчете с уменьшенным значением зазора δ стало заметно влияние "непирсовского" угла фокусирующего электрода. В [4] указывалось, что "непирсовский" угол приводит к тому, что крайние траектории имеют несколько больший угол сходимости, чем угол, определяемый нормалью к катоду; но это отличие мало и им можно пренебречь. С помощью SuperSAM были получены количественные результаты. Оказалось, что из-за перефокусировки края пучка около 5% тока образуют гало, остальные 95% тока образуют ядро пучка, которое совпадает с рассчитанным программами SAM + BEAM [4]. На рис. 9 показаны огибающие пучка в магнитной системе магнотрона, полученные программами SuperSAM + BEAM.

BEAM.U3.2 : 21-05-1998 : ug0.4k

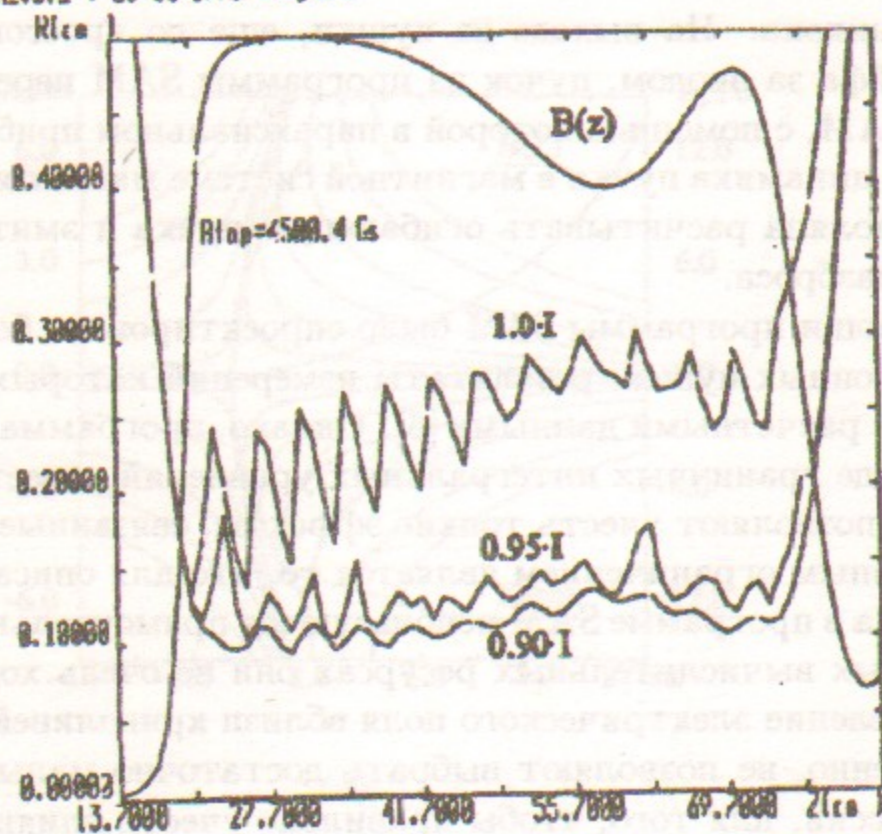


Рис. 9: Расчетная огибающая пучка, полученная с помощью программ SuperSAM и BEAM для ведущего поля 4.5 кГс.

Проведенные ранее измерения [4] косвенно подтверждают наличие у пучка такого гало. Так, через металлическую трубу с внутренним диаметром 5.7 мм и длиной 250 мм не удавалось провести пучок с токооседанием на нее, меньшим 0.8%. В тоже время через трубу с внутренним диаметром 8 мм легко удавалось провести пучок с нулевым токооседанием.

Следует отметить, что наличие у пучка такого гало не могло существенно повлиять на результаты измерений поперечных размеров пучка [4], так как, с одной стороны, используемое нами измерительное устройство предназначено для измерения именно плотной части пучка, а с другой стороны – для круглого пучка диаметром 3 мм (что имеет место в нашем случае) с постоянной плотностью тока его диаметры, охватывающие 95 и 100% тока, отличаются лишь на 0.08 мм, что меньше разрешающей способности нашего измерительного устройства.

3.3 Модификация электронно-оптической системы магнिकона

В ходе экспериментальных исследований магнिकона выяснилось, что для устойчивой работы прибора необходимо снизить ведущее магнитное поле с 4.5 кГс до 3.5 ÷ 3.8 кГс. Это привело к тому, что первоначальная геометрия электронно-оптической системы перестала удовлетворять требованию получения минимального размера пучка. Так как брюллиэновский радиус пучка изменился из-за снижения ведущего магнитного поля, то произошло рассогласование пучка с магнитным полем, увеличилось биения пучка и, соответственно, увеличился эффективный размер пучка. Поэтому возникла необходимость в изменении электронно-оптической системы.

Для расчета электронной пушки под новое ведущее магнитное поле было решено использовать программу SuperSAM. При модификации электронно-оптической системы предпочтение отдавалось вариантам, требующих минимальных переделок. Поэтому модификация электронной пушки состояла только в подборе новой формы прикатодного электрода. Основное отличие модифицированного электрода от первоначального состоит в том, что часть электрода, прилегающая к катоду имеет угол, близкий к пирсовскому. Это позволило устранить перефокусировку на краю пучка, и таким образом убрать гало вокруг пучка, связанное с перефокусировкой. Следующая часть электрода имеет уже другой угол, меньший пирсовского, необходимый для получения нужной компрессии. Суммарная длина конусных частей прикатодного электрода осталась прежней. На рис. 10 схематично изображена часть прикатодного электрода, подвергнутая модификации.

Однако, одной модификацией прикатодного электрода не удалось уменьшить пульсации электронного пучка в магнитной системе до приемлемой величины, так как изменилось фокусное расстояние модифицированной электронной пушки. Для согласования пучка с магнитной системой магнिकона пришлось ее отодвинуть на 8 мм от пушки.

Результаты расчетов огибающих пучка до и после оптимизации приведены на рисунках 11,а,б.

3.4 Результаты измерений электронно-оптической системы

Результаты экспериментального исследования электронного пучка до и после модификации электронно-оптической системы приведены в таб. 4.

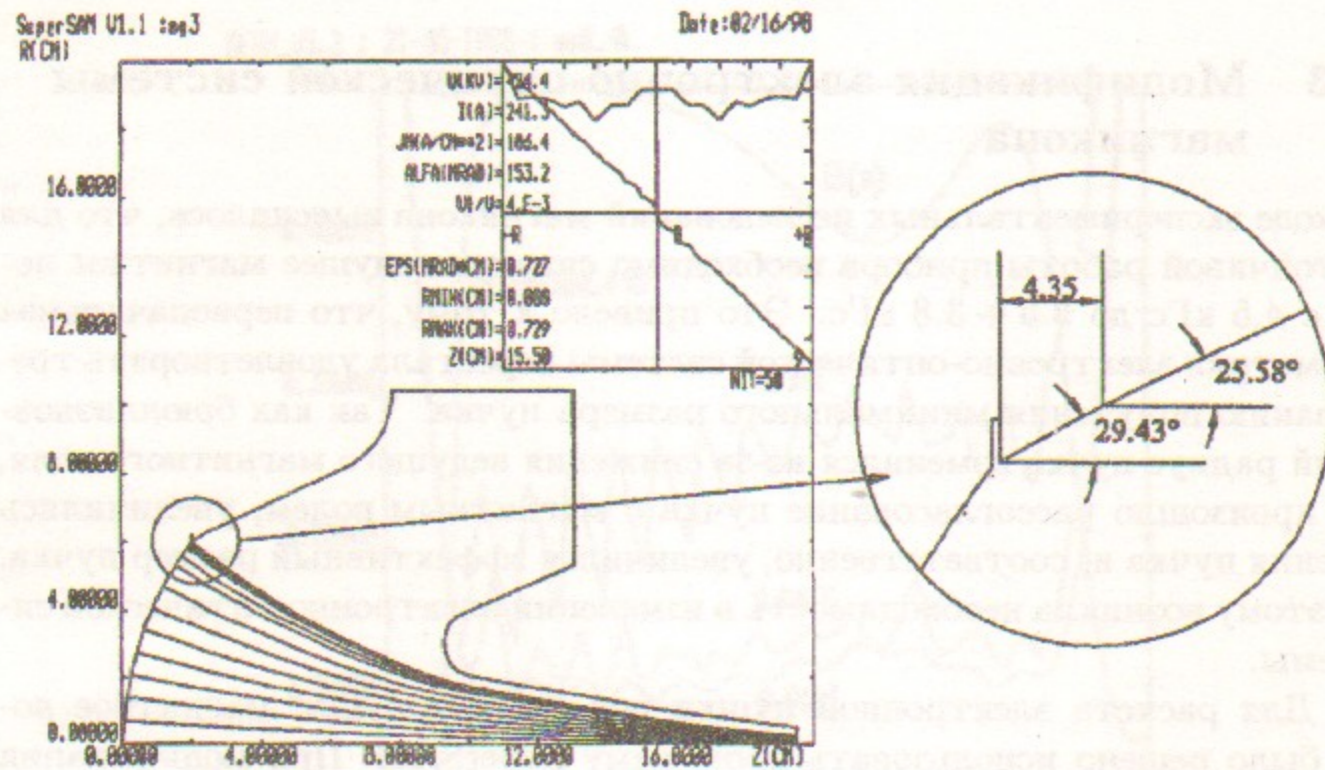


Рис. 10: Результаты расчета модифицированной электронной пушки магнетрона программой SuperSAM для поля 3.8 кГс. Приведены расчетные траектории пучка, фазовый портрет и плотность тока на расстоянии 15.5 см от катода. В выноске изображена геометрия прикатодного электрода вблизи катода.

Таблица 4

| Параметры | до модификации | после модификации |
|---|----------------|-------------------|
| Микропервеанс | 0.82 | 0.86 |
| Минимальное токооседание на металлическую трубку диаметром 5.7 мм и длиной 250 мм | 3.5% | 0.3% |
| Минимальное токооседание на металлическую трубку диаметром 8.0 мм и длиной 250 мм | 0.5% | 0.0% |
| Максимальный диаметр пучка | 2.9 мм | 2.7 мм |
| Минимальный диаметр пучка | 2.1 мм | 2.3 мм |

В этих экспериментах металлические трубки поочередно устанавливались на пути движения пучка на расстоянии примерно 450 мм от катода (см. рис. 12). На этом же удалении от катода проводилось измерение

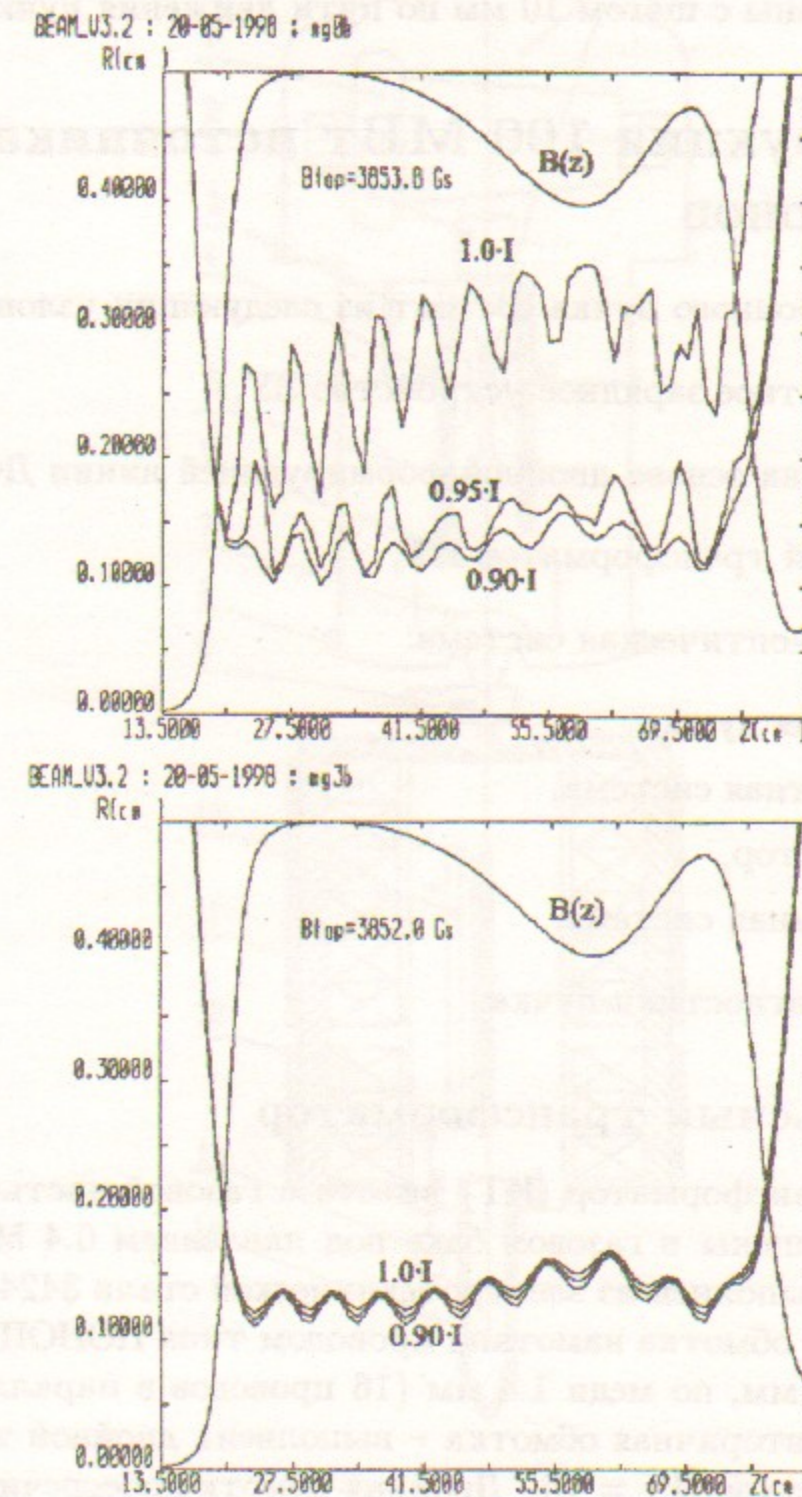


Рис. 11: Расчетные огибающие пучка, полученная с помощью программ SuperSAM и BEAM для ведущего поля 3.8 кГс: а) для первоначального варианта пушки, б) для модифицированного варианта пушки.

поперечных размеров пучка при помощи шести графитовых зондов, которые расположены с шагом 10 мм по пути движения пучка.

4 Конструкция 100 МВт источника электронов

Источник электронного пучка состоит из следующих узлов (рис. 12):

- высоковольтное зарядное устройство ЗУ,
- модулятор на основе двойной формирующей линии ДФЛ,
- импульсный трансформатор ИТ,
- электронно-оптическая система:
 - диодная пушка,
 - магнитная система,
 - коллектор,
 - вакуумная система.
- система диагностики пучка.

4.1 Импульсный трансформатор

Импульсный трансформатор (ИТ) вместе с газовой частью проходного изолятора размещены в газовом баке под давлением 0.4 МПа (рис. 12). Сердечник ИТ выполнен из электротехнической стали 3424 толщиной 80 мкм. Первичная обмотка намотана проводом типа ПОНОП с диаметром по изоляции 2.8 мм, по меди 1.4 мм (16 проводов в параллель) и имеет $W_1 = 6$ витков, вторичная обмотка – выполнена двойной тем же проводом с числом витков $W_2 = 75$. Двойная обмотка обеспечивает питание накала катода под высоким потенциалом катода (рис. 13). Высокое значение перепада индукции ($\Delta B = 2.5$ Т) реализуется за счет импульсного размагничивания сердечника после каждого импульса с помощью блока импульсного размагничивания ИР.

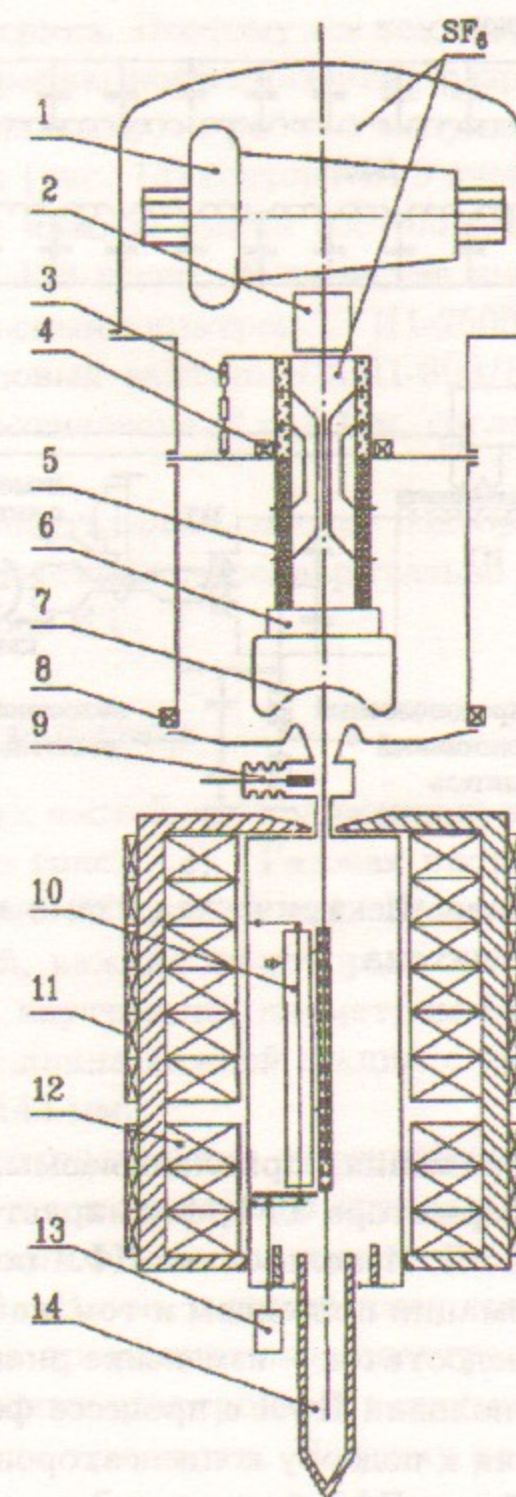


Рис. 12: Схема 100 МВт источника электронов для 7 ГГц магникона: 1 - импульсный трансформатор, 2 - накальный трансформатор, 3 - высоковольтный резистивный делитель, 4 - пояс Роговского, 5 - высоковольтный изолятор, 6 - юстировочное устройство, 7 - диодная пушка, 8 - корректор, 9 - шибер, 10 - измерительное устройство, 11 - компенсирующие катушки, 12 - соленоид, 13 - шаговый двигатель, 14 - коллектор.

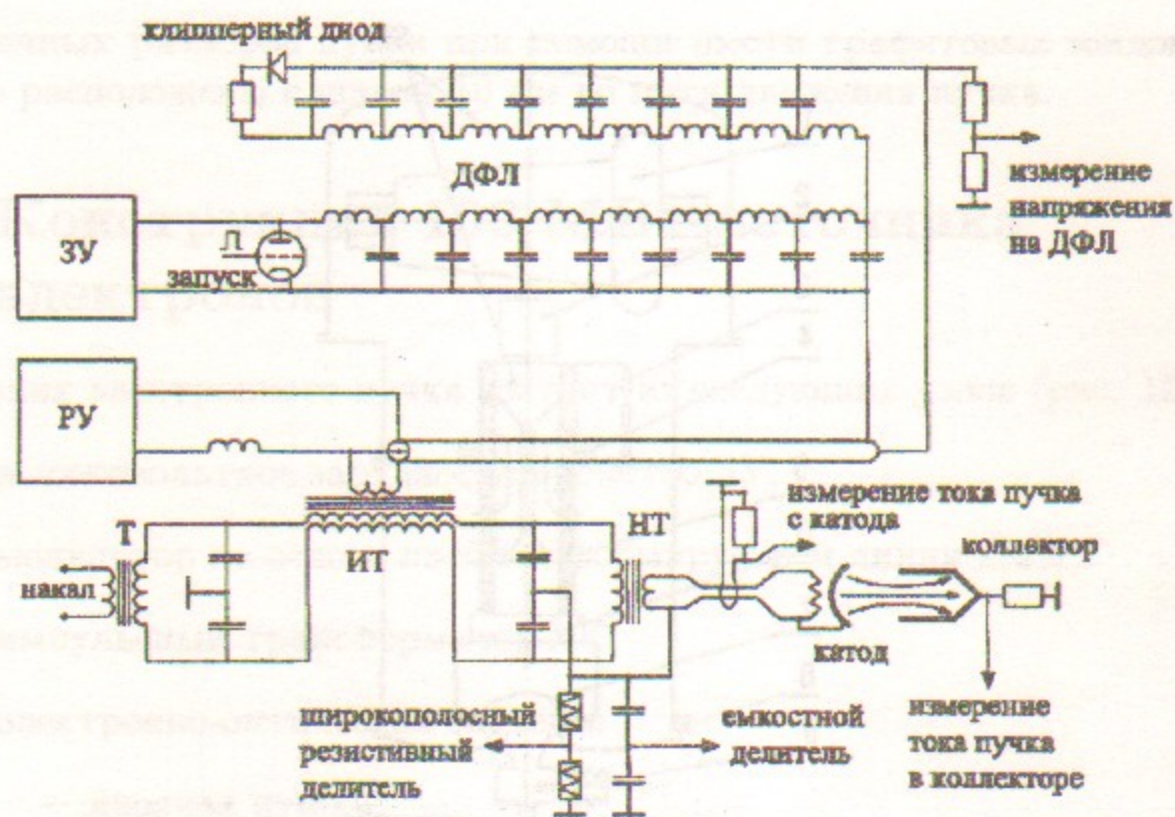


Рис. 13: Принципиальная электрическая схема модулятора и питания электронной пушки магнискон.

4.2 Модулятор

Импульс высокого напряжения, прикладываемый к первичной обмотке импульсного трансформатора ТР1, формируется с помощью двойной формирующей линии ДФЛ. Использование ДФЛ позволяет снизить вдвое коэффициент трансформации при одном и том же зарядном напряжении. Присущий всем ДФЛ недостаток – изменение знака напряжения на конденсаторах в одной из половин ДФЛ в процессе формирования импульса – ужесточает требования к подбору конденсаторов.

В качестве емкостей для ДФЛ были использованы конденсаторы типа К15-10 4700 пФ, 50 кВ. Так как указанные конденсаторы предназначены для работы в электроизоляционной среде, то для обеспечения их успешной работы на воздухе использовалась заливка по периферии виксинтом К-73.

Проведенные исследования показали, что для этого типа конденсаторов характерно появление разрядов в отслоениях между металлом и диэлектриком [12] при напряжениях на конденсаторах, близких к предельно допустимому уровню. Эти разряды и являются основной причиной выхода из строя конденсаторов. К сожалению, применяемая технология

производства этих конденсаторов не позволяет получить надежного сцепления металла и диэлектрика. Поэтому все конденсаторы перед установкой прошли отбор по уровню появления этих разрядов. Это позволило существенно повысить надежность работы модулятора.

Формирующая линия (рис. 13) состоит из 8 ячеек в каждой половине, волновое сопротивление каждой линии составляет 5 Ом. Общее количество конденсаторов – 128 штук. В качестве высоковольтного ключа Т1 используется импульсный тиратрон ТГИ1-2500/50, в качестве клипเปอร์ного диода D1 – газовый вентиль ГКД1-600/50, последовательно с которым включено сопротивление $R = 5$ Ом, согласованное с волновым сопротивлением линии.

Настройка ДФЛ осуществлялась за счет подбора емкостей и индуктивностей ячеек в соответствии с предварительно проделанными расчетами с учетом параметров ИТ.

4.3 Проходной изолятор

Изолятор состоит из двух частей, расположенных в газовом и вакуумном объемах соответственно (рис. 14). Газовая часть изолятора выполнена из оргстекла и состоит из трех секций. Вакуумная часть состоит из двух одинаковых секций, каждая из которых содержит 6 керамических колец длиной по 20 мм, внутренним диаметром 135 мм и внешним диаметром 150 мм. Общая длина каждой секции с учетом промежуточных электродов составляет 144 мм.

Для равномерного распределения потенциала вдоль вакуумной части изолятора используются электроды специальной формы, вставленные между керамическими кольцами изолятора и играющие роль дополнительных емкостей. В конструкции имеются два цилиндрических электрода, соединяющие промежуточные электроды газовой части изолятора с соответствующими электродами вакуумной части изолятора и разделяющие изолятор на три части. Поэтому радиус цилиндрических электродов выбран так, чтобы они находились на эквипотенциалах цилиндрического конденсатора с $\frac{1}{3}U_0$ и $\frac{2}{3}U_0$. Помимо деления напряжения все эти электроды служат также и для защиты керамики от электронов, которые могут эмитироваться с центрального проводника и попадать на керамику, что может привести к выходу из строя изолятора. Расчет формы электродов, обеспечивающих равномерное распределение потенциала вдоль изолятора, осуществлялся с помощью программы SAM [6].

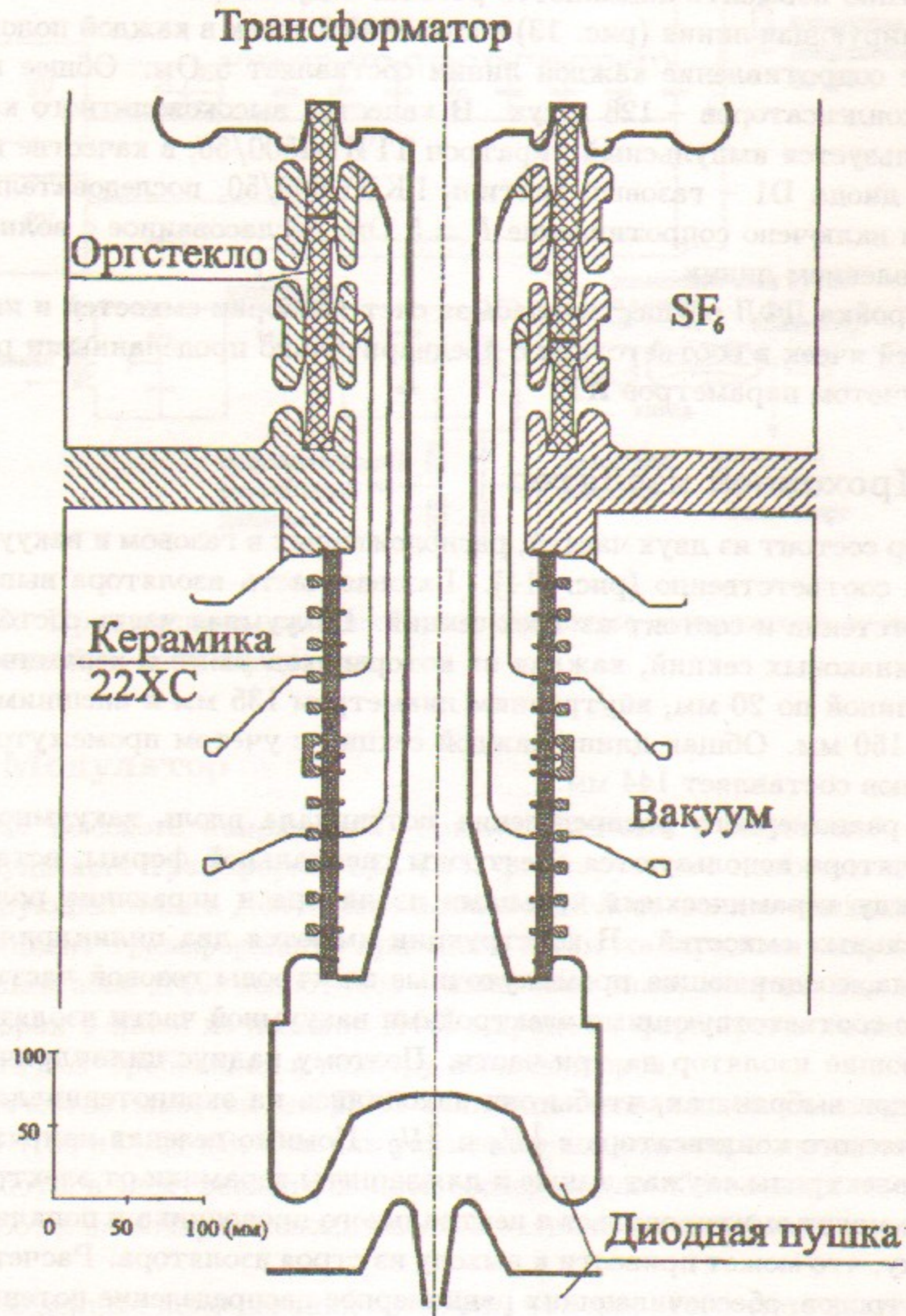


Рис. 14: Схема высоковольтного изолятора.

4.4 Диодная пушка

Схема и размеры пушки были подробно описаны выше. Прикатодный электрод и анод изготовлены из немагнитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Вследствие того, что часть анода расположена близко к катоду, предусмотрено водяное охлаждение этой части анода. Опыт работы с пушкой показал, что после непродолжительной тренировки сравнительно легко удается достичь режима работы без пробоев при напряжении на пушке 450 кВ и длительности импульса 2 мкс.

Катодный узел аналогичен применявшемуся в ускорителе ЭЛИТ-Л2 по программе ВЛЭПП [14] с некоторыми улучшениями. Он включает в себя синтерированный оксидный катод с косвенным подогревом и систему тепловых экранов. КERN катода изготавливается из катодного никеля толщиной 1.5 мм. После нанесения покрытия (BaCO_3 50 – 53%, SrCO_3 40 – 45%, CaCO_3 5 – 8%, средний размер частиц 1 – 2 м), эмитирующая поверхность прессируется под давлением 100 МПа. Нагрев катода осуществляется бифилярным нагревателем из молибденовой проволоки диаметром 2 мм.

Для прогреваемых систем, работающих в импульсном режиме, применяемое эмиссионное покрытие может обеспечить плотность тока до 8 – 10 А/см² при температуре катода 800 °С, соответствующей подводимой мощности 700 Вт. Однако, в разборных системах, подобных описываемой, при остаточном давлении газа порядка 10⁻⁷ тор снимаемые при этой температуре плотности тока оказываются в 2 ÷ 5 раз ниже, и для получения требуемых плотностей тока (2.5 ÷ 3 А/см²) катод необходимо перегревать. Фактически для нормальной работы установки потребовалась мощность нагрева 1200 ÷ 1500 Вт.

Конструкция катодного узла обеспечивает однородность температуры эмитирующей поверхности на уровне 900 ± 10 °С. В результате геометрия эмитирующей поверхности катода в нагретом состоянии сохраняется с требуемой точностью при достаточно большом количестве включений (более 500).

4.5 Магнитная система

Схема магнитной системы изображена на рис. 12. Она включает в себя бронированный соленоид, магнитный полюс, катушку для компенсации рассеянных полей от соленоида и две корректирующие катушки для коррекции траекторий электронов в пространстве анод-катод (поз.8 рис. 12).

Соленоид содержит 9 одинаковых катушек с водяным охлаждением.

Каждая катушка включает в себя обмотку и соответствующий участок магнитопровода, что делает соленоид легко разборным и позволяет при необходимости изменять число катушек в нем.

Катушки соленоида объединены в две группы по 6 и 3 соответственно, что делит соленоид на две области. Катушки каждой группы соединены последовательно и запитываются от отдельных источников. Такое решение позволяет иметь различное магнитное поле в этих областях, что необходимо для работы магникона. Кроме того, для работы магникона необходим некоторый "провал" поля между областями. Это достигается за счет закорачивания части катушек или добавления незапитываемых катушек. Однако такое решение позволяет менять расстояние между областями только с шагом, кратным высоте катушек. Для преодоления последнего был изготовлен участок магнитопровода аналогичный тому, что применяется в катушках, но меньший по высоте.

Для обеспечения требуемого распределения магнитного поля в зоне выходного резонатора и коллектора при минимальной длине соленоида используется специальный цилиндрический магнитный полюс. Такое конструктивное решение обеспечивает достаточный радиальный зазор между полюсом и соленоидом для размещения в нем всех необходимых коммуникаций (волноводы, охлаждение, измерительные зонды и т.д.)

Ток, протекающий по катушке соленоида, имеет также продольную неаксиально-симметричную компоненту. Поперечное магнитное поле соленоида, связанное с этой компонентой поля, нежелательно для работы магникона, так как приводит к отклонению от оси неразвернутого пучка. Для компенсации этого поперечного поля вблизи оси была предусмотрена продольная шина на внутренней поверхности соленоида. Питание шины осуществлялось от того же источника, что и питание катушек, а регулировка тока в ней – при помощи внешнего шунта.

Позднее было найдено решение, позволяющее существенно уменьшить влияние этих поперечных полей на динамику пучка. Суть этого решения состоит в том, что каждую последующую катушку необходимо повернуть на 180° вокруг оси относительно предыдущей. В результате поперечное магнитное поле вблизи оси становится знакопеременным, что дает существенное уменьшение результирующего отклонения пучка от оси системы. Такое расположение катушек позволило отказаться от использования продольной шины, упростить систему внешней коммутации катушек соленоида и уменьшить магнитные поля, создаваемые ею в области катода.

Как показывают расчеты, наличие магнитного поля 15 Гс в районе катода при поле соленоида 4.5 кГс есть следствие конечных величин толщи-

ны и магнитной проницаемости ферромагнитного экрана. Для компенсации этого поля предназначена компенсирующая катушка, намотанная снаружи магнитопровода. Насколько удастся с помощью этой катушки скомпенсировать поле на катоде, можно судить по рисунку 8. Проведенные измерения показали, что при поле в соленоиде 4.5 кГс и величине магнитного поля в центре катода, близкой к нулю, величина магнитного поля на краю катода не превышает 1.2 Гс.

При экспериментальном исследовании источника электронов было обнаружено, что электроны влетают в магнитную систему не по оси. Величина и направление этого отклонения электронов от оси повторяется с хорошей точностью после проведения работ, связанных с разборкой прибора (например, при замене катода).

Величина этого отклонения от оси в магнитной системе составляет примерно 1 мм. Оценки показывают, что такое отклонение может быть вызвано не только погрешностью изготовления и сборки, тепловыми ухищлениями, но и магнитным полем Земли. Измеренное значение поперечной компоненты магнитного поля Земли в пространстве анод-катод составляет $0.8 \div 1$ Гс. Для компенсации этого магнитного поля и корректировки траекторий электронов используются две пары катушек (поз.8 рис. 12), позволяющие создать вблизи оси поперечное магнитное поле величиной $1 \div 2$ Гс в пространстве анод-катод.

4.6 Вакуумная система

Все детали вакуумной системы изготовлены из стали 12Х18Н10Т. Все разборные вакуумные соединения имеют индиевые уплотнения. Материал электроизоляционных деталей – керамика. Работа на установке связана с частыми вскрытиями на атмосферу, и для защиты в эти моменты оксидного катода предусмотрен вакуумный шибер (поз.9 рис. 12) с фторопластовым уплотнением.

4.7 Система диагностики пучка

Первоначально размер пучка определялся по размеру отверстия, прожигаемого пучком, в металлической фольге, установленной на пути движения пучка. Однако при прожигании отверстия происходит испарение материала мишени, приводящее, с одной стороны, к потере электрической прочности в диодной пушке и, с другой стороны, к быстрому отравлению оксидного катода. Кроме того, этот метод сопряжен и с определенными

практическими неудобствами, такими, как, например, необходимость частых развакуумирований системы с целью замены мишеней. Поэтому в последующих экспериментах по определению размера пучка использовались специальные щелевые зонды.

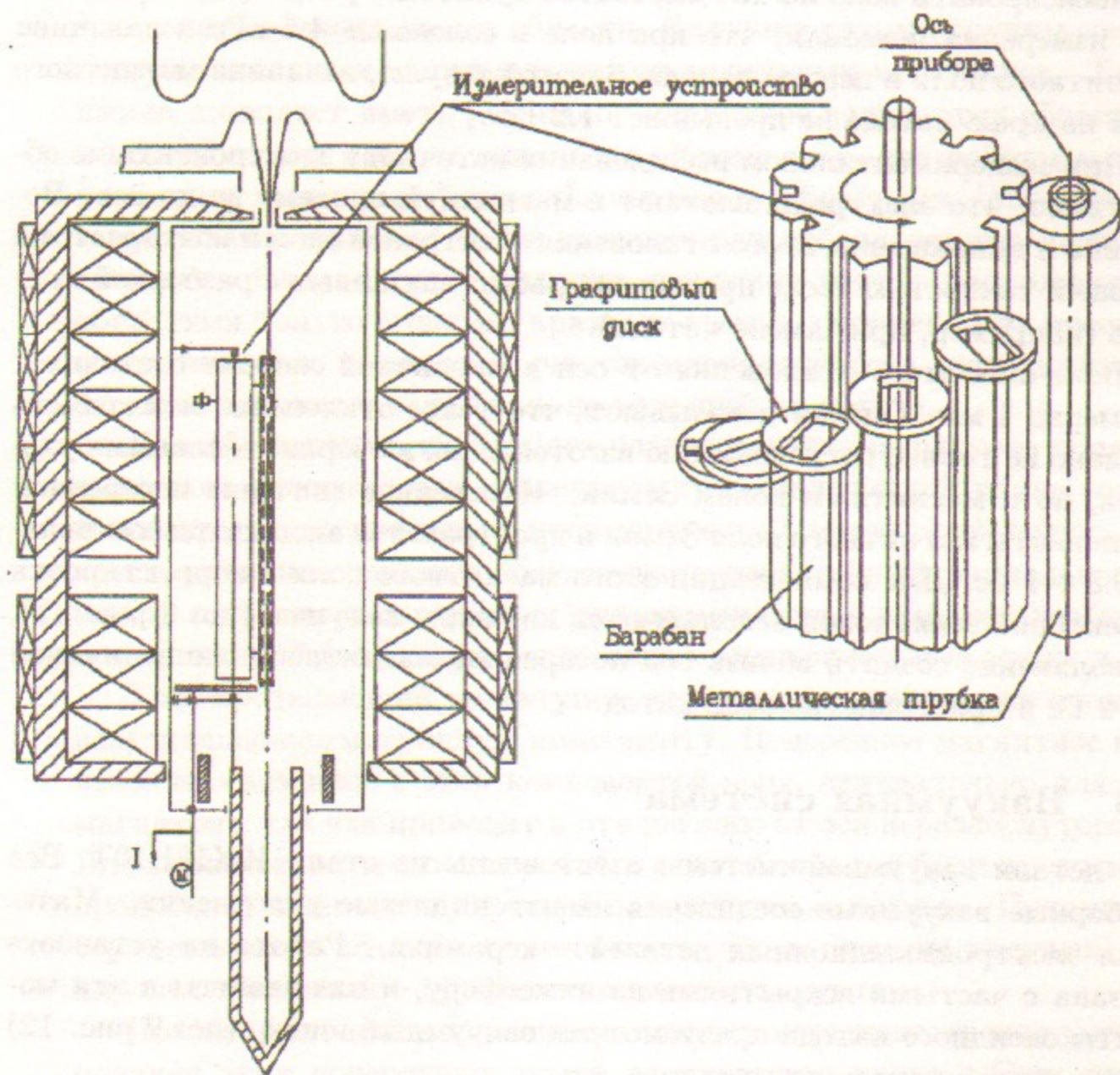


Рис. 15: Схема измерительного устройства.

Каждый зонд представляет из себя круглый графитовый диск (рис. 15) со щелью шириной 10 мм (что намного превышает диаметр пучка). До 11 таких зондов может устанавливаться на барабане на различной высоте по пути движения пучка. Барабан снабжен приводом с шаговым двигателем, позволяющим как устанавливать на ось системы нужный зонд, так и достаточно плавно подводить край щели к "границе" пучка.

Момент касания пучка фиксируется по появлению токооседания на зонде, для чего барабан изолирован от земли. По величине перемещения зонда от одной границы пучка до противоположной определяется диаметр пучка.

Описанный метод позволяет измерять поперечный размер пучка лишь в одном направлении, но этого достаточно, так как измерения с помощью фольг показали, что сечение пучка является достаточно круглым.

В разрабатываемом приборе – магниконе – пучок должен был проходить через резонаторную систему с суммарной длиной 250 мм и минимальной апертурой 8 мм. Исследование возможности проведения пучка через такую структуру проводилось при помощи металлических трубок различного диаметра и длиной 250 мм, которые устанавливались на оси системы вместо измерительных зондов.

Необходимо отметить, что после снижения ведущего магнитного поля с 4.5 кГс до 3.8 кГс пришлось увеличить число пассивных резонаторов с целью компенсации уменьшения усиления магникона. Это привело к тому, что суммарная длина резонаторной структуры увеличилась до 320 мм. Хотя длина измерительного устройства при этом не изменилась, тем не менее, эффективность исследования пучка при использовании данного измерительного устройства не снизилась, так как теперь оно располагается в области, где расчетные размеры пучка максимальны.

5 Заключение

В ИЯФ была разработана электронно-оптическая схема, позволяющая получать слабопульсирующий пучок в магнитной системе с поперечным размером, близким к бриллюэновскому, с катода, размер которого существенно больше размера получаемого пучка. Особенность этой схемы заключается в том, что основное сжатие пучка происходит в диодной пушке. Созданный по этой схеме 100 МВт источник электронов для 7 ГГц магникона имеет рекордную величину компрессии пучка (более 2300) [4].

В ходе исследования 7 ГГц магникона выяснилось, что для его нормальной работы необходимо снизить ведущее магнитное поле с 4.5 кГс до 3.5 ÷ 3.8 кГс. Это снижение привело к тому, что увеличились как амплитуда пульсаций пучка, так и "средний" размер пучка в магнитной системе магникона. Как уже указывалось выше, КПД магникона чувствителен как к величине поперечного размера пучка, так и к "качеству" пучка. Поэтому была проведена модификация электронно-оптической системы

источника электронов под новое магнитное поле. В ходе экспериментального исследования модифицированного источника были получены следующие параметры:

| | |
|-----------------------------|------|
| Мощность, МВт | 100 |
| Микропервеанс | 0.86 |
| диаметр пучка, мм | |
| максимальный | 2.7 |
| минимальный | 2.3 |
| компрессия пучка по площади | 2000 |

В последующих экспериментах на 7 ГГц магнисконе с этим пучком была достигнута выходная мощность 55 МВт и КПД 56%, что практически совпадает с расчетными значениями.

Приведенная в работе электронно-оптическая схема и ее отдельные узлы (например, диодная пушка с электростатической компрессией около 1000) могут быть использованы не только в магнисконе, но также и в других мощных электронных устройствах, где необходимы большая мощность и малые размеры пучка.

Литература

- [1] Патент РФ N 1110335. Электронный прибор СВЧ-магнискон/ Карлинер М.М., Козырев Е.В., Максимов А.Ю., Нежевенко О.А., Острейко Г.Н. Заявка N 3467164. Зарегистрировано в Гос. реестре изобр. 15.06.1993.
- [2] *Karliner M.M. et al.* The magnicon – an advanced version of the Gyrocon // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, A 269, N3, p.459-473, 1988.
- [3] *Makarov I.G. et al.* Performans of the High Power 7 GHz Magnicon Amplifier // Part. Accel. Vol. 52, p.55-64, 1996.
- [4] *Y. V. Baryshev et al.* A 100 MW electron source with extremely high beam area compression. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A, 340, 1994, p.241-258.
- [5] *Makarov I.G. et al.* The latest experience with 7 GHz pulsed magnicon amplifier // In Proc. of Third Workshop on Pulsed RF Source for Linear Collider (RF96), Japan, April 1996 (KEK Proceedings 97-1, April 1997, A), p.234-242.

- [6] *М.А.Тиунов, Б.М.Фомель, В.П.Яковлев.* SAM – интерактивная программа для расчета электронных пушек на мини ЭВМ. Новосибирск, 1989, 66с (Препринт/ Ин-т ядерной физики СО РАН; 98-159).
- [7] *D.G.Myakishev, M.A.Tiunov, V.P.Yakovlev.* Code SUPERSAM for calculation of electron guns with high beam area convergence. // XV International Conference on High Energy Accelerators, July 20-24,1992, Hamburg, Germany. Int.J.Mod.Phys. A (Proc.Suppl.) 2B (1993) V.II, p.915-917.
- [8] *I.Makarov et al.* 7 GHz Pulsed Magnicon: Study and New Results, PAC97, 12-16 May 1997, Vancouver.
- [9] *В.Г.Абдульманов и др.* Труды 10 Всесоюзной конференции по ускорителям заряженных частиц, Дубна. 2 (1987) 79.
- [10] *T.G.Lee.* Proc. Int. Workshop on Next Generation Linear Colliders, SLAC (1988).
- [11] *H.Mizuno, J.Odagiri and T.Higo.* КЕК preprint 89-114 (1989).
- [12] *С.Б.Вассерман, И.В.Казарезов и др.* Высоковольтный емкостной импульсный накопитель энергии. Новосибирск, 1980, 19с (Препринт/ Ин-т ядерной физики СО АН СССР; ИЯФ 80-219).
- [13] *А.Н.Белов, Е.В.Козырев, Г.И.Кузнецов и др.* Источник электронов импульсного магнискона. Новосибирск, 1988, 29с. (Препринт/ Ин-т ядерной физики СО АН СССР; ИЯФ 88-66).
- [14] *В.Е.Балакин и др.* Новосибирск, 1984 (Препринт/ Ин-т ядерной физики СО АН СССР; ИЯФ 84-78).

*И.А. Запрягаев, И.В. Казарезов, Е.В. Козырев,
Г.И. Кузнецов, Д.Г. Мякишев, О.А. Нежевенко,
Б.З. Персов, М.А. Тиунов, В.П. Яковлев*

**100 МВт источник электронов
для 7 ГГц импульсного магнотрона**

*I.A. Zapryagaev, I.V. Kazarezov, E.V. Kozurev,
G.I. Kuznetsov, D.G. Myakishev, O.A. Nezhevenko,
B.Z. Persov, M.A. Tiunov, V.P. Yakovlev V.V. Kubarev*

**A 100 MW electron source
for 7 GHz pulsed magnicon**

ИЯФ 97-70

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 23.09.1998 г.

Сдано в набор 23.09.1998 г.

Подписано в печать 24.09.1998 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1.1 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 135 экз. Бесплатно. Заказ № 70

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.