

**Т.А.Всеволожская, Л.Л.Данилов,  
Г.И.Сильвестров, Н.Ф.Соколова**

**Одновитковая импульсная квадрупольная линза**

## А Н Н О Т А Ц И Я

Рассматривается конструкция импульсной квадрупольной линзы, её электронно-оптические свойства, характеристики магнитных полей и система питания.

## 1. В в е д е н и е

Проведение экспериментов с пучками релятивистских заряженных частиц требует создания электронно-оптических систем, необходимыми элементами которых являются квадрупольные линзы и поворотно-фокусирующие магниты. При больших энергиях они превращаются в громоздкие энергоёмкие устройства, требующих автономного стабилизированного питания.

В настоящей работе рассматриваются разработанные в ИЯФ СО АН СССР одновитковые импульсные квадрупольные линзы, в основу которых положен принцип "железно-безжелезного" магнита [1]: поле в рабочем зазоре формируется скиновыми поверхностями токонесущих шин гиперболического профиля и гиперболическими полюсами шихтованного магнитопровода.

Такая магнитная система по ряду параметров выгодно отличается от аналогичных линз с постоянным полем на ту же энергию частиц: практически отсутствуют поля рассеяния, минимально сечение магнитопровода и намагничивающих обмоток, выполненных в виде одиночной шины. Существенно снижен вес и потребляемая мощность.

## 2. К о н с т р у к ц и я

На рис.1 приведены продольное и поперечное сечения линзы.

Шихтованный магнитопровод /1/ с гиперболическими полюсами выполнен из штампованных листов трансформаторной стали ХВП-0,35, склеенных эпоксидной смолой. В межполюсных зазорах расположены токонесущие шины /2/ гиперболического профиля, изолированные от магнитопровода миллиметровым слоем эпоксидной смолы /3/.

Коммутация шин /см.рис.2/ обеспечивает разворот каждой из последующих секций относительно предыдущей на угол  $90^\circ$  так, что ток последовательно обходит все межполюсные зазоры двух или более секций.

После сборки токонесущих шин с магнитопроводом вся система вставляется в общую центрирующую трубу /4/, являющуюся одновременно вакуумным кожухом.

На торцах располагаются экранирующие медные втулки /5/, перемещением которых регулируется длина секций линзы. Экранирующие кольца /6/ уменьшают в случае отсутствия втулок влияние полей торцевых коммутационных шин /7/ на краевые поля. Подвод тока осуществляется коаксиальным токопроводом /8/.

Применяемые нами конструкции линз имеют следующие параметры: апертура  $2A = 10$  см, длина магнитопровода каждой секции  $l = 15/20$  см, максимальный градиент  $G = 3 \cdot 10^3$  эрстед/см при токе в шинах  $I = 55$  ка, индуктивность  $L = 1,5$  мкгенри. Габариты: внешний диаметр кожуха  $\sim 20$  см, длина  $\sim 50$  см, вес около 80 кг.

### 3. Характеристики магнитных полей

Характеристики магнитных полей описанной линзы имеют ряд особенностей, обусловленных конструкцией и импульсным питанием.

Магнитное поле создается импульсом тока длительностью  $\sim 10$  мсек, представляющим собой один период разряда конденсаторной батареи на нагрузку индуктивного характера.

Конструкция линзы из-за практически полного отсутствия полей рассеяния позволяет получить максимальные градиенты, поскольку поле на краю рабочей области апертуры равно индукции в стали магнитопровода. При этом линейный рост поля с расстоянием от оси выполняется с точностью лучше 1% во всей апертуре вплоть до градиентов  $G = 3 \cdot 10^3$  эрстед/см, полученных при стандартных измерениях. С учетом коэффициента заполнения магнитопровода  $\eta = 0,9$  и при апертуре  $2A = 10$  см это соответствует максимальной индукции в стали  $B = 17 \cdot 10^3$  гаусс.

При этом не наблюдалось отклонения поля от линейности и, указанная линейность поля сохранялась при увеличении длительности импульса вплоть до  $\tau = 10$  мсек.

Одной из особенностей линзы является характер формирования краевых полей.

Наличие экранирующих втулок и дисков обеспечивает доста-

точно хорошую линейность краевых полей на входе и выходе линзы. В пространстве же между секциями, благодаря малому расстоянию между ними, краевые эффекты вообще отсутствуют и поля линейны с той же точностью, что и внутри секций линзы. В результате этого линейный рост с расстоянием от оси интеграла поля по длине линзы, что является условием безаберрационной фокусировки /2/, выполняется с точностью 1% при отношении длины секции к апертуре вплоть до 0,6 /см.рис.3б/.

Следствием описанного свойства являются, во-первых, минимальные aberrации за счет нелинейностей полей и, во-вторых, возможность уменьшения длин секций при заданной апертуре и достаточно больших градиентах. Последнее, в свою очередь, приводит к уменьшению астигматизма пар квадруполей, выражающегося в разnose главных плоскостей во взаимно перпендикулярных плоскостях.

$$\Delta = \frac{\sqrt{b} \left(1 + \frac{d}{l}\right)}{\sqrt{1 + \frac{3}{2} \frac{d}{l}}} \sqrt{F/l}$$

, где

$F$  - главное фокусное расстояние,  $l$  - эффективная длина секции,  $d$  - эффективный промежуток между секциями. В нашем случае эффективный промежуток равен половине апертуры и может быть при желании увеличен введением дополнительной экранирующей втулки между секциями.

Следующей особенностью импульсной линзы является возможность изменения параметров секций, необходимой при настройке, путем изменения эффективной длины перемещением втулок при постоянном градиенте /см.рис.3а/. Одновременно это позволяет питать секции последовательно, что не только уменьшает число стабилизированных источников питания, но и ослабляет требования к точности стабилизации. Так, если нестабильности в различных секциях квадруполя имеют одинаковый знак, то допуск на них в  $\sqrt{F/l}$  раз менее жесткий, чем в случае противоположных знаков нестабильности. К тому же механическая регулировка параметров секций более проста и надежнее, чем электрическая.

### 3. Система питания

Для упрощения задачи коммутации токов в десятки килоампер, потребляемых линзой, оказалось наиболее рациональным питать линзу через токовый трансформатор с коэффициентом трансформации  $n = 100$  и малым расстоянием, первичная обмотка которого включена в разрядный контур импульсного генератора на ртутных тиратронах.

Первичная обмотка состоит из двух секций по 88 витков в каждой, намотанных медной шинкой  $3 \times 5 \text{ мм}^2$  на изолирующие каркасы из оргстекла. Каркасы с обмоткой, залитые эпоксидной смолой, крепятся на 0-образном магнитопроводе, собранном из листов трансформаторной стали ХВП-0,35.

Вторичная обмотка представляет собой два последовательных плоских витка из листовой меди толщиной 2 мм, полностью охватывающих первичную обмотку.

Индуктивность рассеяния трансформатора, приведенная ко вторичной обмотке, измеренная на частоте  $f = 250 \text{ гц}$  составляет около 60 см.

Накопительная емкость  $C = 50 \text{ мкф}$  импульсного генератора разряжается на первичную обмотку импульсного трансформатора через ртутный тиратрон ТР1-40/15 и перезаряжается через обратный тиратрон того же типа.

В используемых нами режимах для обеспечения градиента поля  $G = 1 \cdot 10^3 \text{ эрстед/см}$  длительность полусинусоиды тока по основанию составляет  $\tau = 2,3 \text{ мсек}$ , ток через тиратрон  $I = 210 \text{ а}$ , а напряжение на емкости  $U_c = 4 \text{ кв}$ . При зарядке емкости через активное сопротивление и частоте следования импульсов в 1 гц средняя мощность, потребляемая генератором, составляет около 200 вт.

Стабильность импульсного тока обеспечивается стабилизацией напряжения на накопительной емкости.

Для снятия тепловых нагрузок при больших частотах следования импульсов используется водяное охлаждение токонесущих шин линзы и вторичной обмотки трансформатора.

Описанные линзы применяются на комплексах со встречными пучками ИЯФ СО АН СССР.

Их применение не является принципиально обусловленным, однако, экономичность, малые габариты и хорошие характеристики магнитного поля, дающие большую по сравнению с постоянными линзами свободу при выборе оптической схемы, сделали их использование предпочтительным.

В заключение авторы выражают благодарность Цакину В.Н. и Трахтенбергу Э.М. за участие в разработке и проведении опытных линз.

### Л и т е р а т у р а

1. Доклады Всесоюзного совещания по ускорителям со встречными пучками и физике частиц сверхвысоких энергий, Новосибирск, 24-30 июля 1963 г., часть I, 189-190. Новосибирск, 1965 г.

2. В.К.Плотников, ПТЭ, 1962 г., № 2, 29-33.

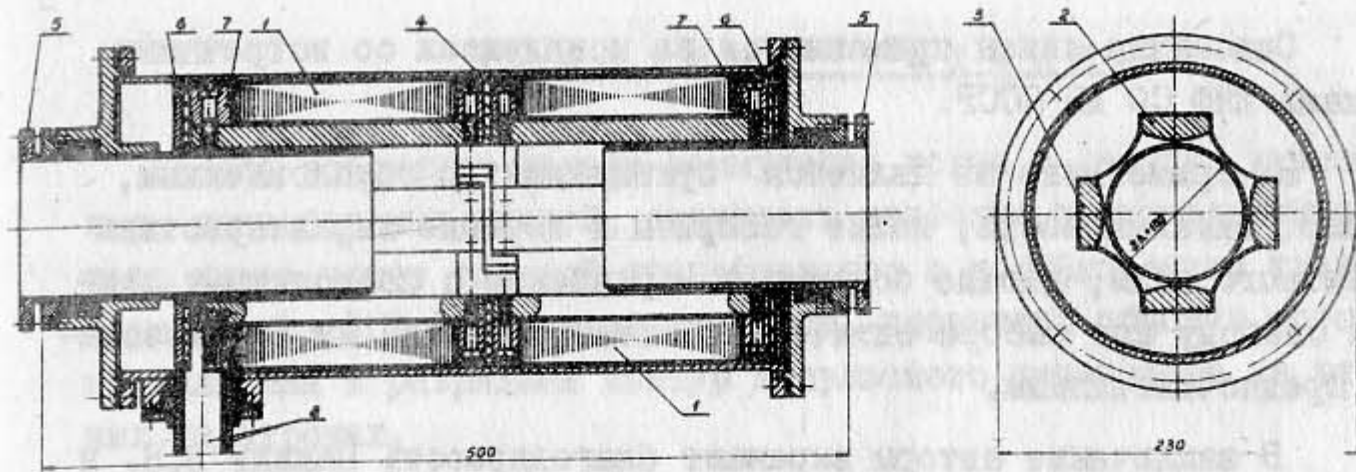


Рис. 1 Общий вид линзы: 1) магнетрон, 2) токонесущая шина, 3) изолятор, 4) вакуумный кожух, 5) экранирующая втулка, 6) экранирующий диск, 7) коммутационная шина, 8) токоподвод

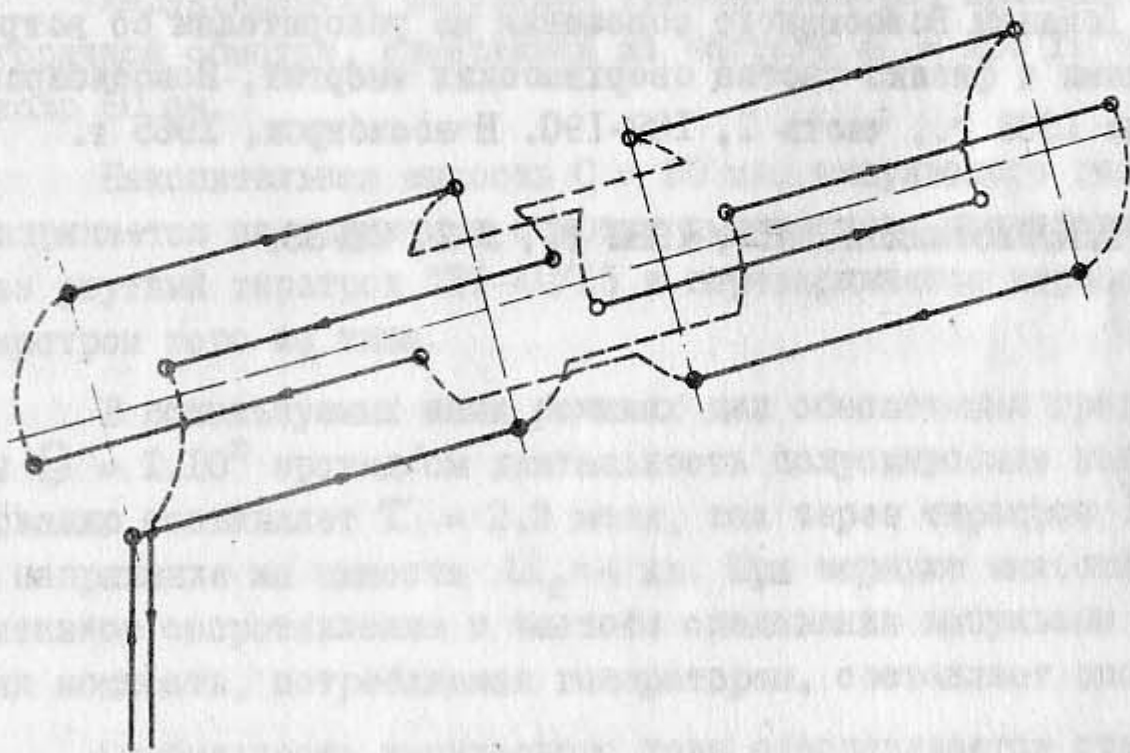


Рис. 2 Коммутация токонесущих шин: 1) формирующие шины, 2) коммутационные шины, 3) торцевые коммутационные шины

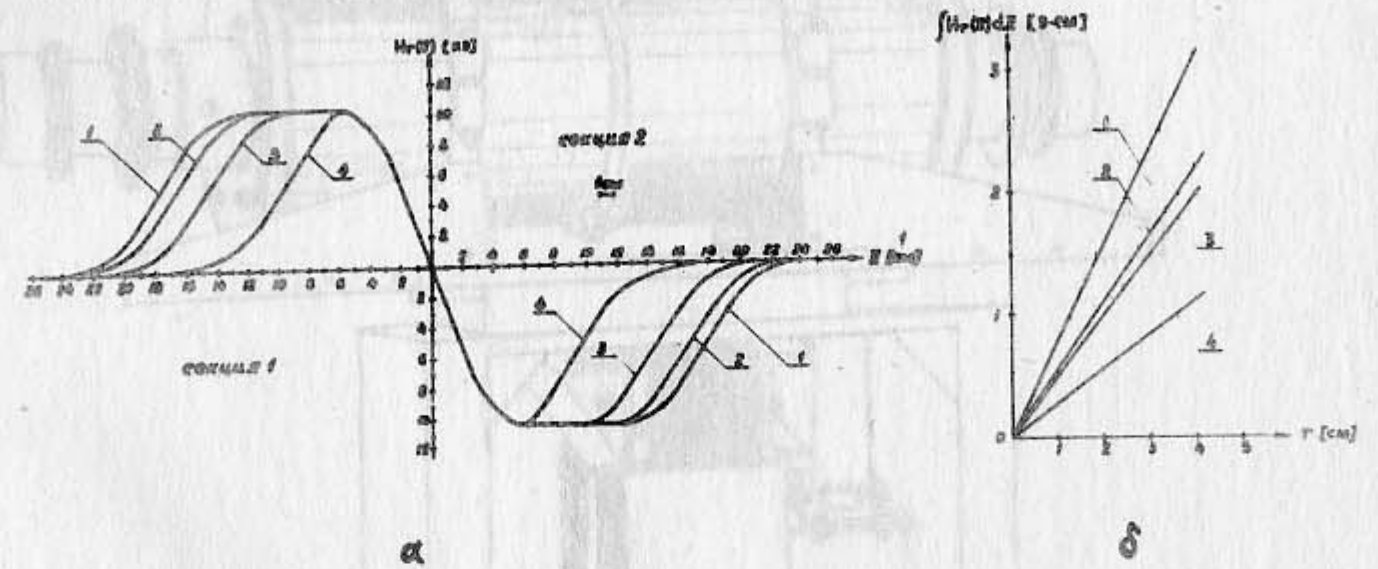


Рис. 3 Распределение поля вдоль оси линзы / а / и рост интеграла поля по радиусу / б / при различных отношениях сечения к апертуре линзы:

- 1) без экранирующих втулок -  $\frac{c}{2A} = 2,0$
- 2)  $\frac{c}{2A} = 1,5$
- 3)  $\frac{c}{2A} = 1,0$
- 4)  $\frac{c}{2A} = 0,6$

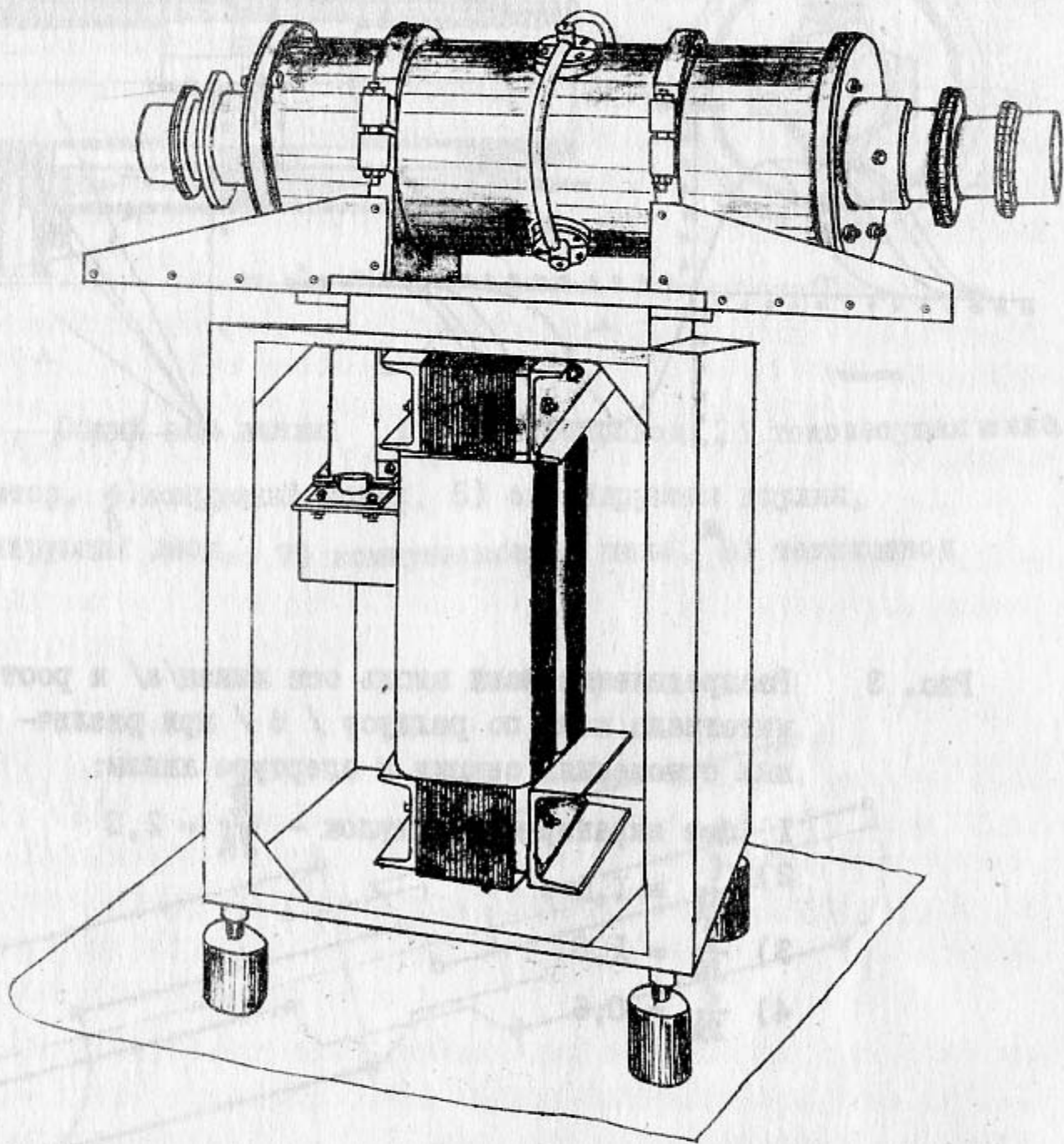


Рис. 4      Общий вид линзы с трансформатором.