

Л.Л.Данилов,С.Н.Роднонов,Г.И.Сильвестров

**Параболическая линза для аксиально-  
симметричной фокусировки релятивистских  
частиц**



✓  
+

НОВОСИБИРСК 1966

### А н н о т а ц и я

Описывается оригинальная магнитная линза с большой светосилой для аксиально-симметричной фокусировки релятивистских частиц.

Линза представляет собой импульсную систему с магнитным полем более ста тысяч гаусс.

Приводятся принципиальные особенности линзы, расчет "безабберационного профиля", оценка прочностных свойств, результаты силовых испытаний и эксперимента с пучком.

Рассматривается конструкция и система питания, обеспечивающая нарастание токов порядка 150 килоампер за время 0,3 - 0,4 микросекунды.

### 1. В в е д е н и е

При решении задачи о инжекции позитронов в электрон-позитронный накопитель ИЯФ СО АН СССР встал вопрос о создании оптической системы, обеспечивающей минимальное приращение фазового объема конвертированного на мишени вне накопителя позитронного пучка, о возможности сбора его в телесном угле порядка 0,1 стерадиан и дальнейшем оптимальном преобразовании фазового объема позитронов для выпуска его в накопитель.

Для формирования позитронного пучка вне накопителя, с необходимыми для захвата его в накопитель параметрами, была разработана оптическая система из двух короткофокусных магнитных линз.

Идея создания специальных магнитных линз с большой светосилой, которые могут быть названы параболическими, предложил в 1961 году Будкер Г.И. /1/.

Такая линза (рис.1) представляет собой два металлических параболоида вращения (1)  $Z \sim r^2$ , соединенных вершинами.

Ток направленный вдоль оси  $Z$ , подводится с помощью симметричного токоподвода (3), так, что в пространстве между параболоидами вращения создается аксиально-симметричное магнитное поле, спадающее как  $H \sim r^{-1}$ . Если ось пучка направлена вдоль оси вращения линзы, то заряженная частица будет проходить в магнитном поле путь пропорциональный  $l \sim r^2$ . При этом угол поворота, определяемый интегралом от поля по траектории частицы, оказывается пропорциональным ее расстоянию от оси вращения, что обеспечивает линейную фокусировку.

В приближении "тонкой линзы" фокусное расстояние такой системы в сантиметрах будет

$$F = \frac{E}{120 I a} \quad (1)$$

где:  $E$  - энергия падающего пучка в электронвольтах;  
 $I$  - ток подводимый к линзе в амперах;  
 $a$  - параметр параболы

## II. Электронно-оптические свойства

Принципиальной особенностью, рассматриваемой оптической системы, является прохождение частиц через стенки линзы и рассеяние в них.

При заданной энергии, рассеяние определяется материалом линзы и величиной пути проходимого частицей в её стенках.

Если угловой разброс в падающем на линзу электронном пучке за счет не нулевого фазового объема, меньше углов рассеяния в стенках линзы  $\alpha_0 < \theta_z$ , то размер пятна в фокусе при отсутствии aberrаций будет определяться только рассеянием  $S = F \sqrt{\alpha_0^2 + \theta_z^2} \approx \pm F \theta_z$ .

Так как угол многократного рассеяния  $\theta_z \sim \frac{\sqrt{\delta}}{F}$ , а из (1) следует, что  $F \sim \frac{1}{I}$ , то при заданной толщине стенок линзы величина  $S \sim \frac{\sqrt{\delta}}{I}$  и не зависит от энергии частиц.

Поэтому основным параметром, определяющим преимущества такой линзы, является не величина её фокусного расстояния при заданной энергии, а допустимое значение тока, который мы можем пропустить через систему.

Для уменьшения рассеяния в стенках материал линз должен быть выбран с минимальным порядковым номером  $Z$ , а толщина стенок должна быть сделана минимально возможной.

Из конструктивных материалов мы выбрали: бериллий ( $Z = 4$ ,  $A = 9$ ) и алюминий ( $Z = 13$ ,  $A = 27$ ). Применяемые нами линзы из бериллия имеют толщину стенки  $\delta = 0,25$  мм и при токе 120 ка должны давать среднеквадратичный размер пятна в фокусе  $S = \pm 0,35$  мм (в нашем случае  $\alpha_0 = \pm 1 \cdot 10^{-3}$  рад,  $\theta_z = \pm 5 \cdot 10^{-3}$  рад).

Второй особенностью линзы является наличие конструктивной шейки, соединяющей параболоиды, которая не фокусирует и тем самым ограничивает её прозрачность. Мы применяем линзы с наружным диаметром 20 мм и диаметром шейки 4 мм, так что шейка занимает всего 4% общей площади линзы.

Кроме того необходимо учесть, что реальный путь в стенках линзы неодинаков для частиц находящихся на различных расстояниях от оптической оси и для параллельного пучка на входе равен  $\pm \frac{1}{2} \sqrt{1 + 4r^2}$ ,

где  $r$  — координата частицы на входе. Для  $r = 1$  см, частицы проходящие линзу у краев имеют реальный пробег в 2 раза больше, чем частицы проходящие вблизи оптической оси.

Для устранения эффекта увеличения рассеяния периферийных частиц, мы делаем стенки переменной толщины, так чтобы пробег был одинаков для всех координат. Недостатком линзы является то, что при точном рассмотрении она не имеет общего фокуса для частиц с различными координатами на входе.

Однако, всегда можно подобрать такой профиль токовой поверхности, что условие линейной фокусировки в параксиальном приближении будет выполняться строго.

Если на линзу (рис. I) падает параллельный пучок, то условием фокусировки его в точку будет выполнение следующего соотношения:

$z + \frac{r}{\alpha} = F$  (2) для всех " $r$ " и " $z$ " на выходной поверхности, где  $\alpha = \frac{dr}{dz}$ , а  $r = r(z)$  есть решение уравнения движения заряженных частиц в магнитном поле.

Движение релятивистских частиц в поле вида  $H = \frac{H_0 R_0}{r}$  описывается уравнением  $\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{k}{r} = 0$ , где  $k = \frac{300 H_0 R_0}{E}$ ,  $H_0 = 0,2$  I/R<sub>0</sub>,  $R_0 = 1$  см.

Решение уравнения даёт:

$$\alpha = \pm \sqrt{2k} \sqrt{\left(\frac{\alpha_0}{\sqrt{2k}}\right)^2 - \ln \frac{r}{r_0}}, \quad (3)$$

$$z - z_0 = \pm \frac{1}{\sqrt{2k}} \int_{r_0}^r \frac{dr}{\sqrt{\left(\frac{\alpha_0}{\sqrt{2k}}\right)^2 - \ln \frac{r}{r_0}}}; \quad (4)$$

знак (+), когда  $r/r_0$  уменьшается с ростом  $z$ , (-) когда  $r/r_0$  увеличивается с ростом  $z$ . Введя обозначения  $u = r/r_0$ ,  $\zeta(u) = \sqrt{\left(\frac{\alpha_0}{\sqrt{2k}}\right)^2 - \ln u}$

можно свести интеграл (4) к интегралу ошибок

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\zeta^2} d\zeta, \quad \text{где } x = \sqrt{-\ln u}. \text{ Использ}$$

зудя условие параллельности пучка на входе  $\alpha_0 = 0$  и подставляя (3) и (4) в условие (2) получим уравнение поверхности линзы:

$$\left(\frac{F-z_0}{r_0}\right)\sqrt{K} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \operatorname{erf}(x) + \frac{u}{\sqrt{2r_0}} \quad (5)$$

$$\left(\frac{z-z_0}{r_0}\right)\sqrt{K} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \operatorname{erf}(x) \quad (6)$$

Задаваясь нужным фокусным расстоянием  $F$ , из приближенного выражения (1) определим  $K = 0,5 / aI$ . Далее, задаем произвольный начальный профиль  $z_0 = z_0(r_0)$  одной половины линзы (сфера, парабола). Давая теперь ряд значений " $z_0$ " и " $r_0$ ", из (5) и (6) получаем соответствующие различным начальным координатам значения " $z$ " и " $r$ " точек на поверхности второй половины линзы.

На рис.1 приведено сечение параболического (1) и "безабберационного" (2) профилей для фокуса  $F = 7$  см, и траектория частицы (4) с  $\alpha_0 = 0, r_0 = 0,9$  см.

### III. Конструкция линзы

Линза (рис.2) вытачивается из прутка алюминия или бериллия. Параболоиды вращения не касаются вершинами, а соединены шейкой, диаметр которой выбирается из условия максимально допустимых механических нагрузок. Стенки делаются переменной толщины, уменьшаясь от 0,25 мм у шейки до 0,15 мм на краю линзы. На периферии тонкие стенки переходят в массивные контактные кольца для соединения с токоподводами.

Токоподводы должны удовлетворять следующим требованиям:

- 1) обеспечить надежный контакт на токи более 150 ка,
- 2) обеспечить симметричный подвод тока,
- 3) не создавать механических нагрузок в стенках линзы,
- 4) обладать минимальной индуктивностью.

Из нескольких рассмотренных конструктивных вариантов, удовлетворяющих этим требованиям, мы остановились на следующем (см.рис.3).

Детали (15) представляют собой два совместно обработанных дуговых полукольца, которые охватывают линзу (12) и сжимаются по плоскости разреза. Одно из контактных колец линзы максимально плотно притягивается к плоскости полукольца фланцем (5). Деталь (15) с закрепленной линзой вставляется в корпус (4) импульсного трансформатора, являющегося его вторичной обмоткой, и плотно прижимается контактным буртом. При этом, второе контактное кольцо входит в посадочное отверстие токоподвода (14), также являющегося частью корпуса импульсного трансформатора. Он представляет собой массивный медный диск, переходящий в центре в цилиндр (10), разрезанный на 12 секторов. Каждый из секторов, соединенный с диском тонкой перемычкой, прижимается к контактному кольцу линзы сильным прихватом (13), образуя гибкий симметричный токоподвод, не создающий механических напряжений в линзе.

При выполнении допусков на механическую обработку и тщательной сборке такие токоподводы обеспечивают надежный контакт вплоть до токов 130 - 150 ка. Плотность тока с учетом скин-слоя  $10^6$  а/см<sup>2</sup>.

В нашей геометрии допуски на точность изготовления линз могут составлять  $\pm 0,1$  мм на наружных и  $\pm 0,05$  мм на внутренних радиусах. Практический заданный профиль выдерживается с точностью не хуже  $\pm 0,05$  мм по всей поверхности.

Изготовление расчетного профиля заданной толщины осуществляется следующим образом: после черновой обработки и создания базовых поверхностей, специально заточенный резец перемещается по заранее рассчитанной программе. Шаг перемещений по каждой из координат выбирается таким, чтобы все неровности поверхности заведомо лежали в пределах допусков.

Изготовление бериллиевых линз сильно осложняется токсичностью материала, его хрупкостью и повышенной прочностью.

Однако, при отработанной технологии, квалифицированный токарь в специально герметизированном боксе изготавливает одну линзу за 3-4 дня.

### IV. Механические свойства

Динамический расчет прочностных свойств системы состоящей из двух параболоидов вращения переменной толщины, с жестко закрепленными основаниями, представляет собой сложную задачу. Поэтому, в качестве оценки, мы приняли следующие простейшие соображения, по-видимому, правильно отражающие

щие картину процессов.

Импульс магнитного поля производит давление на стенки линзы. Под действием импульса силы  $F \tau$  каждый элемент поверхности получает количество движения  $\Delta v = F \tau$ , где  $\tau$  — длительность импульса тока (мы указываем длительность импульса по его основанию). За это время элемент единицы поверхности массой  $m = \rho \delta$ , где  $\rho$  ( $\frac{2}{\text{см}^3}$ ) удельный вес материала линзы, перемещается на расстояние  $l = \frac{F \tau}{2 \rho \delta}$ . После снятия импульса силы элемент поверхности будет обладать кинетической энергией  $\frac{m v^2}{2} = \frac{F^2 \tau^2}{2 \rho \delta}$ . Полная энергия, приобретаемая элементом поверхности, переходит в потенциальную энергию деформации.

По такой оценке, при длительности  $\tau = 10^{-6}$  сек и давлении  $P = 600$  атмосфер деформация стенки толщиной  $\delta = 0,25$  мм не превышает нескольких микрон, а возникающие напряжения лежат в допустимых пределах.

Учитывая, что давление спадает к периферии как  $\frac{1}{r^2}$ , мы ожидали, что при длительности в десятые доли микросекунды прочностные свойства системы вообще не будут являться ограничением, хотя общее разрывное усилие на столь ажурную конструкцию превышает тысячу килограмм. Ожидались ограничения, налагаемые усталостными свойствами материала под действием нагрузок, повторяющихся сотни тысяч раз.

Эксперименты показали правильность приведенных оценок. Эксперименты проводились с линзами из дурала Д-16Т и бериллия с диаметром шейки  $d = 6$  мм, 5 мм, 3 мм при толщине стенок  $\delta = 0,2$  мм для дурала и  $\delta = 0,25$  для бериллия.

При длительности  $\tau = 6 \cdot 10^{-6}$  сек линзы деформируются, начиная с давлений порядка 500 — 600 атмосфер (рис. 4а).

При длительности  $\tau = 2 \cdot 10^{-6}$  сек линзы выдерживают такие давления, но после нескольких тысяч импульсов на поверхности появляются усталостные трещины (рис. 4б).

В последней серии экспериментов длительность снижена до  $\tau = 0,7 \cdot 10^{-6}$  сек. При этом линза из дурала с диаметром шейки 3 мм разрушилась только при давлении более 1000 атм (ток 120 ка) после нескольких тысяч импульсов.

Линза из бериллия с диаметром шейки 4 мм надежно выдержала сотни тысяч импульсов при давлении более 500 атм и передана для эксплуатации.

## У. Система питания

Как указывалось выше, для надежной механической прочности линзы при амплитудах тока порядка 120–150 ка., длительность импульса тока должна составлять несколько единиц на  $10^{-7}$  сек. Поскольку у нас, длительность электронного сгустка  $2-3 \cdot 10^{-9}$  сек, импульс тока может представлять собой один полупериод синусоиды резонансного разряда конденсатора на индуктивность нагрузки. Для получения минимальной длительности при заданной амплитуде тока все паразитные параметры системы должны быть сведены к минимуму.

Система питания представляет собой импульсный генератор (рис. 5). Линза питается от токового трансформатора (1) тороидальной конструкции с коэффициентом трансформации 1:12. В первичную цепь трансформатора разряжается емкость (2)  $C = 0,1$  мкф через четыре параллельно соединенных коаксиально ошинованных (3) тиратрона (4) ТПМ-2500/35 с укороченным катодным выводом. Параллельная работа четырех тиратронов обеспечивается тем, что паразитные индуктивности ошиновок являются одновременно развязывающими индуктивностями поставленными в катод.

В катоде каждого тиратрона имеется малоиндуктивный шунт (5), по сигналу с которого можно контролировать величину тока в каждой ветви. Кроме того, имеется общий малоиндуктивный шунт (6), на котором суммируются токи каждой ветви, и по сигналу с которого предварительно синхронизируется запуск генератора.

Точное уравнение токов производится регулировкой напряжения накала катодов и водородных генераторов тиратронов.

При превышении номинального тока и напряжений на анодах 23–25 кв. некоторые тиратроны изредка дают обратные пробои, которые можно ликвидировать тренировкой генератора на частоте циклов 8–10 герц и медленным подъемом напряжения.

Малая индуктивность рассеяния импульсного трансформатора обеспечивается следующей конструкцией (рис. 3).

Тороидальный сердечник (1) из 70-ти микронного железа ХВ1, сечением  $20 \times 70$  мм<sup>2</sup> заливается эпоксидной смолой (2) внутри сплошного медного тора (3) прямоугольного сечения. Слой смолы между корпусом и железом 2 мм. Тор фрезеруется по спирали (8), так что образуется 12 витков первичной обмотки с межвитковыми зазорами 2 мм. Зазоры заливаются эпоксидной смолой и вся обмотка обрабатывается в соответствующих допусках.

Подпаиваются токовводы (6) первичной обмотки и заливаются эпоксидной смолой (7). Затем она обматывается 100 микронной полиэтиленовой пленкой (II) и плотно сакается в дюралевую обечайку (4), представляющую собой виток вторичной обмотки. Торцевой фланец (14), являющийся также частью вторичного витка и одновременно токоподводом линзы вакуумно уплотняет внутреннюю полость обечайки с первичной обмоткой. Трансформатор откачивается и под вакуумом заливается конденсаторным маслом. Зазоры величиной 0,5 мм между первичной и вторичной обмотками надежно обеспечивают электрическую прочность.

Измерения показали, что индуктивность рассеяния трансформатора приведенная к вторичной обмотке составляет 0,8 см, а индуктивность токоподвода 0,2 см.

Индуктивность параболической линзы равна  $L = 2a (r_{\max}^2 - r_{\min}^2)$ . Для наших параметров индуктивность рабочего объема поля  $L = 1,92$  см. Приведенная к первичной обмотке индуктивность линзы со всеми паразитными параметрами составляет 400 см, самой линзы 276 см.

Индуктивность коаксиально ошинованного тиратрона ТПМ-2500/35 с укороченным катодным выводом составляет 360 см. Индуктивность всего блока из четырех параллельно соединенных тиратронов 90 см.

Высоковольтные безиндуктивные конденсаторы мы изготавливаем сами. Пакеты листов укладываются как показано на рис. 6. 50 листов алюминиевой фольги /I/ толщиной в 30 микрон, размерами 20 x 50 см<sup>2</sup> проложены 40 слоями конденсаторной бумаги (2) толщиной в 30 микрон. Потенциальный ввод (3) с изолятором из эпоксидной смолы вакуумно уплотняется на корпус (4). Конденсатор откачивается и заливается конденсаторным маслом. Индуктивность конденсатора с вводом несколько см, рабочее напряжение 25 кв. Испытание на электрическую прочность производится при 35 кв.

#### VI. Результаты эксперимента

Эксперименты с пучком проводились на бериллиевых линзах при энергии электронов  $E=130$  Мэв, ток через систему 120 ка.

Для измерения формы поперечного сечения пучка и настройки линз применялся фотографический метод.

По оптической (геометрической) оси линз выставлялась специальная кассета с последовательно установленными пленками марки ФТ-30 через опре-

деленное расстояние, отсчитываемое от оси симметрии линзы. Затем производилась экспозиция при нескольких выстрелах. Чтобы не смазывать эффект фокусировки рассеянием в шейке, пучок подавался на край линзы.

Полученные фотографии пучка фотометрировались с помощью микрофотометра МФ-4 в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, вертикальной и горизонтальной, причем оба направления пересекались в точке с максимальным значением почернения.

На рис. 7 приведены фотография пучка в фокусе 10 см для энергии электронов 130 Мэв и экспериментальные кривые распределения интенсивности (плотности почернения) пучка. Здесь же приведен ряд последовательных фотографий пучка сфокусированного линзой.

Положение минимального размера пучка с хорошей точностью совпадает с фокусным расстоянием рассчитанным по току. Если учесть, что при расчете размера пучка в фокусе не принималось во внимание диффузное рассеяние по пути в воздухе, рассеяние в последовательном ряде пленок, фотометрические свойства самой пленки, то совпадение экспериментальных данных ( $S = \pm 0,6$  мм) с расчетными (стр. 4) можно считать вполне удовлетворительными. Симметричная форма пятна в фокусе указывает на отсутствие aberrаций в системе, несмотря на то, что пучок проходит через самый край линзы.

В заключение авторы благодарят Г.И. Будкера за предложенную тему и постоянное внимание, Миронова Е.С. за ряд полезных советов и обсуждений и Шрайнера К.К. за обеспечение технологически сложного изготовления линз.

#### Л и т е р а т у р а

1. Международная конференция по ускорителям. Дубна, август 1963, 282 + 283, Москва, 1964.

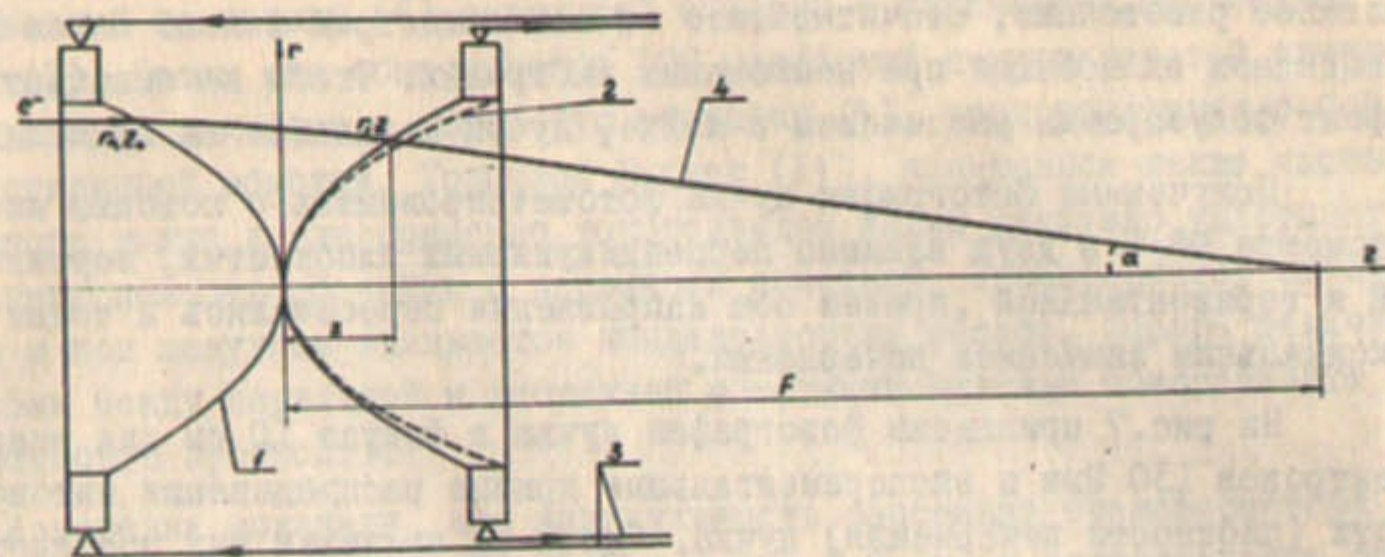


Рис. 1. Оптическая схема фокусировки  
 1) параболоид вращения;  
 2) "безаберационная" поверхность вращения;  
 3) токоподвод;  
 4) траектория частицы с  $Y_0 = 0,9$  см при фокусе линзы  $F = 7$  см.



Рис. 2. Общий вид линзы.

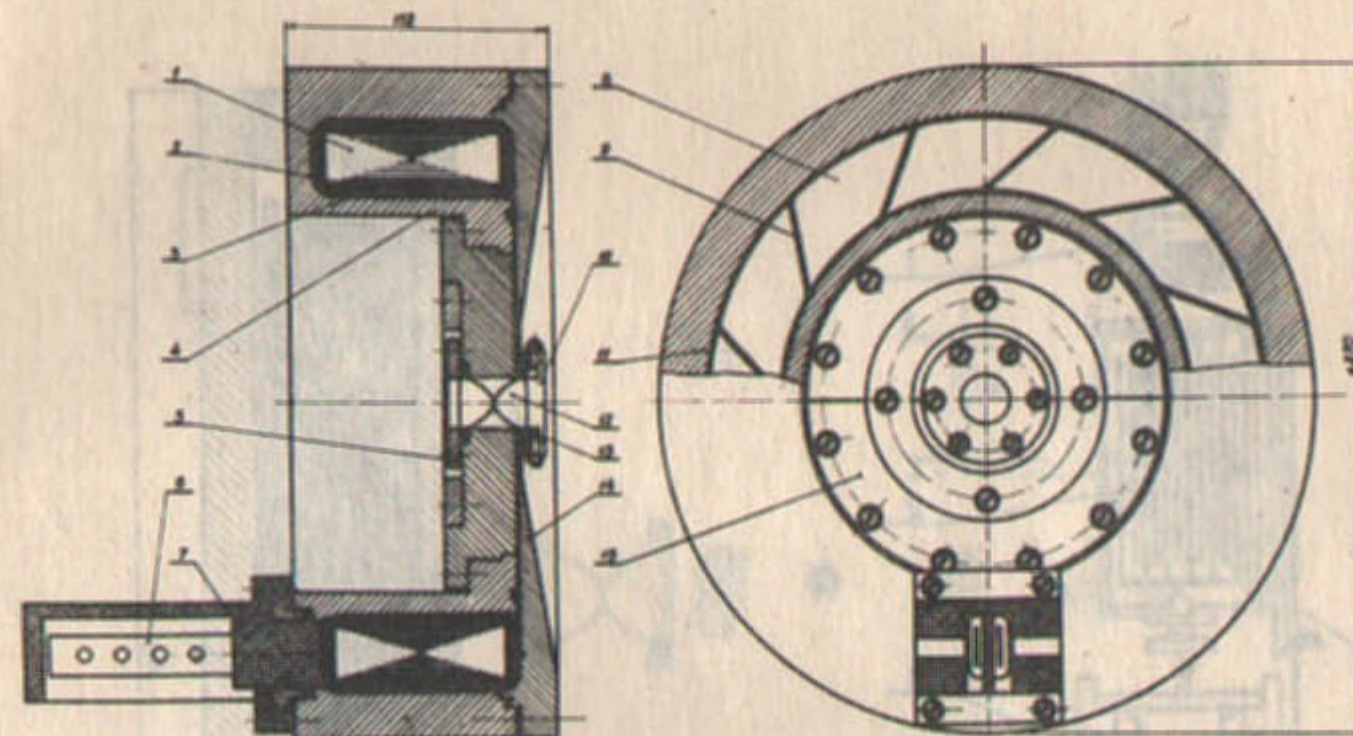


Рис. 3. Импульсный трансформатор

1) сердечник; 2) изолятор; 3) первичная обмотка; 4) вторичная обмотка; 5) фланец; 6) токоподвод; 7) изолятор; 8) спираль первичной обмотки; 9) изолятор; 10) разрезной цилиндр; 11) изолятор; 12) линза; 13) прихват; 14) фланец; 15) полукольцо.



а



б

Рис. 4. Деформация линзы:  
 а)  $\tau = 6$  мксек,  $I = 120$  ка;  
 б)  $\tau = 2$  мксек,  $I = 120$  ка.

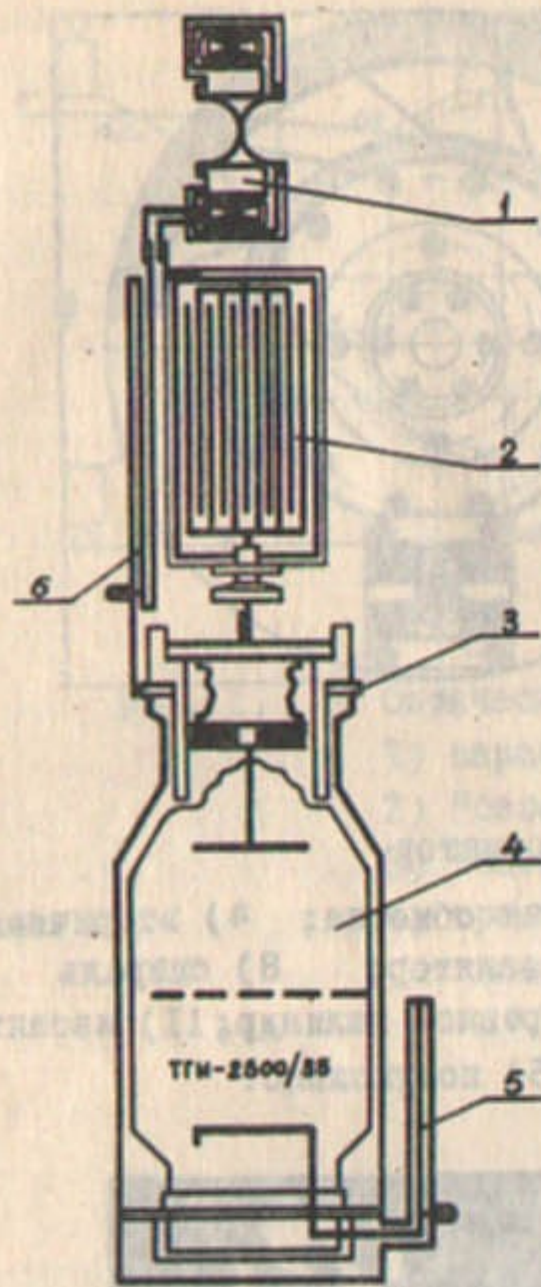


Рис. 5. Импульсный генератор:

- 1) трансформатор;
- 2) конденсатор;
- 3) ошиновка;
- 4) тиратрон ТГМ-250/35;
- 5) шунт;
- 7) общий шунт.

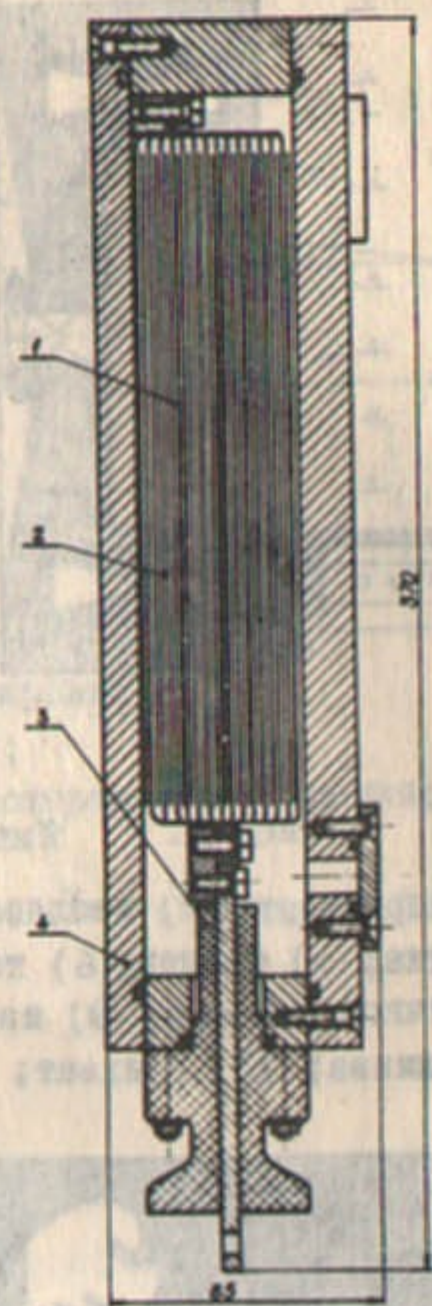


Рис. 6. Конденсатор:

- 1) обкладка;
- 2) изолятор;
- 3) потенциальный ввод;
- 4) корпус.



Рис. 7. Эффект фокусировки электронного пучка при  $E = 130$  Мэв и распределение интенсивности в фокусе.