

СВЕТОСИЛЬНАЯ ОПТИКА С БОЛЬШИМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ПОЛУЧЕНИЯ ПУЧКОВ ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ

Б.Ф.Баянов, Г.И.Будкер, Г.С.Виллевалд, Т.А.Всеволожская, Л.Л.Данилов,
В.Н.Карасюк, Г.И.Сильвестров, В.А.Таюрский, А.Д.Чернякин

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

Оптимизация условий получения пучков вторичных частиц (позитронов, антипротонов, μ -мезонов) привела к развитию в ИЯФ СО АН СССР работ по созданию оптических устройств с большими (50–300 кЭ) импульсными магнитными полями и с широким диапазоном параметров, определяемых видом вторичных частиц, их энергией и требованиями к характеристикам пучков. Эта тематика включает в себя два направления: разработку так называемых параболических линз, представляющих собой тонкостенные оболочки вращения, обтекаемые током, задание формы которых обеспечивает безабберационную фокусировку частиц практически для любых углов собирания и цилиндрических линз из легких металлов (литий, натрий) с однородным по сечению распределением плотности тока для короткофокусной фокусировки пучков.

1. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЙ КОНВЕРСИИ

Условия оптимального формирования фазового объема позитронного пучка при электрон-позитронной конверсии требуют фокусировки первичных электронов на мишень в минимальный размер до тех пор, пока углы сходимости электронов остаются меньшими углов выхода позитронов из конвертера, и безабберационного собирания позитронов в пределах среднеквадратичного угла выхода их из мишени. При энергии позитронов ($E_+ = \frac{1}{2} E_- \geq 100$ МэВ) и оптимальной длине мишени $T=1$ рад.ед. длины эффективный источник позитронов при бесконечно тонком электронном пучке характеризуется $1/$ средним квадратом линейного угла выхода $\langle \theta^2 \rangle = 125 T/E_+^2$ и средним квадратом координаты частиц $\langle \chi^2 \rangle = 0,08 \langle \theta^2 \rangle T^2 \chi_0^2$, где энергия E – в МэВ, χ_0 – рад.ед. длины в см. Таким образом β -функция позитронного источника составляет $\beta_0 = 0,3 T \chi_0$, т.е. $\sim 0,1$ см для мишени из вольфрама. При конечном фазовом объеме электронного пучка минимальный эмитанс позитронного имеет место в том случае, когда β -функция электронного пучка на мишени равна β -функции позитронного источника. Это условие требует светосилы линзы, фокусирующей электроны, равной $\mathcal{F} E_- / \beta_0$, где ε_- – эмитанс электронного пучка, что, например, для $\varepsilon_- \sim 1$ мрад.см составляет $\sim 0,035$ стерадиана.

На комплексах ВЭП-2 и ВЭП-3 в настоящее время применяются короткофокусные цилиндрические линзы из лития, которыми осуществляется как фокусировка электронного пучка на мишень, так и собирание позитронов. Линза представляет собой (рис. 1) тонкостенный цилиндрический контейнер из титана, расширяющийся на торцах в виде катушки, на который надевается разрезанный на две половины медный бандаж, изолированный от корпуса. Бандаж

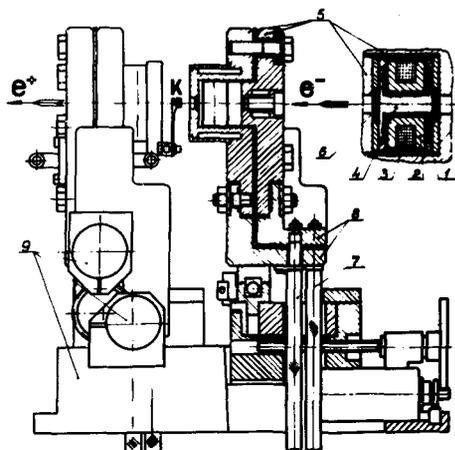


Рис. 1. Общий вид блока конверсии. 1 - титановый контейнер, 2 - медный бандаж, 3 - стальной провод, 4 - литий, 5 - токоподводы, 6 - бериллиевые пробки, 7 - гибкие токоподводы, 8 - токосборные шины, 9 - координатные механизмы.

плотно обматывается стальным проводом и пропитывается эпоксидным компаундом под давлением. На специальном стенде контейнер заполняется расплавленным литием под давлением в несколько сотен атмосфер. Материал контейнера - титан - выбран из-за высокого омического сопротивления и коррозионной стойкости по отношению к литию. На торцах литий прикрывается предохранительными бериллиевыми фольгами толщиной 0,2 мм, после чего линза вставляется в коаксиальные цилиндрические токоподводы, которые через бериллиевую фольгу плотно прижимаются к титану, обеспечивая осевое сжатие конструкции и электрический контакт по периметру торцов линзы. В токоподводах сделаны отверстия для входа и выхода пучка, которые закрываются конусными бериллиевыми пробками. Линзы питаются от понижающих трансформаторов, с которыми их соединяют гибкие токоподводы, и крепятся в токосборных шинах, расположенных на координатных механизмах, позволяющих дистанционно осуществлять взаимную юстировку линз с точностью лучше 0,05 мм. Длительность синусоидального импульса тока, питающего линзу, определяется оптимальным соотношением между величиной скин-слоя и радиусом линзы r_0 , при котором, с одной стороны, к максимуму тока устанавливается достаточно однородное распределение его плотности по сечению цилиндра, с другой - минимален нагрев линзы. Близким к оптимальному является отношение $\delta/r_0 \sim 0,7$, при котором плотность тока однородна по сечению с точностью лучше 0,5% и соответствующая абберрация дает среднеквадратичное приращение координаты в фокусе $4 \cdot 10^{-3} r_0$. Температура же нагрева не более чем в 1,5 раза превышает нагрев поверхности в скин-слое ($\delta \ll r_0$) $\Delta T = \frac{H^2}{8\gamma c}$, что составляет для лития $\Delta T = 72^\circ$ при поле 100 кЭ.

Абберрации за счет краевого эффекта обусловлены неоднородностью распределения тока в местах подводов линзы, что приводит к зависимости эффективной длины линзы от расстояния до оси, и в определенном случае бесконечно тонкого токоподвода соответствуют абберрационному углу $4 \cdot 10^{-3} \alpha_0^2 r_0^2 / \lambda^2$, где α_0 - угол поворота частицы на максимальном радиусе r_0 на длине λ . Среднеквадратичное приращение угла за счет сферической абберрации в зависимости от угла собирания θ_m выражается как $\frac{\alpha}{6} \sqrt{\frac{\ell}{f}} \cdot \theta_m^3 = \sqrt{\langle \alpha^2 \rangle}$, где α зависит от отношения $\frac{\ell}{f}$ (ℓ - длина, f - фокусное расстояние линзы). При $\ell/f \ll 1$ значение α максимально и равно 0,5.

Основные параметры линз приведены в таблице.

Энергия E (МэВ)	Фокусное расстояние (см)	Длина линзы (см)	Апертура 2A (см)	Максимальное поле H (кЭ)	Амплитуда тока (кА)	Длительность импульса (мкс)	Угол рассеяния (мрад)
$E^- = 430$	5,3	1,7	0,6	63	95	120	4,4
$E^+ = 250$	4	1,7	0,5	40	50	90	7
$E^- = 270$	1,7	1,7	0,5	100	125	90	8
$E^+ = 120$	1,4	1,1	0,6	110	165	120	12,6

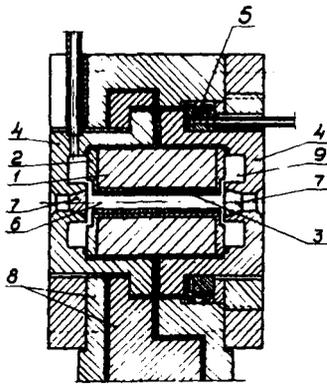
2. ЭФФЕКТИВНАЯ СИСТЕМА ПРОТОН-АНТИПРОТОННОЙ КОНВЕРСИИ

Разработка фокусирующих систем для оптимизации условий получения антипротонных пучков, инжектируемых в магнитную дорожку, при аналогичном принципе фокусировки – полем прямого тока – представляет более сложную техническую задачу. Это связано с высокой энергией первичного и вторичного пучков, большими углами рождения антипротонов и большим продольным размером мишени, необходимым для эффективного использования протонного пучка, что приводит к значительной величине среднеквадратичного эмитанса антипротонов, линейно зависящего от длины мишени $\epsilon_p \approx \frac{\langle \theta^2 \rangle \ell}{2\sqrt{3}}$. Здесь $\langle \theta^2 \rangle$ – средний квадрат угла рождения антипротонов, составляющий $\approx \frac{2m_p m_\pi c^2}{p^2}$ (m и m_π – массы протона и π -мезона). Так для антипротонов с импульсом 2 ГэВ/с при длине 7 см, отвечающей максимуму выхода для мишени из вольфрама, эмитанс антипротонного пучка составляет ~ 1.40 мрад х см, что существенно больше акцептансов проектируемых накопителей антипротонов. Коэффициент захвата в акцептанс ϵ по обоим поперечным направлениям зависит от длины мишени ℓ как $\frac{\epsilon}{\langle \theta^2 \rangle} \exp(-\frac{\ell}{l_{ns}} - \frac{1,6\epsilon}{\ell \langle \theta^2 \rangle})$, где l_{ns} – длина неупругого ядерного взаимодействия достигает максимума при $l_{opt} = 1,3 \sqrt{l_{ns} \cdot \frac{\epsilon}{\langle \theta^2 \rangle}}$, что для существующих проектов /2,3/ составляет величину, значительно меньшую l_m . При этом среднеквадратичный радиус эффективного источника антипротонов $\langle r_p^2 \rangle \approx \frac{l_{opt}^2}{72} \langle \theta^2 \rangle$ оказывается очень малым, и, как и в случае электрон-позитронной конверсии, возникает задача фокусировки первичного пучка в размер, составляющий доли миллиметра.

Повышение ядерной эффективности мишени при сохранении малого значения эмитанса антипротонного пучка может быть достигнуто путем применения сильной фокусировки антипротонов непосредственно в процессе конверсии, что устраняет зависимость эмитанса от длины мишени. Один из способов осуществления такой фокусировки состоит в использовании нескольких коротких мишеней, между которыми помещаются очень сильные цилиндрические линзы, передающие изображение пучка с мишени на мишень. При этом поперечные фазовые объемы антипротонов со всех мишеней совмещаются друг с другом и их суммарный эмитанс не выходит за пределы эмитанса пучка с одной мишени, так что эффективность собирания в первом приближении увеличивается пропорционально числу мишеней. Так для проекта /3/ ($\rho = 1,8$ ГэВ/с, $\Delta\rho/\rho = \pm 2,5\%$, $\mathcal{F}\epsilon = 8$ мрад х см) оптимальная каскадная мишень состоит из 4 мишеней по 3,5 мм с цилиндрическими линзами длиной по 10 см, занимающими весь промежуток между мишенями и имеющими поле на поверхности $H = 300$ кЭ. При разработке линз с полями 300 кЭ возникает ряд серьезных проблем, связанных с нагревом, составляющим за импульс $T = 800^\circ$, что приводит к большому объемному расширению линзы и усложняет отвод тепла, даже при частотах циклов $\sim 0,1$ Гц.

Мы преодолеваем эти трудности, применяя в качестве проводника жидкий металл, быстро выталкиваемый из системы после каждого импульса и циркулирующий по замкнутому контуру, содержащему теплообменник.

Конструкция линзы приведена на рис. 2. Оксидированные титановые трубки впрессовываются в цилиндрический бандаж и изолируются от него термостойким оксидным слоем на напряжение более 1 кВ. Два торцевых фланца при помощи кольцевой гидравлической камеры с давлением ~ 1000 атм стягивают систему в осевом направлении и, разжимая металлические уплотнения, обеспечивают одновременно герметизацию образовавшегося контейнера и аксиально-симметричный подвод тока к жидкому металлу, которым заполняется система. Линза вставляется в коаксиальную ошиновку и прижимается к ее контактным поверхностям той же гидравлической камерой. Рабочий объем линзы сообщается со специальными полостями, имеющими существенно больший объем, чем нагреваемая часть металла, что обеспечивает демпфирование импульсных давлений от объемного расширения и магнитного поля. Внутренний объем линзы сообщается с системой циркуляции жидкого металла, включающей в себя импульсный электромагнитный насос коаксиальной конструкции, теплообменник и устройство для создания предварительного давления и нагрева жидкого металла. В качестве жидкого металла мы применяем расплавленный натрий, имеющий более низкую, чем у лития температуру плавления ($T_{пл} = 97^\circ$) и в 2,5 раза меньшее сопротивление после плавления ($\rho = 9,6 \cdot 10^{-6}$ Ом·см), что позволяет пропорционально уменьшить реактивную мощность



импульсного генератора. Линза питается униполярным импульсом тока с длительностью 250 мкс и амплитудой 750 кА от понижающего трансформатора с коэффициентом трансформации $\eta=10$, в первичную цепь которого разряжается конденсаторная батарея емкостью 30 кДж через систему последовательно-параллельно включенных тиристоров.

Рис. 2. Линза с жидким металлом. 1 - стальной цилиндр, 2 - составные титановые трубки, 3 - титановый цилиндр, 4 - торцевые уплотняющие фланцы, 5 - гидравлическая камера, 6 - жидкий металл, 7 - бериллиевые пробки, 8 - коаксиальная ошиновка, 9 - демпфирующие полости.

3. ПАРАБОЛИЧЕСКАЯ ЛИНЗА ДЛЯ СОБИРАНИЯ АНТИПРОТОНОВ С МИШЕНИ

Для светосильного собирания с мишени пучков вторичных частиц и преобразования их фазового объема к форме, удобной для транспортировки параксиальными системами и согласования с акцептансом накопителя, наиболее подходящими оптическими устройствами являются параболические линзы /4/. Формы токовых поверхностей линз при заданном токе и энергии частиц полностью определяются условиями отсутствия сферических aberrаций и линейной зависимости координаты выхода частиц от входного угла при точечном источнике, что обеспечивает минимальное искажение эмитанса пучка и при неточечном источнике. Основным искажающим фактором является рассеяние в стенках, влияние которого может быть сведено к минимуму, если сделать линзу настолько короткофокусной, что углы рассеяния будут меньше фазовых углов в пучке на поверхностях линзы. Уменьшение фокусного расстояния при заданной энергии достигается увеличением длины линзы и повышением магнитного поля до предельно допустимой величины, определяемой ее прочностью.

Примером такой предельно вытянутой линзы с максимальным полем на поверхности 140 кЭ является линза, разработанная для фокусировки антипротонов с импульсом 2 ГэВ/с, линейным углом собирания $\pm 0,18$ рад и фокусным расстоянием 20 см. Длина линзы 25 см, входная поверхность близка к эллипсоиду вращения, диаметр самой узкой части линзы - шейки - $\sim 1,6$ см, что при указанном угле собирания соответствует потерям на ней $\sim 5\%$ частиц. Линза изготавливается из алюминиевого сплава Д16Т или бериллия и имеет переменную по длине толщину стенок от 1 до 3 мм, так что средний путь частиц в веществе составляет 2 см и соответствующий угол многократного рассеяния 3 мрад. Толщины стенок линз были выбраны в результате расчетов и экспериментальных исследований их механических свойств при данной геометрии, подтвержденных ресурсными испытаниями на сотни тысяч импульсов /5/. Линза запитывается импульсом тока с амплитудой 550 кА и длительностью 100 мкс через понижающий трансформатор, в первичной цепи которого коммутируется ток 55 кА системой тиристорных вентилей. При частоте циклов 0,2 Гц охлаждение осуществляется распылением воды на внутреннюю поверхность линзы. Для работы на частотах до 3 Гц применяется более интенсивная система охлаждения: внутрь линзы вставляются две алюминиевые оболочки с толщиной стенок $\sim 0,5$ мм, повторяющие внутреннюю поверхность линзы и составляющие с нею зазор $0,5 \pm 1$ мм, через который прогоняется сплошной поток воды. Линза вставляется в коаксиальную ошиновку, конструкция которой ясна из рис. 3, и подключается к ней с помощью кольцевых гидравлических прижимов с давлением ~ 1000 атм, обеспечивающих надежный дистанционно контролируемый контакт и позволяющих оперативно заменять линзу в ошиновке в случае ее поломки. Аналогичная техника дистанционно размыкаемых гидравлических контактов применена во всех элементах системы протон-антипротонной конверсии, работающей в условиях очень высокого уровня радиации, для обеспечения возможности, в случае неисправности, дистанционно отключать, эвакуировать и заменять любой элемент. Для этого разработаны универсальные коаксиальные ошиновки /6/, которые с помощью гидравлических контактов соединяют каждый элемент со стационарными токоподводами трансформаторов и при снятии давления позволяют осуществлять их дистанционную юстировку.

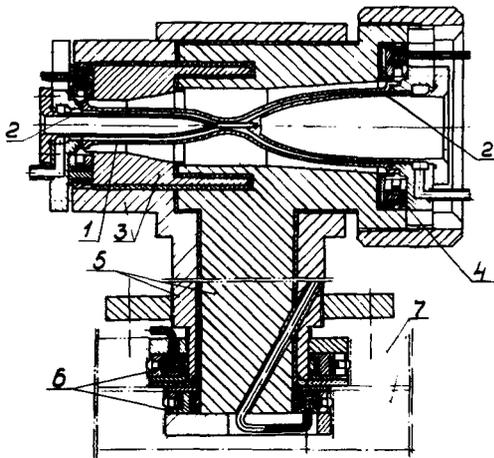


Рис. 3. Параболическая линза. 1 – корпус линзы, 2 – тонкостенные оболочки, 3 – коаксиальная ошиновка, 4 – гидравлические прижимы, 5 – коаксиальный токоподвод, 6 – гидравлические контакты, 7 – стационарные токоподводы.

4. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ШИРОКОУГОЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКИ ПУЧКОВ

Выбором формы токовых поверхностей параболических линз, точно ограничивающих область фокусирующего поля, может быть полностью устранена сферическая aberrация, что позволяет создавать линзы практически с любыми углами собирания. Возможность варьировать в широких пределах форму профилей позволяет использовать еще одно свойство таких линз – заданием определенной нелиней-

ности фокусировки можно осуществить перераспределение поперечной и продольной компонент фазового объема, что приводит к сокращению в определенных пределах поперечного фазового объема пучка /4/. Примером такой системы с широкоугольной нелинейной фокусировкой является линза для собирания позитронов с энергией, близкой к критической (10–20 МэВ для тяжелых мишеней), отвечающей максимуму коэффициента конверсии и имеющей угол выхода из мишени порядка стерadians. Применение линз прямого тока при столь низких энергиях ограничено рассеянием, однако при малом фокусном расстоянии и специальной форме профилей прирост эмитанса пучка за счет рассеяния может быть сведен к минимуму.

Разработанная по этому принципу линза (рис. 4) с линейным углом собирания 0,5 рад и фокусным расстоянием 1,5 см имеет близкую к эллипсоиду вращения входную поверхность и плоскую выходную. Линза вытачивается из бериллия и имеет толщину стенок 0,2 мм, так что средний путь частиц в веществе составляет ~1 мм, что при энергии 20 МэВ соответствует углу рассеяния $\sim 3,5 \cdot 10^{-2}$ рад. Поскольку входная поверхность линзы сильно приближена к источнику, то фазовые углы, обусловленные разбросом координат в источнике, на поверхности линзы приблизительно равны углам рассеяния при указанных энергиях, так что

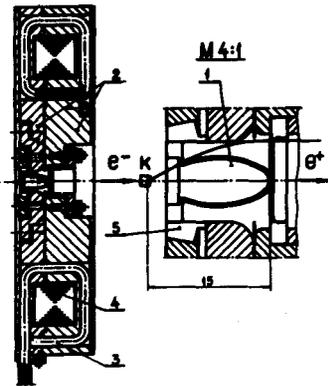


Рис. 4. Линза с трансформатором. 1 – корпус линзы, к – конвертер, 2 – трансформатор, 3 – выводы первичной обмотки, 4 – магнитопровод, 5 – цапговые зажимы контактов.

приращение эмитанса пучка за счет рассеяния не превышает 1,5 и практически компенсируется сокращением его за счет нелинейностей фокусировки, которое составляет в выбранной геометрии также 1,5. При энергии 20 МэВ ток линзы 100 кА, максимальное поле 130 кЭ. Механическая прочность подобных тонкостенных оболочек при столь больших полях обеспечивается их инерционными свойствами в динамических режимах нагружения при питании очень короткими (микросекундными) импульсами тока, что хорошо изучено экспериментально при более ранних разработках параболических линз /7/. Данная линза питается импуль-

сами тока с длительностью 0,8 мкс от тороидального трансформатора кабельной конструкции с очень малым рассеянием (рис. 4). Коммутация тока 17 кА в первичной цепи при напряжении 20 кВ осуществляется генератором на водородных тиратронах ТГИ-1000/25.

Еще более широкоугольная фокусировка требуется для собирания β -мезонов низких энергий, которые в диапазоне 50–100 МэВ рождаются практически изотропно в полном

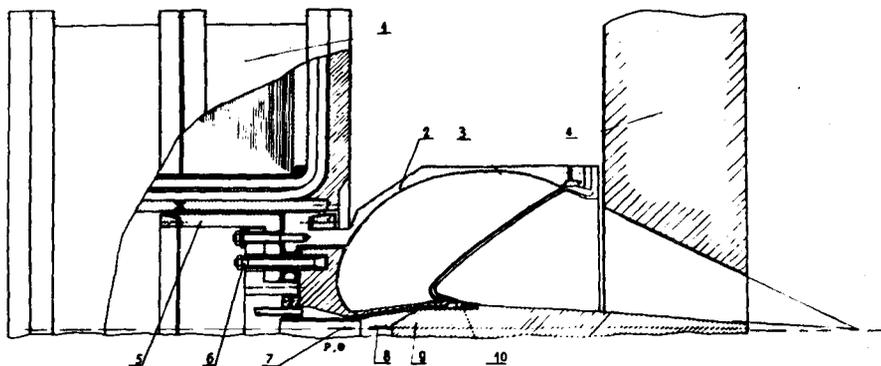


Рис. 5. Общий вид линзы. 1 - трансформатор, 2 - ошиновка, 3 - выходная поверхность, 4 - защита, 5 - токоподвод, 6 - контактные цанги, 7 - входная поверхность, 8 - мишень, 9 - вольфрамовая пробка, 10 - корпус водяного охлаждения.

телесном угле. Развитие принципа параболических линз позволяет создать фокусирующие системы, аналогичные параболическому зеркалу, которые способны собирать частицы в телесном угле, близком к $4\sqrt{f}$ рад. Примером такой системы является разработанный в ИЯФ проект линзы /8/, преобразующей пучок от точечного источника с углами от 30° до 150° в пучок, сходящийся под углами $\pm 25^\circ$ на оси системы на расстоянии 65 см от источника.

Входная поверхность линзы (рис. 5) выполнена в виде конуса, на оси которого помещается источник, выходная - имеет форму, обеспечивающую условия фокусировки. При энергии 30 МэВ ($\rho_s=100$ МэВ) необходимый ток составляет 1,4 МА, максимальное поле в самой узкой части 112 кЭ. Из соображений механической прочности максимальная толщина стенки входной поверхности составляет 5 мм, выходной - 2 мм. Рассеяние в стенках приводит к появлению дополнительного размера в плоскости изображения, среднеквадратичный радиус которого при указанных параметрах составляет 5 см. Продольный размер мишени передается в плоскость изображения с увеличением, приблизительно равным отношению углов схождения к углам сходимости, равным 2,4. Размер изображения совпадает со среднеквадратичным размером от рассеяния при длине мишени 2 см, так что при больших размерах мишени рассеянием можно практически пренебречь. Диафрагмирование дрейфового пространства за линзой ограничивает спектр импульсов f -мезонов в изображении интервалом разброса импульсов $\pm 15\%$.

На рис. 5 приведен общий вид линзы с ошиновкой, трансформатором и системой охлаждения, которое обеспечивается при помощи двухслойного корпуса. При питании линзы импульсом тока с длительностью 100 мкс такая система охлаждения позволяет работать с частотой циклов до 10 Гц. Индуктивность линзы 50 нГ, емкость 50 кДж, мощность активных потерь при частоте 10 Гц - 20 кВт. Линза питается от тороидального трансформатора кабельной конструкции, в первичной цепи которого коммутация тока 140 кА осуществляется вентилем, собранным из большого числа последовательно-параллельно включенных тиристоров. Подобный генератор разработан в ИЯФ, и в настоящее время производится испытание одной из его секций, состоящей из 24 параллельных ветвей по 10 последовательно включенных тиристоров ТД-200 15-го класса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Т.А.Всеволожская. Препринт ИЯФ 76-95, Новосибирск, 1976.
2. Report of VAPP-NAP Group in Proceedings of 8-th Intern. Conf. on High-Energy Accelerators, CERN, p. 72 (1971).
3. Г.И.Буджер и др. Препринт ИЯФ 76-93, Новосибирск, 1976.
4. Т.А.Всеволожская и др. ЖТФ, т. 43, 61, 1973.
5. Г.С.Виллевалд и др. Препринт ИЯФ 75-98, Новосибирск, 1975.

6. Г.С.Виллевалд и др. Препринт ИЯФ 77-16, Новосибирск, 1977.
7. Л.Л.Данилов и др. ЖТФ, т. XXXVII, в. 5, 914, 1967.
8. Г.И.Сильвестров и др. Препринт ИЯФ 77-28, Новосибирск, 1977.

ДИСКУССИЯ

R.H.Miller: Could you describe the current flow to your liquid metal lense?

Г.И.Сильвестров: Подвод тока к жидкому металлу ясен из рис.2: с элементов коаксиальной ошиновки (8) ток перетекает на цилиндрические детали (4), контакт с которыми осуществляется путем прижатия кольцевой гидравлической камерой (5), и далее ток перетекает на жидкий металл на торцах линзы в местах увеличения сечения области, занятой жидким металлом.

F.Netter: What is the repetition rate of the lithium lens for e^-/e^+ conversion?

Г.И.Сильвестров: В настоящее время на комплексах ВЭПП-2 и ВЭПП-3 линзы эксплуатируются при работе на частотах 1 и 2 Гц. но это не предельная частота, она может быть увеличена до 3-5 Гц в данных конструкциях и выше, если перейти к работе с конструкциями, в которых литий будет использоваться в расплавленном состоянии.

Р.А.Рзаев: 1. При выборе оптимальной светосильной системы предполагалось ли, что мишень фокусирующая?

2. В чем главный эффект от применения эллиптической поверхности во второй половине параболической линзы?

Г.И.Сильвестров: 1. Нет, в данной системе мишень не фокусирующая, она представляет собой вольфрамовый цилиндр с диаметром, равным диаметру первичного пучка.

2. При таком выборе формы входной поверхности эффективное преломление лучей, идущих из точечного источника в параллельные с осью системы лучи, осуществляется на плоской поверхности, пересекающей центр линзы, что обеспечивает линейность фокусировки.

В.М.Лобашов: Каковы возможная интенсивность пучка пионов, первичный пучок и цель создания пионного пучка?

Г.И.Сильвестров: Первичный пучок - электроны с энергией 1 или несколько ГэВ.

Расчетная средняя плотность пучка пионов в плоскости изображения на площадке в 100 см^2 составит $\sim 10^{-7}$ пионов на см^2 на один первичный электрон с энергией 1 ГэВ.

Цель данной разработки - рассмотрение возможности получения интенсивных пучков мезонов, генерируемых электронами.