

Повышение эффективности электронного коллектора для систем электронного охлаждения при помощи фильтра Вина

© М.И. Брызгунов, А.В. Иванов, В.М. Панасюк, В.В. Пархомчук, В.Б. Рева

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: M.I.Bryzgunov@inp.nsk.su

(Поступило в Редакцию 21 сентября 2012 г.)

Представлен высокоэффективный коллектор для высоковольтных систем электронного охлаждения, эффективность которого (отношение тока отраженных электронов к току основного пучка) значительно улучшена за счет подавления потока отраженных частиц в фильтре Вина. Вторичные электроны отклоняются в скрещенных поперечных электрическом и магнитном полях и поглощаются специальной приемной пластиной (вторичный коллектор). Конструкция фильтра рассчитана таким образом, чтобы обеспечить отклонение всего обратного потока электронов при минимальном искажении траектории и профиля основного пучка. Проведенные на специальном испытательном стенде эксперименты показали, что такой фильтр повышает эффективность коллектора примерно в 100 раз, до величин порядка 10^{-6} .

Введение

В настоящее время в накопителях тяжелых заряженных частиц широко применяется метод электронного охлаждения [1,2]. Охлаждение повышает качество пучков, уменьшая разброс по импульсам, подавляет рассеяние на мишени и внутривидовое рассеяние, позволяет накапливать ионные пучки. Максимальная энергия электронов в большинстве электронных охладителей составляет от нескольких десятков до нескольких сотен keV. Создание высоковольтных систем электронного охлаждения (с энергией до нескольких MeV) связано с большими техническими трудностями; в мире пока существует только одна такая система: охладитель на энергию 4.3 MeV, произведенный и используемый в FNAL (США) на комплексе Тэватрон [3].

В ИЯФ им. Г.И. Будкера (Новосибирск) создается система электронного охлаждения для установки COSY (Юлих, Германия) с возможностью перестройки энергии электронов в диапазоне от 25 keV до 2 MeV. В планируемых экспериментах требуется, чтобы время охлаждения составляло порядка нескольких десятков секунд, что значительно меньше времени охлаждения на Тэватроне, где оно составляет несколько десятков минут [3]. Поэтому важным отличием охладителя для COSY является наличие сильного (до 2 kG) продольного магнитного поля в секции охлаждения, которое обеспечивает так называемое „быстрое охлаждение“ [1]. В данной системе продольное магнитное поле существует вдоль всей траектории электронов от пушки до коллектора, что позволяет обеспечить фокусировку пучка, а также избежать проблем, связанных с вводом и выводом пучка из магнитного поля.

Специфика электронного охлаждения такова, что после взаимодействия с ионами полная энергия электронного пучка практически не меняется, поэтому все системы электронного охлаждения используют метод

рекуперации энергии электронного пучка. Идея метода состоит в том, чтобы ускоренный в электростатической трубке пучок (после взаимодействия с ионным пучком) сперва замедлить и лишь затем направить в специальный коллектор, где он поглотится. Такая схема позволяет значительно снизить мощность системы высоковольтного питания. При этом желание получить минимальную нагрузку на высоковольтные выпрямители и минимальный радиационный фон требует высокой степени эффективности рекуперации (т.е. поток вторичных электронов на находящиеся под потенциалом земли стенки вакуумной камеры должен быть минимальным). В настоящей работе предлагается коллектор с подавлением обратного потока электронов с помощью фильтра Вина, обеспечивающий высокую эффективность поглощения электронов, а следовательно, и высокий коэффициент рекуперации.

Требования на основные параметры коллектора

Основными параметрами коллекторов для систем электронного охлаждения являются их первеанс, максимальная рассеиваемая мощность и эффективность. Первеанс P является коэффициентом пропорциональности в законе Чайльда–Ленгмюра между напряжением коллектора U в степени $3/2$ и максимальным током I , который данный коллектор может принять при заданном напряжении ($P = I/U^{3/2}$). В охладителях первеанс в первую очередь определяет максимальный ток, который может поглотить коллектор при имеющемся коллекторном источнике питания. Максимальное напряжение источника питания ограничено как конструктивными особенностями коллекторного узла и его окружения, так и тепловой мощностью, выделяемой в коллекторе при поглощении пучка, поскольку для имеющейся конструкции коллектора и его системы охлаждения суще-

ствует предел по максимальной рассеиваемой мощности. Эффективность коллектора определяется как отношение тока отраженных от коллектора электронов к току основного пучка и в первую очередь определяет мощность высоковольтного генератора, питающего ускоряющую трубку.

Как правило, ток электронного пучка в системах электронного охлаждения определяется из соображений максимальной эффективности охлаждения. Типичное значение рабочего тока для установок на низкую энергию составляет величину порядка сотни мА. Основным ограничением на величину тока является возникновение дрейфового движения в скрещенных полях собственного пространственного заряда электронного пучка и продольного магнитного поля [4]. Однако при охлаждении электронами высокой энергии (несколько MeV) расталкивание электрическим полем пучка компенсируется магнитным сжатием, и эффективное поле уменьшается как $1/\gamma^2$ (где γ — релятивистский фактор). Поэтому пучка и коллектор для данного охладителя рассчитаны на ток до 3 А.

При разработке коллектора для охладителя COSY за основу была взята конструкция, разработанная для установок ЭХ-35, ЭХ-40 и ЭХ-300. Первеанс коллектора в них варьировался в зависимости от различных факторов в диапазоне $14\text{--}18\ \mu\text{A}/\text{V}^{1.5}$ [5]. Для достижения проектного тока 3 А необходимо напряжение на коллекторе порядка 5 kV, что соответствует мощности источника питания 15 kW.

Энергия электронов в системах электронного охлаждения задается высоковольтным генератором, управляющим напряжением катода относительно земли. Для охладителей на низкую и среднюю энергии (несколько сотен keV) высоковольтные генераторы, как правило, ограничены по току величиной в несколько миллиампер. В высоковольтных системах максимальный ток еще меньше и соответствует нескольким сотням микроампер. Так, например, в проектируемом для накопителя HESR охладителе на энергию до 8 MeV максимальный ток выбранного разработчиками источника питания компании Pelletron ограничен $300\ \mu\text{A}$ [6]. В таком случае при максимальном токе 1 А эффективность коллектора не должна быть хуже чем $3 \cdot 10^{-4}$. Высокий ток потерь приводит и к другим проблемам. Например, ускоренные до полной энергии электроны, попадая на стенку вакуумной камеры, вызывают сильное газоотделение, что ухудшает вакуумные условия в системе. Кроме того, такие электроны являются источником радиации.

Однако максимальный ток потерь в высоковольтных охладителях имеет более жесткие ограничения, связанные с электрической прочностью ускоряющих трубок. В соответствии с опытом, полученным разработчиками электронного охладителя для комплекса Тэватрон (США), ток потерь непосредственно на ускоряющую трубку в размере $1\text{--}3\ \mu\text{A}$ значительно повышает частоту пробоев на полное напряжение [3,6]. При этом напрямую связать ток потерь с током, попадающим на

трубку затруднительно, так как, во-первых, данное соотношение связано с геометрией как самого коллектора, так и трубок; а во-вторых, замагниченность движения в трубке (которое отсутствует в охладителе Тэватрона) значительно уменьшает поток электронов в поперечном направлении (на трубку).

Исходя из всех вышеперечисленных соображений было принято, что ток потерь в охладителе для COSY не должен превышать нескольких десятков микроампер, что соответствует эффективности рекуперации примерно 10^{-5} .

Способы повышения эффективности коллектора

Большинство коллекторов в системах электронного охлаждения представляет собой цилиндр Фарадея с дополнительными электродами на входе, создающими запирающий потенциал, препятствующий выходу вторичных электронов. Удержание в коллекторе дополнено магнитной пробкой, отражающей вторичные электроны, движущиеся с большими углами относительно магнитной силовой линии. При этом, сформировав необходимый вид магнитных силовых линий с помощью катушек и магнитного железа, можно создать магнитную пробку, а также распределить поток электронов по внутренней поверхности коллектора для более эффективного его охлаждения. Однако на практике эффективность подобных коллекторов находится на уровне $10^{-3}\text{--}10^{-4}$. Это связано с тем, что в таком симметричном коллекторе у частицы есть возможность, отразившись от коллектора, вылететь из него (особенно у частиц в центре пучка). Предельные возможности таких коллекторов были оценены в работе [7] по формуле

$$\frac{I_{\text{loss}}}{I_{\text{beam}}} = k \left(\frac{U_{\text{min}}}{U_{\text{coll}}} \right)^2 \frac{B_c}{B_0}, \quad (1)$$

где U_{coll} — напряжение коллектора, U_{min} — напряжение на входе в коллектор, B_c и B_0 — магнитные поля на поверхности коллектора и на входе соответственно, k — коэффициент отражения от поверхности коллектора. $U_{\text{min}}/U_{\text{coll}}$ определяется пространственным зарядом и было взято равным 0.3 (для тока порядка 1 А и $U_{\text{coll}} = 2.5\ \text{kV}$), отношение B_c/B_0 примерно равно отношению площади пучка на входе в коллектор к площади поверхности коллектора и обычно не меньше чем 0.01; коэффициент k взят равным 0.1. Полученное значение предельной эффективности $\sim 10^{-4}$.

В большинстве установок электронного охлаждения эффективность рекуперации равна эффективности коллектора, что связано с использованием поперечного магнитного поля для компенсации центростремительного дрейфа. При вводе и выводе электронного пучка из секции охлаждения осуществляется его поворот в сопровождающем магнитном поле. При этом возникает центростремительный дрейф, влияние которого необходимо скомпенсировать.

При использовании магнитной компенсации дрейфа движущиеся в обратном направлении вторичные электроны получают в повороте двойное смещение и попадают на стенки вакуумной камеры.

Для достижения высокого коэффициента рекуперации ($10^{-5} - 10^{-6}$) при эффективности коллектора $10^{-3} - 10^{-4}$ существует метод компенсации центробежного дрейфа электрическим полем, впервые опробованный на установке IUCF (Indiana University, США) [8]. В секции охлаждения данной установки создавалось поперечное электрическое поле, которое компенсировало смещение пучка в поворотах, вызванное центробежным дрейфом. Поскольку направление дрейфа в скрещенных электрическом и магнитном полях не зависит от направления скорости частиц, то движение электронов можно сделать полностью обратимым, т.е. вторичные электроны, покинувшие коллектор, могут пролететь весь охладитель до пушки, и затем снова попасть в коллектор, где они снова имеют вероятность быть поглощенными его поверхностью. Однако тот факт, что электрическое поле создается в самой секции охлаждения, делает такой способ непригодным для использования при охлаждении ионного пучка.

Дальнейшее развитие метод компенсации центробежного дрейфа электрическим полем получил на охладителях, разработанных в ИЯФ СО РАН для LEIR, CSR-E, CSR-M, где электростатические пластины были установлены непосредственно в повороты [5,9]. На данных охладителях была достигнута эффективность рекуперации порядка 10^{-7} при эффективности коллектора $\sim 5 \cdot 10^{-4}$. При этом такой подход можно использовать непосредственно при охлаждении, так как в самой секции охлаждения электрическое поле отсутствует.

Однако метод электростатической компенсации не подходит для высоковольтных охладителей, где величина электрического поля в поворотах, а соответственно и напряжение на электростатических пластинах слишком велика, соответственно создание поперечного поля становится технически очень сложной задачей. Поэтому в высоковольтных охладителях необходимо повышать эффективность самого коллектора.

В системе электронного охлаждения для комплекса Тэватрон была предложена конструкция коллектора с поперечным магнитным полем [10]. Идея состоит в том, чтобы силовые линии магнитного поля в коллекторе были не аксиально-симметричными, а поворачивались в одну сторону. Таким образом, внутри коллектора образуется поворот, который отклоняет пучок. При этом происходит смещение пучка перпендикулярно плоскости поворота за счет центробежного дрейфа. Отраженные электроны при этом также смещаются относительно входа в коллектор за счет центробежного дрейфа. Если полная величина смещения вторичных электронов такова, что они все не попадают в апертуру входа в коллектор, то эффективность коллектора значительно увеличивается. В экспериментах, проведенных на испытательном стенде и на самом охладителе, была

достигнута эффективность коллектора $(5-10) \cdot 10^{-6}$ при токе пучка до 2 А. Однако номинальный ток данного коллектора 0.5 А и ограничен возможностями охлаждающей системы коллектора. Поскольку в такой конструкции пучок попадает только на относительно небольшое пятно на внутренней поверхности коллектора, то при больших токах может возникнуть сильный локальный перегрев. Поэтому для нашей системы с током до 3 А было выбрано другое решение.

Коллектор с фильтром Вина

В строящейся установке электронного охлаждения для COSY для подавления обратного потока отраженных от коллектора электронов используется метод, предложенный в [11], в котором подавление осуществляется фильтром Вина. На рис. 1 показан чертеж всего коллекторного узла в сборе. Проходя ускорительную трубку 1 электроны замедляются до энергии 20 keV и попадают в фильтр Вина 2. Вылетая из фильтра Вина, электрон пролетает через приколлекторный электрод 3, супрессор 4 и попадает в коллектор 5. Комбинация формы магнитного экрана 6 и тока в катушках соленоида 7 позволяет равномерно распределить поток электронов по всей внутренней поверхности коллектора 5, чтобы избежать его локального перегрева. Через отверстие 8 происходит дополнительная вакуумная откачка.

Идея использования фильтра Вина для улучшения коэффициента рекуперации заключается в использовании скрещенных электрического и магнитного полей для подавления обратного потока электронов, отраженных от коллектора (рис. 2). Для основного пучка действие поперечных сил компенсируется, и пучок движется без отклонения

$$F_{\perp} = \frac{e}{c} V_{\parallel} B_{\perp} - eE_{\perp} = 0, \quad (2)$$

где F_{\perp} — поперечная сила, e — заряд электрона, c — скорость света, V_{\parallel} — скорость электрона в фильтре, B_{\perp} и E_{\perp} — поперечные магнитное и электрическое поля.

Для отраженных электронов сила Лоренца направлена в противоположную сторону и не компенсирует, а, наоборот, усиливает действие электрического поля, за счет чего обратный поток электронов отклоняется в сторону, где затем может быть поглощен специальной приемной пластиной

$$F'_{\perp} = \frac{e}{c} V_{\parallel} B_{\perp} + eE_{\perp} = 2 \frac{e}{c} V_{\parallel} B_{\perp}. \quad (3)$$

Наличие продольного магнитного поля B_{\parallel} в фильтре Вина позволяет избежать попадания отраженных от коллектора электронов на электростатические пластины, создающие электрическое поле, поскольку смещение вторичного пучка происходит за счет дрейфа, который направлен параллельно пластинам. Скорость дрейфа в

фильтре V_{\perp} и величина поперечного смещения Δy равны соответственно

$$V_{\perp} = c \frac{[\mathbf{F}_{\perp} \times \mathbf{B}_{\parallel}]}{eB_{\parallel}^2}, \quad \Delta y = V_{\perp} \tau = 2L \frac{B_{\perp}}{B_{\parallel}}, \quad (4)$$

где L — длина фильтра Вина, $\tau = L/V_{\parallel}$ — время, за которое электрон пролетает через фильтр.

Поперечное электрическое поле в фильтре Вина создается с помощью электростатических пластин. Влетая в область с поперечным электрическим полем, электроны ускоряются или тормозятся краевыми полями пластин, вследствие чего продольная скорость электронов в пучке различается в зависимости от того, к какой

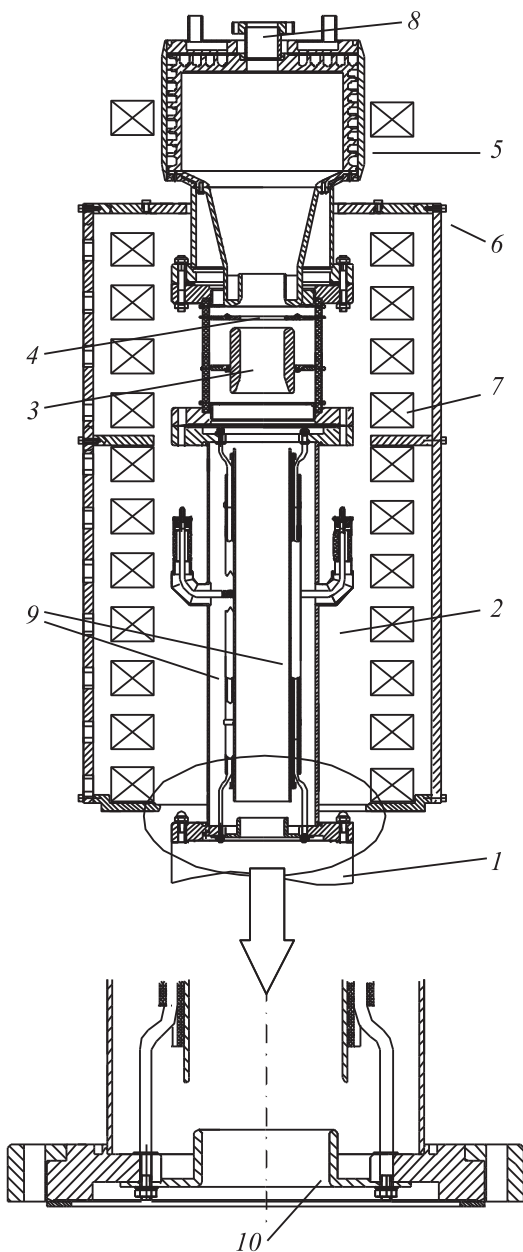


Рис. 1. Коллекторный узел (коллектор и фильтр Вина).

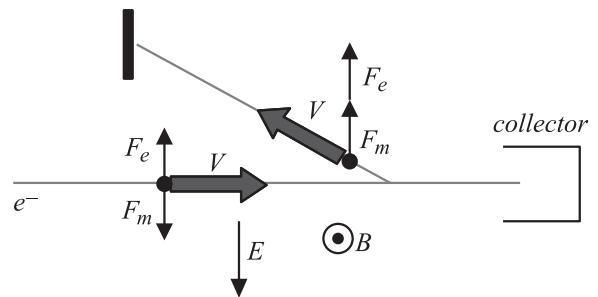


Рис. 2. Принцип работы фильтра Вина.

пластине ближе расположен электрон. При однородном поперечном магнитном поле такая разница в скоростях электронов приведет к тому, что для большинства частиц основного пучка сила Лоренца не будет равна электростатической силе, за счет чего профиль основного пучка будет искривляться. Такой искривленный пучок может ухудшить первеанс и эффективность коллектора. Чтобы избежать этого, поперечное магнитное поле можно сделать не однородным, а с градиентом в поперечном направлении

$$B_x(y) = B_{\perp} \frac{n}{R} y, \quad B_y(x) = B_{\perp} \left(1 - \frac{n}{R} x\right), \quad (5)$$

где $R = \frac{p_0 c}{eB_{\perp}}$, x и y — поперечные координаты с центром на оси системы, p_0 — импульс электронов на входе в фильтр.

Чтобы определить величину n , найдем чему равны компоненты дрейфовой скорости для частицы с поперечными координатами x и y (E_{\perp} параллельно оси x).

$$\begin{cases} V_{\perp x} = \frac{1}{B_{\parallel}} (V_0 + \Delta V) B_x(y), \\ V_{\perp y} = -\frac{c}{B_{\parallel}} \left[E_{\perp} - \frac{1}{c} (V_0 + \Delta V) B_y(x) \right], \end{cases} \quad (6)$$

где V_0 — продольная скорость на входе в фильтр, ΔV — приращение продольной скорости за счет ускорения на краевых полях электростатических пластин. Полагая, что изменение энергии частицы за счет ускорения ΔE много меньше энергии частицы ($\Delta E \ll E$), находим приращение продольной скорости:

$$\Delta V = \frac{\Delta E}{\gamma_0^3 m V_0}. \quad (7)$$

Подставив это выражение в уравнения для дрейфовой скорости и разложив по малости x и y , удерживая только первые члены разложения, получим

$$\begin{cases} V_{\perp x} = -\frac{V_0 B_{\perp} n y}{R B_{\perp}}, \\ V_{\perp y} = \left[-\frac{V_0 B_{\perp} n}{R} + \frac{e B_{\perp}^2}{m c \gamma_0^3} \right] \frac{x}{B_{\parallel}}. \end{cases} \quad (8)$$

Видно, что частица не будет удаляться от центра пучка, только если она будет вращаться вокруг него по круговой орбите. Условие вращения по круговой орбите:

$$\frac{V_{\perp x}}{y} = -\frac{V_{\perp x}}{x}. \quad (9)$$

Отсюда получаем уравнение для n , из которого находим

$$n = \frac{1}{2} \frac{eB_{\perp}R}{mc\gamma_0^3V_0} = \frac{1}{2\gamma_0^2}. \quad (10)$$

Энергия электронов в описываемом фильтре 20 keV, поэтому их можно считать нерелятивистскими, соответственно $n = 0.5$.

Магнитная система фильтра Вина

При проектировании фильтра рассматривались два способа формирования поперечного магнитного поля: с помощью специальных катушек и с помощью постоянных магнитов. Использование катушек было связано с техническими трудностями. Чтобы сделать их неохлаждаемыми, необходимо увеличивать их размер, в результате чего они не вписывались в габариты высоковольтного терминала. Уменьшение их размера за счет подведения охлаждения также требовало значительной переработки проекта терминала.

При использовании постоянных магнитов таких проблем не возникало. Их размер легко вписывался в габариты системы. К тому же в отличие от катушек они не требуют дополнительных источников питания. Однако минусом такого решения является значительно меньшая гибкость системы: для изменения величины или градиента магнитного поля необходимо разбирать и вручную менять конфигурацию магнитной системы.

На рис. 3, *a* показан магнитный экран фильтра Вина. Экран состоит из 8 прямоугольных пластин, соединенных с тремя восьмиугольными диафрагмами. В одной из пластин сделаны отверстия для трубок (1), по которым подводится масло для охлаждения катушек соленоида продольного магнитного поля. К четырем пластинам прикреплены по 6 постоянных магнитов (2). Магниты представляют собой параллелепипеды с размерами $40 \times 44 \times 4$ mm с остаточной намагниченностью 13 kG, вектор намагниченности направлен перпендикулярно большой грани. Их размер и положение были подобраны таким образом, чтобы интеграл поперечного магнитного поля на оси фильтра был равен $1400 \text{ G} \cdot \text{cm}$, а градиент $n = 0.5$ для электронов с энергией 20 keV. Расчеты проводились при помощи программы Mermaid [12].

Центральная диафрагма 3 формирует более резкий край поперечного магнитного поля, чтобы профиль магнитного поля лучше совпадал с профилем электрического поля. На рис. 4 показаны распределения поперечного магнитного поля вдоль оси фильтра для системы с диафрагмой и без нее. Координата z направлена снизу вверх для рис. 3, *a*, $z = 0$ соответствует нижнему краю

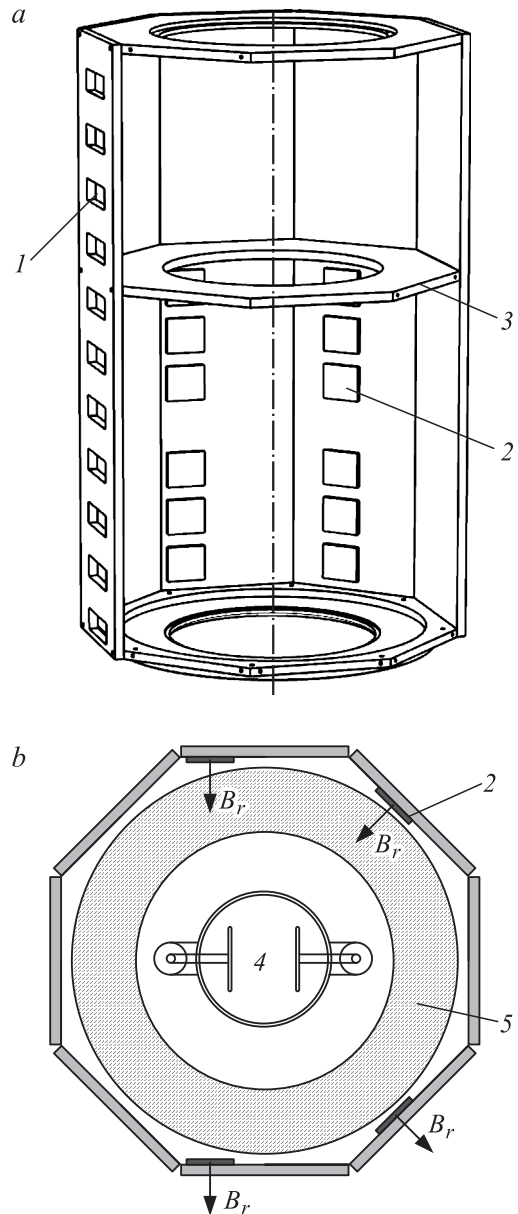


Рис. 3. Магнитная система фильтра Вина: *a* — магнитный экран фильтра Вина с постоянными магнитами (без трех боковых пластин), *b* — вид фильтра Вина сверху.

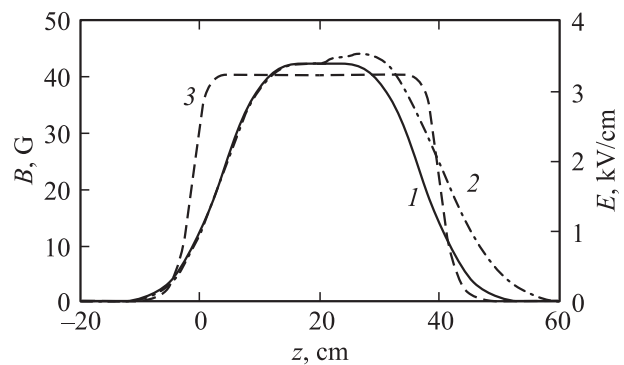


Рис. 4. Распределение поперечных полей вдоль оси фильтра Вина: 1 — магнитное поле с диафрагмой, 2 — магнитное поле без диафрагмы, 3 — электрическое поле.

магнитного экрана. Из рисунка видно, что диафрагма позволяет сделать оба края симметричными. При этом спад поля с диафрагмой более резкий.

Для создания продольного поля в фильтре (рис. 3, *b*) его вакуумная камера 4 помещена в соленоид, состоящий из отдельных катушек 5.

Электростатическая система фильтра Вина

Электростатическая система фильтра Вина (рис. 1) состоит из двух пластин 9, установленных внутри вакуумной камеры, и вторичного коллектора 10, на котором погибают отклоненные в фильтре вторичные электроны. Расстояние между пластинами 6 см и равно их ширине. Диаметр отверстия во вторичном коллекторе 5 см. Отраженные от коллектора электроны, попавшие на вторичный коллектор, в свою очередь выступают источниками вторичных электронов, которые могут попадать в ускоряющую трубку, ускориться и оседать на электродах ускоряющей трубки или стенках вакуумной камеры. Чтобы уменьшить количество таких электронов, вторичный коллектор имеет специальную форму со стенкой, которая препятствует движению электронов к выходу из фильтра.

На рис. 4 показано распределение поперечного электрического поля вдоль оси фильтра. Видно, что на краях электрическое поле фильтра спадает намного быстрее, чем магнитное, что связано с меньшими поперечными размерами электростатической системы.

Расчет движения в фильтре Вина

На рис. 5 показаны траектории основного и вторичного пучков электронов в фильтре. Радиус пучка 1.5 см, продольное магнитное поле 500 Г. Из рисунка видно, что есть небольшое возмущение в движении основного пучка, связанное с неполным совпадением профилей магнитного и электрического полей. Однако величины

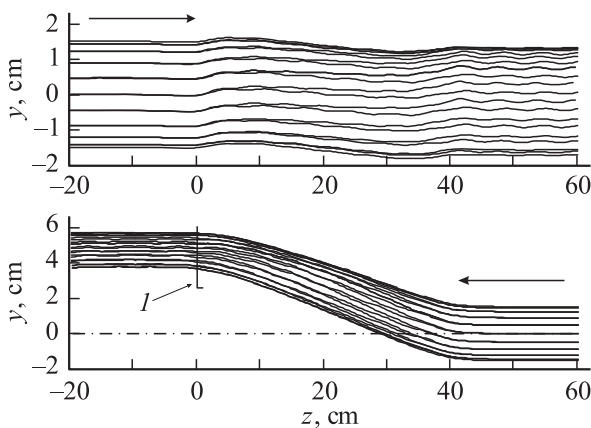


Рис. 5. Траектории основного (сверху) и вторичного (снизу) пучков в фильтре.

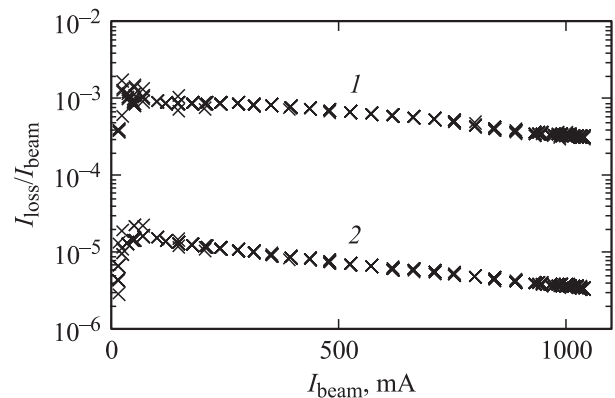


Рис. 6. Зависимости относительных токов потерь от тока пучка: 1 — из самого коллектора, 2 — из коллектора с фильтром Вина.

полей можно подобрать таким образом, что в среднем их влияние будет компенсировано. Вторичный пучок отклоняется в фильтре достаточно сильно, чтобы гарантированно попасть на вторичный коллектор 1. Как видно из результатов расчета, отверстия во вторичном коллекторе с диаметром 5 см достаточно, чтобы, с одной стороны, его не касался основной пучок, а с другой стороны, чтобы все электроны вторичного пучка попадали на него.

Измерение эффективности коллектора

Для измерения эффективности коллектора был модифицирован специальный стенд „пушка–коллектор“ [13]. На рис. 6 показаны результаты измерения эффективности самого коллектора и коллектора с фильтром Вина.

Как видно из рисунка, фильтр Вина повышает эффективность коллектора примерно в 100 раз. При этом эффективность также повышается с увеличением тока пучка, что связано с появлением дополнительного запыриания собственным пространственным зарядом пучка. Достигнутая эффективность равна $3 \cdot 10^{-6}$ при токе основного пучка 1 А.

Модификация электростатической системы

После проведения некоторых испытаний фильтра Вина были выявлены некоторые недостатки конструкции. Здесь предложены несколько модификаций его электростатической системы, которые должны улучшить его работу.

Первая модификация направлена на улучшение однородности электрического поля в фильтре. Поскольку расстояние между электростатическими пластинами равно их ширине, то электрическое поле в фильтре сильно неоднородно. При этом добиваться однородности путем увеличения пластин или уменьшения расстояния

между ними нельзя, так как, с одной стороны, система должна иметь достаточную электрическую прочность, чтобы не пробиваться на стенку вакуумной камеры, а с другой — расстояние между пластинами должно быть достаточным, чтобы на них не попадали электроны основного и вторичного пучков. Добиться лучшей однородности электрического поля, не меняя габаритов системы, можно, изменив форму пластин, а именно сделав на их краях специальный шим (рис. 7).

На рис. 8 показаны распределения электрического поля для обеих конструкций. Видно, что в области ± 2 см, в которой находится основной пучок, поле от пластин с шимом более однородное.

На рис. 9 показан профиль основного электронного пучка после прохождения через фильтр Вина для плоских пластин и пластин с шимом. Видно, что, двигаясь в системе с плоскими пластинами, профиль пучка заметно искривляется, что приводит к увеличению эффективного размера пучка, при этом, когда у пластин есть шим, профиль пучка почти не меняется.

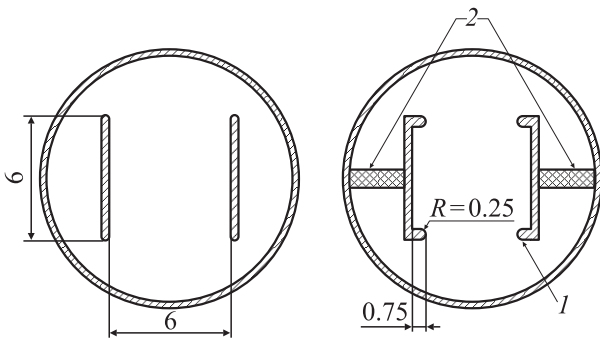


Рис. 7. Эскизы электростатических пластин фильтра Вина в вакуумной камере. Слева — плоские пластины, справа — пластины с шимом (1) и со вставками из проводящего стекла (2).

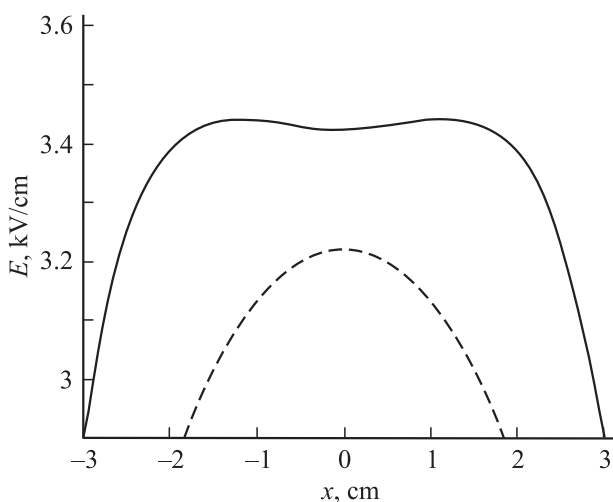


Рис. 8. Сравнение распределения электрических полей в фильтре Вина для пластин с шимом (сплошная линия) и без шима (штриховая линия).

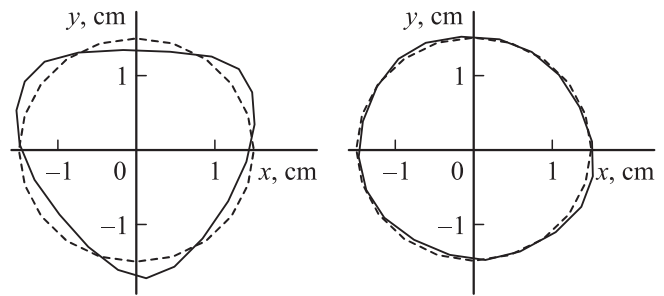


Рис. 9. Профиль электронного пучка при прохождении через фильтр Вина для плоских пластин (слева) и для пластин с шимом (справа). Штриховые линии — на входе в фильтр, сплошные — на выходе.

Вторая модификация направлена на решение проблемы возникновения разряда Пеннинга в фильтре, проявляющаяся при плохих вакуумных условиях, что особенно сильно проявляется при его первых включениях после откачки с атмосферы. Электроны, попадающие на вторичный коллектор, начинают выбивать с его поверхности абсорбированные молекулы, не ушедшие при прогреве вакуумного объема, что сильно ухудшает вакуум в данной области. При этом такая ситуация сохраняется, пока поверхность вторичного коллектора не очистится и попадание на него электронов не перестанет приводить к значительному ухудшению вакуума, что занимает несколько дней.

Для предотвращения разряда Пеннинга предлагается добавить элементы из специального проводящего стекла (рис. 7), которые будут препятствовать дрейфу заряженных частиц вокруг пластин, что не позволит развиваться разряду [14]. При этом, с одной стороны, проводящее стекло в отличие от обычного изолятора позволяет избежать локального накопления заряда на его поверхности, что может приводить к спонтанным разрядам, ухудшающим электрическую прочность системы, а с другой стороны, проводимость стекла все же низка и такие вставки незначительно нагрузят высоковольтные источники питания пластин фильтра.

Заключение

Разработан и испытан коллекторный узел, совмещающий в себе охлаждаемый коллектор и фильтр Вина, предназначенный для подавления потока отраженных от коллектора электронов. Использование такой схемы позволит повысить эффективность рекуперации в системах электронного охлаждения до уровня 10^{-6} без использования электростатических поворотов. Высокая эффективность рекуперации необходима при создании высоковольтных систем электронного охлаждения, в частности 2 MeV охладителя для COSY (Германия).

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России и Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 гг., гос. контракты П1198 и 02.740.11.0513.

Список литературы

- [1] *Пархомчук В.В., Скринский А.Н.* // УФН. 2000. Т. 170. № 5. С. 473–493.
- [2] *Мешков И.Н., Сидорин А.О.* // Письма в ЭЧАЯ. 2004. Т. 1. № 3. С. 22–31.
- [3] *Shemyakin A., Prost L.* // Proc. COOL'11 (Alushta, Ukraine). 2011. P. 31–36.
- [4] *Parkhomchuk V.V.* // NIM A. 2000. Vol. 441. P. 9–17.
- [5] *Бочаров В.Н., Бублей А.В., Веденев М.В.* и др. Запуск установки электронного охлаждения ЭХ-300. Препринт ИЯФ СО РАН № 2004-4. 2004. 82 с.
- [6] HESR electron cooler. Design study // The Svedberg laboratory of The Uppsala University (Sweden). 2009. 150 p.
- [7] *Shemyakin A.* // Proc EPAC 2000 (Vienna, Austria). 2000. P. 1268–1270.
- [8] *Ellison T., Friesel D., Brown R.* // Proc. PAC'89 (Chicago, USA). 1989. P. 633–635.
- [9] *Parkhomchuk V.V.* // Proc. COOL'05 (Galena, USA). 2005. P. 249–258.
- [10] *Prost L., Shemyakin A.* // Proc. PAC'05 (Knoxville, USA). 2005. P. 2387–2389.
- [11] *Мешков И.Н., Салимов Р.А., Файнштейн В.Г.* // ЖТФ. 1973. Т. 43. Вып. 8. С. 1782–1784.
- [12] Mermaid for Windows XP. User's Guide / Ed. by A.N. Dubrovin. Novosibirsk, 2005. 74 p.
- [13] *Bubley A.V., Panasyuk V.M., Parkhomchuk V.V., Reva V.B.* // Instruments and Experimental Techniques. 2006. Vol. 49. N 83. P. 83–91.
- [14] *Шарана А.Н.* Автореф. канд. дис. Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1982. 124 с.