

УДК 621.3.032.26

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ КОЛЛЕКТОР ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

© 2013 г. М. И. Брызгунов, А. В. Иванов, В. М. Панасюк, В. В. Пархомчук, В. Б. Рева

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 11*

Поступила в редакцию 26.04.2012 г.
После доработки 12.07.2012 г.

Описан высокоперевансный коллектор с малым коэффициентом вторичной эмиссии, предназначенный для высоковольтной установки электронного охлаждения. Особенностью исследуемого коллектора является то, что он состоит из собственно охлаждаемого коллектора, который принимает электронный поток, и установленного перед ним фильтра Вина, который значительно уменьшает выходящий из коллектора поток вторичных электронов. Основным достоинством такой схемы является сочетание малого коэффициента вторичной эмиссии и высокого переванса с относительно небольшими размерами и легкостью изготовления и настройки. Приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований составного коллектора, исследуются различные режимы его работы. Минимальный достигнутый коэффициент вторичной эмиссии составил $5 \cdot 10^{-6}$. Предложены способы дальнейшего уменьшения этого коэффициента.

DOI: 10.7868/S0032816213020043

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в ИЯФ СО РАН создается установка электронного охлаждения на энергию электронов до 2 МэВ для синхротрона COSY [1, 2]. Синхротрон COSY предназначен для экспериментов с поляризованными или неполяризованными протонами в области энергий до 2600 МэВ на внутренней мишени или с выводом пучка на внешнюю мишень. При проведении экспериментов с внутренней мишенью очень важна возможность “охлаждения” используемого пучка (т.е. уменьшения разброса импульсов частиц) для подавления “греющих” эффектов.

В настоящее время в синхротроне CO(COoler) SY(Synchrotron) уже используются две системы охлаждения, что отражено в названии синхротрона на английском языке. Электронное охлаждение [3] на низкой энергии протонов (50 МэВ) позволяет провести накопление заряженных частиц и увеличить фазовую плотность пучка перед дальнейшими экспериментами. Стохастическое охлаждение [3] препятствует деградации качества пучка при его взаимодействии с мишенью на энергии эксперимента. К сожалению, стохастическому охлаждению присуще естественное ограничение, затрудняющее его работу при большой интенсивности охлаждаемого пучка и малом разбросе импульсов охлаждаемых частиц.

Электронное охлаждение на энергии эксперимента будет эффективно подавлять малоугловое рассеяние и небольшие ионизационные потери,

имеющие наибольшую вероятность при взаимодействии частиц с веществом при высоких энергиях. Совместное его использование со стохастическим охлаждением позволит значительно увеличить светимость экспериментов с внутренней мишенью.

Схема установки электронного охлаждения показана на рис. 1 слева, а справа изображена схема электростатического ускорителя. Стационарный электронный пучок с током до нескольких ампер ускоряется вдоль электростатической колонны 1, и, далее, по транспортной системе 2 направляется в секцию охлаждения 3, где движется совместно с ионным пучком (тракт ионной орбиты обозначен позицией 5). В результате совместного движения происходит передача тепловой энергии от более горячих ионов холодным электронам.

Покинув секцию охлаждения, электронный пучок возвращается обратно и по каналу 4 снова попадает в колонну, где практически полностью теряет накопленную энергию и поглощается в коллекторе. На протяжении всего пути пучок находится в сопровождающем магнитном поле. В секции охлаждения это поле резко улучшает эффективность взаимодействия электронов с ионами, в электронной пушке оно помогает сформировать требуемый электронный пучок, в электростатической колонне и в транспортной системе — обеспечивает поперечную фокусировку пучка.

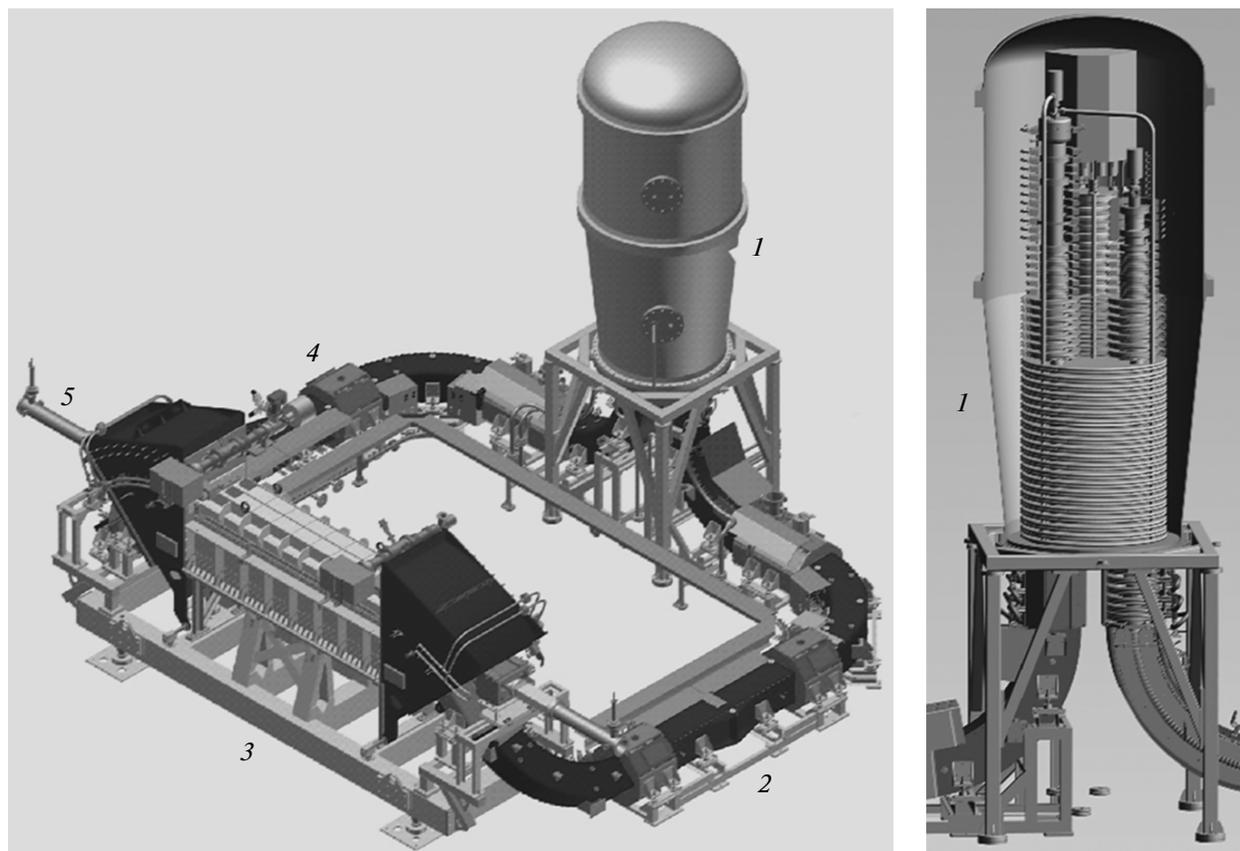


Рис. 1. Слева – схема установки электронного охлаждения для синхротрона COSY; справа – внешний вид электростатического ускорителя. 1 – электростатический ускоритель, 2 – транспортный канал к секции охлаждения, 3 – секция охлаждения ионного пучка, 4 – обратный транспортный канал, 5 – ионный тракт.

Основные параметры установки электронного охлаждения приведены ниже:

Диапазон энергий, МэВ	0.1–2
Стабильность энергии	$<10^{-4}$
Электронный ток, А	0.1–3
Диаметр электронного пучка, мм	10–30
Длина секции охлаждения, м	2.69
Радиус поворотов, м	1.00
Магнитное поле в секции охлаждения, кГс	0.5–2
Вакуум, мбар	10^{-9} – 10^{-10}
Полная длина вдоль синхротрона, м	6.39
Максимальная высота, м	5.7
Высота канала протонного пучка, м	1.8

В зависимости от начальных условий ожидаемая скорость охлаждения $\leq 0.01 \text{ с}^{-1}$.

Одной из ключевых проблем, возникающих при создании подобной установки, является обеспечение стабильности ее работы в режиме глубокой рекуперации. Для этого крайне важно минимизировать потери ускоренных до полной

энергии электронов на стенках вакуумной камеры. В сопровождающем магнитном поле первичный пучок доходит до коллектора практически без потерь. Вторичные же электроны, вылетающие из коллектора, снова ускоряются вдоль колонны и, если не предпринять специальных мер, при поворотах пучка в сопровождающем магнитном поле попадают на стенки находящейся под потенциалом “земли” камеры вследствие центробежного дрейфа. При этом они выбивают ионы, которые в свою очередь, набрав полную энергию, выбивают электроны из находящихся под высоким потенциалом стенок, обеспечивая “токовую” связь между высоким потенциалом и “землей”, что ведет к пробое.

Другой механизм пробоя связан с заряданием ускорительной трубки за счет рассеяния вторичных электронов на неоднородностях оптической системы. Последующее выравнивание зарядов вдоль ускорительной трубки, сопровождающееся микропробоем, способно инициировать пробой по полному напряжению. Экспериментальные данные, полученные на установке Fermilab [4, 5], свидетельствуют о том, что для устойчивой работы установки ток на трубку не должен превышать

нескольких микроампер. Кроме вышеуказанных проблем со стабильностью высокого напряжения, потери ускоренных электронов приводят также к ухудшению вакуумных условий и увеличению радиационного фона вокруг установки.

В работе [6] показано, что для аксиально-симметричного коллектора коэффициент вторичной эмиссии составляет величину порядка 10^{-4} – 10^{-3} . С учетом тока электронного пучка порядка нескольких ампер становится очевидным, что необходимы меры по значительному снижению тока потерь.

В настоящее время применяются два способа уменьшения тока потерь: реализация обратимого движения электронов в охладителе или использование коллектора с коэффициентом вторичной эмиссии $\leq 10^{-5}$. В первом случае в местах поворота пучка создают электрическое поле таких напряженности и направления, чтобы полностью скомпенсировать центробежный дрейф. При этом вторичный поток полностью проходит весь путь до катода, отражается обратно, вновь доходит до коллектора и поглощается в нем. Потери при этом определяются уже другими причинами и составляют 10^{-5} – 10^{-6} от полного тока пучка. Электростатические повороты были с успехом использованы при создании установок электронного охлаждения ЕС-35, ЕС-300 и LEIR на максимальную энергию электронов 35, 300 и 40 кэВ соответственно [7, 8]. Однако с ростом энергии требуется все более сильное электрическое поле, что вынуждает сильно поднимать напряжение на пластинах создающего его конденсатора. Это обстоятельство в совокупности со значительно увеличившимся числом поворотов делает электростатическую компенсацию дрейфа сложно реализуемой в создаваемой установке.

Второй подход – создание высокоэффективного коллектора с коэффициентом вторичной эмиссии порядка 10^{-5} – требует отказа от аксиальной симметрии магнитного поля внутри коллектора. Для этого может быть использован набор постоянных магнитов, искажающих силовые линии поля [9, 10]. Сам коллектор при этом получается значительно большим по объему и требует тщательной и трудоемкой настройки на специальном стенде.

СОСТАВНОЙ КОЛЛЕКТОР

В данной работе исследуется вариант уменьшения тока потерь из коллектора, предложенный в работе [11], – сочетание аксиально-симметричного коллектора и установленного перед ним фильтра Вина. Фильтр Вина [12] представляет собой область со скрещенными поперечными электрическим и магнитным полями, подобранными так, что их действие взаимно компенсируется для

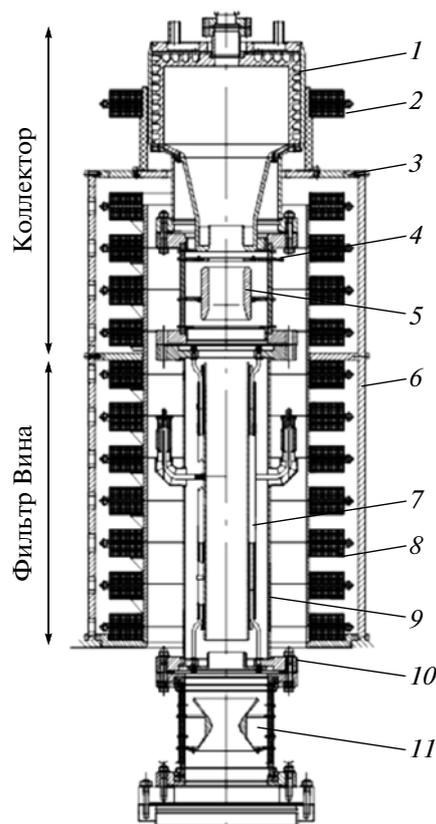


Рис. 2. Схема составного коллектора с анализирующим электродом. 1 – охлаждаемая поверхность, 2 – катушка коллектора, 3 – магнитная диафрагма, 4 – супрессор, 5 – приколлекторный электрод, 6 – магнитно-провод, 7 – электростатические пластины фильтра Вина, 8 – магнитные катушки фильтра Вина, 9 – вакуумная камера фильтра Вина, 10 – диафрагма вторичного пучка, 11 – анализирующий электрод.

электронов первичного пучка. Вторичные же электроны, движущиеся в обратном направлении, сильно отклоняются от оси и осаждаются на диафрагму фильтра, находящуюся под потенциалом вакуумной камеры. Схема такого комбинированного коллектора приведена на рис. 2.

Поперечные поля в фильтре Вина формируются за счет электростатических пластин 7 и поперечного магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами. Отклоненный вторичный пучок осаждается на диафрагму 10. Охлаждаемая поверхность 1 принимает первичный электронный пучок и должна рассеивать до 15 кВт тепловой энергии при токе в коллекторе 3 А (режим максимального тока).

Супрессорный электрод 4 служит для формирования электростатического барьера, запирающего низкоэнергетические вторичные электроны внутри коллектора. Потенциал супрессора выбирается близким к потенциалу катода. В области супрессора первичный пучок хоть и сильно тор-

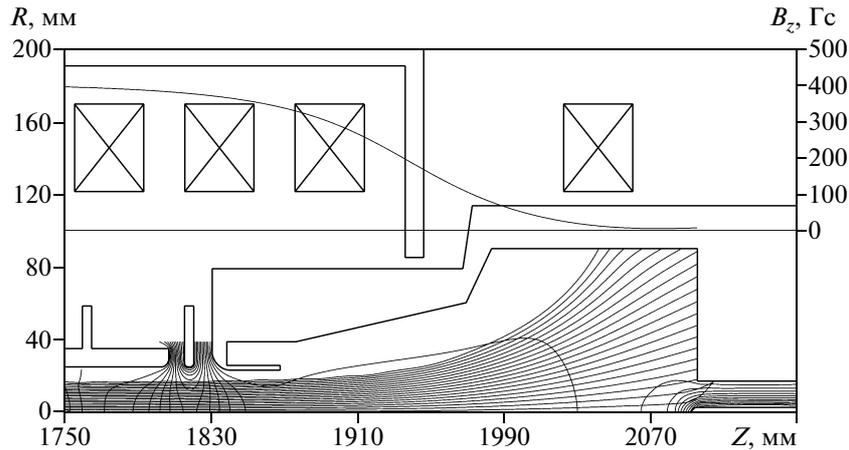


Рис. 3. Внутренняя поверхность коллектора и супрессор. Показаны траектории электронов основного пучка, эквипотенциали с шагом 100 В, распределение магнитного поля на оси.

мозится, но проходит далее, а вторичные электроны, потерявшие часть энергии при взаимодействии с поверхностью коллектора, отражаются обратно в коллектор. Приколлекторный электрод 5 также участвует в формировании электростатического барьера, при больших токах пучка (~1 А) его потенциал выбирается равным потенциалу коллектора, при уменьшении тока этот потенциал выгоднее уменьшить. Все потенциалы создаются источниками, расположенными в высоковольтном терминале, находящимся под потенциалом катода.

Последняя катушка коллектора 2 включена противоположно по отношению к остальным катушкам продольного магнитного поля, вместе с магнитной диафрагмой 3 она задает резкий спад магнитного поля внутри коллектора. При этом формируется магнитный барьер, отражающий часть вторичных электронов с большой поперечной энергией. Ослабление магнитного поля также расширяет пучок, плотность тока в нем уменьшается, что препятствует локальному перегреву поверхности коллектора. Катушки продольного магнитного поля имеют следующие параметры: внутренний радиус 12 см, внешний радиус 17 см, толщина катушек 4 см, количество витков 970, максимальный ток до 2.7 А, период катушек в регулярной части 6 см. Результаты расчета коллектора, выполненные при помощи комплекса программ UltraSAM [13], приведены на рис. 3.

Отметим, что для корректной работы фильтра Вина коэффициент вторичной эмиссии коллектора должен быть порядка 10^{-3} , что вполне достижимо для аксиально-симметричного коллектора. Коллектор также должен удовлетворять еще нескольким требованиям: во-первых, первеанс коллектора должен быть достаточно велик, чтобы принять максимальный ток при минимальном напряжении коллектора. В противном случае потре-

буется передача большой мощности в высоковольтный терминал, что сопряжено с существенными техническими сложностями. Расчеты показали, что первеанс коллектора при полностью открытом супрессоре составляет от 13 до 15 $\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ в зависимости от радиального распределения плотности тока в электронном пучке, что вполне достаточно для данной установки. Во-вторых, конструкция коллектора должна обеспечивать снятие значительной тепловой мощности. В рассматриваемой установке внутренняя поверхность коллектора охлаждается трансформаторным маслом по внутренним трубкам.

СТЕНД ПУШКА-КОЛЛЕКТОР

Исследование составного фильтра проводилось на специализированном стенде пушка-коллектор, схема которого представлена на рис. 4. Создаваемый в электронной пушке 2 пучок проходил через дрейфовый промежуток 3 и попадал в комбинированный коллектор 6. Вакуум внутри коллектора обеспечивался ионным насосом 7. Магнитное поле в области пушки и области фильтра Вина составляло около 500 Гс, в дрейфовом промежутке – около 650 Гс.

Для измерения токов потерь за фильтром установлена керамическая вставка со специальным анализирующим электродом (позиция 11 на рис. 2). Электрод установлен в области локального минимума магнитного поля, а его проходной диаметр меньше, чем диаметр диафрагмы фильтра Вина. Таким образом, этот электрод является наиболее узким участком всей электронно-оптической системы стенда; вторичные электроны, прошедшие через фильтр Вина и отклоненные в нем, с большой вероятностью попадают именно на данный электрод.

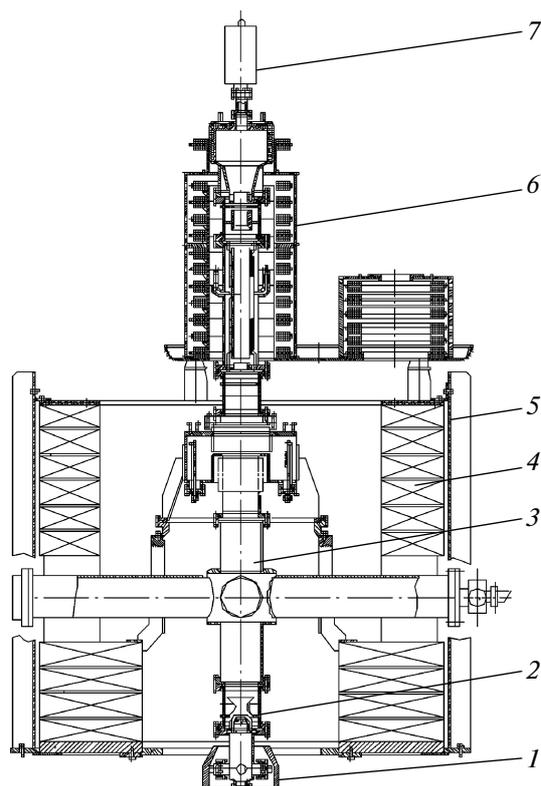


Рис. 4. Схема стенда пушка-коллектор. 1 – магнитный концентратор электронной пушки, 2 – электронная пушка, 3 – дрейфовый промежуток, 4 – катушки магнитной системы пушки и дрейфового промежутка, 5 – магнитный экран, 6 – комбинированный коллектор, 7 – вакуумный насос.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОЛЛЕКТОРА В ПРЯМОЙ СИСТЕМЕ

Первоначально режимы работы коллектора исследовались на прямой системе при отключенном фильтре Вина. В этом случае стенд является прямой аксиально-симметричной системой, в которой реализуется обратимая динамика электронов. Данный режим эквивалентен режиму, используемому на охладителях с электростатической компенсацией дрейфа. Электрон, отраженный от коллектора, осциллирует между пушкой и коллектором, пока не поглотится в последнем или не уйдет на стенки вакуумной камеры. На рис. 5 показаны токи потерь в зависимости от различных режимов работы коллектора. Экспериментальные данные приведены для потенциала коллектора 1.3 кВ для лучшей демонстрации эффектов, связанных с пространственным зарядом. Рабочее значение потенциала коллектора лежит в диапазоне от 2.5 до 5 кВ.

Анализ рисунка показывает, что большое количество вторичных электронов сосредоточено в области низких энергий (порядка 100 эВ), что обуславливает быстрый рост тока потерь в обла-

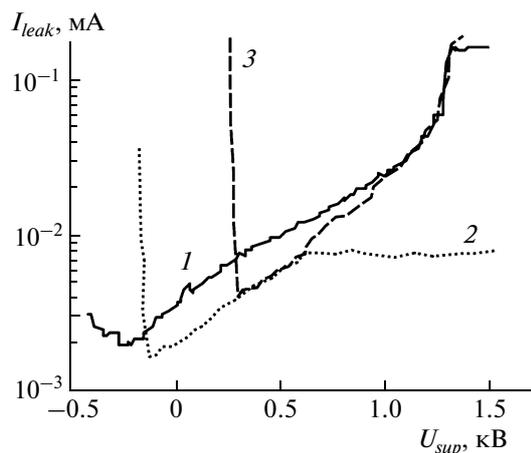


Рис. 5. Зависимость тока потерь I_{leak} от потенциала супрессорного электрода U_{sup} для различных режимов работы. Фильтр Вина отключен. Режим 1 – приколлекторный электрод соединен с коллектором; режим 2 – приколлекторный электрод имеет потенциал, равный половине потенциала коллектора; режим 3 – супрессор соединен с коллектором, запирающее напряжение подается на приколлекторный электрод. Ток первичного пучка 210 мА, потенциал коллектора 1.3 кВ.

сти $U_{sup} \approx U_{coll}$. Ток потерь монотонно уменьшается при приближении потенциала супрессора к потенциалу катода и возрастании потенциально-го барьера для вторичных электронов. После достижения некоторого минимального значения ток потерь начинает резко расти из-за отражения от барьера первичных электронов.

Использование приколлекторного электрода в качестве супрессора (режим 3) не несет особых выгод. Видно, что в основном ток потерь в этом случае совпадает с током режима 1 и лишь вблизи точки запирания существенно меньше. Однако рабочая область данного режима является довольно узкой. Так как приколлекторный электрод гораздо более протяжен, чем истинный супрессор, то и эффект запирания тока основного пучка на нем более подчеркнут.

Промежуточными свойствами обладает режим 2. За счет дополнительного уменьшения потенциала приколлекторного электрода большая часть вторичных электронов запирается сразу, а удержание оставшихся может быть подрегулировано за счет U_{sup} . При этом область рабочих параметров для U_{sup} не такая узкая, как в режиме 3. Недостатком такого режима является ограничение максимального тока величиной 1.8 А, связанное с недостаточной пропускной способностью приколлекторного электрода при пониженном напряжении.

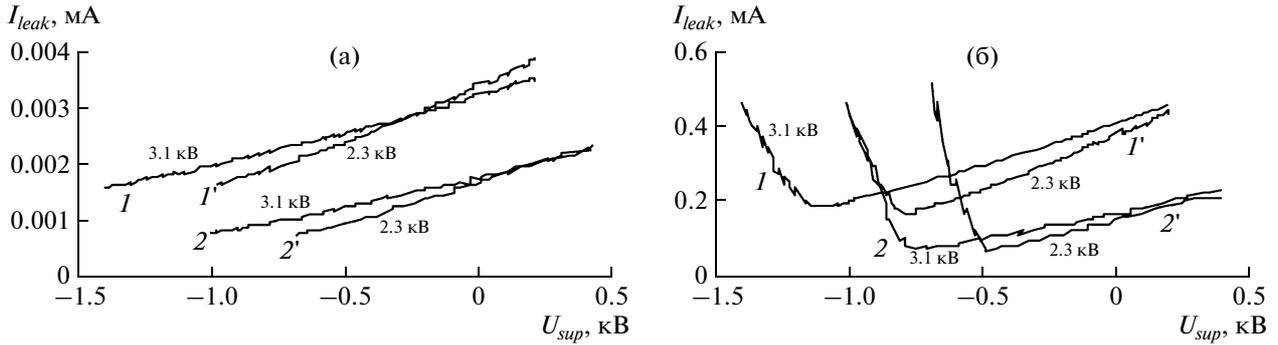


Рис. 6. Зависимость тока потерь I_{leak} от напряжения супрессора U_{sup} при различных напряжениях на коллекторе (цифры у кривых) для составного коллектора (а) и коллектора (б). I, I' – приколлекторный электрод находится при потенциале коллектора; $2, 2'$ – при половине потенциала коллектора. Ток первичного пучка 220 мА.

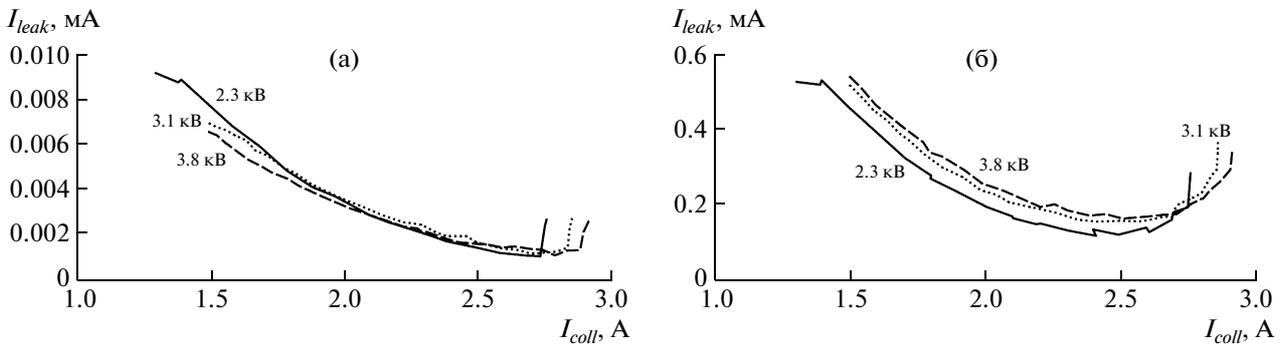


Рис. 7. Зависимость тока потерь I_{leak} от тока в катушке коллектора I_{coll} при различных значениях напряжения на коллекторе (цифры у кривых) для составного коллектора (а) и коллектора (б). Ток первичного пучка 220 мА.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОСТАВНОГО КОЛЛЕКТОРА

При включении фильтра Вина появляется возможность как непосредственного измерения эффективности коллектора, так и оценки работы фильтра Вина. Ток потерь, приходящийся на вакуумную камеру фильтра Вина, дает величину потока электронов, отраженных от коллектора и отклоненных системой полей фильтра Вина. Измерение тока, попадающего на анализирующий электрод, позволяет оценить эффективность составного коллектора.

На рис. 6 показана зависимость тока потерь от величины электростатического барьера, создаваемого супрессором. Видно, что добавление дополнительного барьера за счет приколлекторного электрода положительно сказывается на эффективности коллектора. Максимальной эффективности коллектор достигает вблизи порога образования виртуального катода, когда совместное действие приколлекторного электрода и пространственного заряда наиболее полно реализует электростатическое запираение вторичных электронов. Дальнейшее увеличение запирающего потенциала приводит к срыву рекуперации. Ми-

нимальные значения коэффициента вторичной эмиссии коллектора $5 \cdot 10^{-4} - 10^{-3}$, а для составного коллектора – до $5 \cdot 10^{-6}$.

На рис. 7 показана зависимость тока потерь от величины магнитного барьера на входе в коллектор. Величина барьера регулируется током в последней катушке. Видно, что существует оптимум в районе 2.5 А. Величина оптимума слабо зависит от напряжения на коллекторе. При больших значениях тока происходит скачкообразное ухудшение работы коллектора, а именно: увеличение тока в катушке на 50–100 мА относительно максимальных значений на рис. 7 приводит к срыву рекуперации. При этом электроны первичного пучка начинают отражаться от области сильного инверсного поля, не доходя до поверхности коллектора (см. рис. 8). С уменьшением напряжения на коллекторе предельное значение тока в катушке слабо уменьшается. Так, для режима с $U_{coll} = 1.3$ кВ отражение первичных электронов происходит уже при токе 2.5 А (см. соответствующий график на рис. 9).

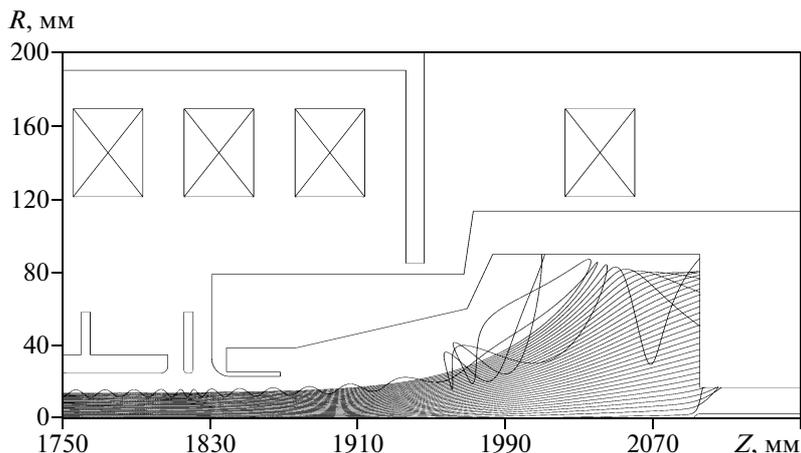


Рис. 8. Отражение электронов первичного пучка при сильном токе в катушке коллектора.

РАБОТА ФИЛЬТРА ВИНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПОТЕНЦИАЛАХ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ

Вакуумная камера фильтра Вина и диафрагма в нем (электроды 9 и 10 на рис. 2) соединены вместе и имеют отдельный источник питания, поскольку они должны принимать ток вторичных электронов из коллектора. В ходе экспериментов был исследован режим, когда потенциал этих электродов был равен потенциалу коллектора. Основная идея этого режима – отсутствие ограничения на ток потерь из коллектора. Так как источник питания коллектора все равно принимает полный ток, то допустимый поток вторичных электронов на эти электроды может быть любым. С точки зрения движения электронов в фильтре предполагалось, что никаких проблем быть не должно. Средняя точка конденсатора может находиться под любым потенциалом W и доускорять пучок до установленной энергии. В реальности все

попытки реализации этого режима приводили к существенному ухудшению эффективности системы “коллектор + фильтр Вина”.

На рис. 10 показаны токи потерь в системе “коллектор + фильтр Вина” при различных потенциалах ΔU между вакуумной камерой и средней точкой конденсатора. Режим $\Delta U = 0$ соответствует стандартному подключению. В варианте $\Delta U = 1.8$ кВ вакуумная камера соединялась с коллектором. В этом случае потери сильно возрастают, и большой ток пучка в режиме рекуперации получить не удастся. Таким образом, для нормальной работы фильтра Вина желательно иметь потенциал вакуумной камеры максимально близким к потенциалу средней точки электростатических пластин. Возможное объяснение этому – искривление траектории первичного пучка при его

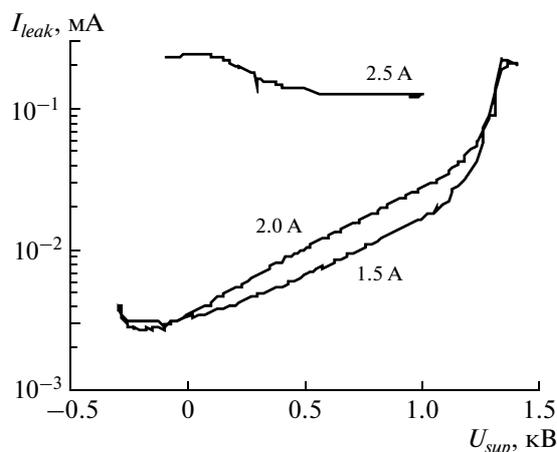


Рис. 9. Зависимость тока потерь от потенциала супрессора для различных значений тока в катушке коллектора (цифры у кривых). $U_{coll} = 1.3$ кВ.

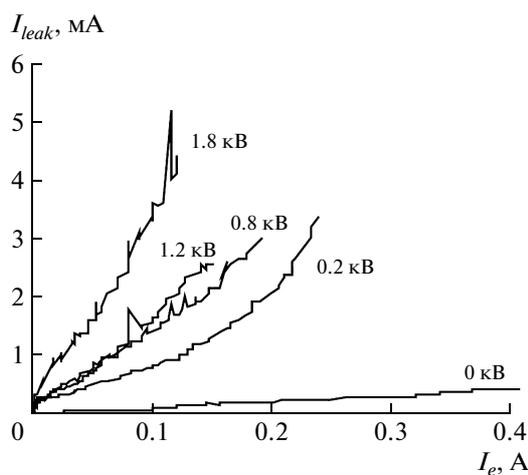


Рис. 10. Токи потерь в системе, когда коллектор соединен с камерой фильтра Вина при различных потенциалах ΔU между вакуумной камерой и средней точкой конденсатора (цифры у кривых).

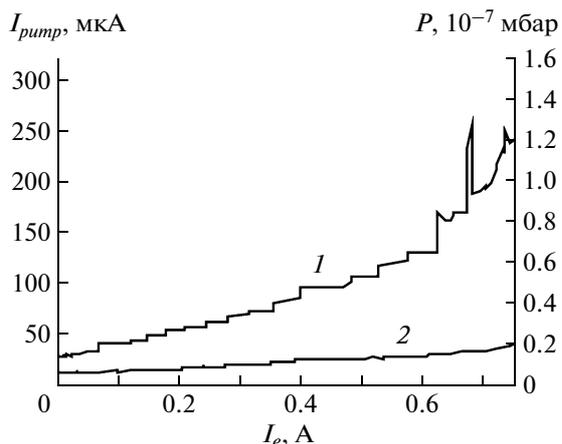


Рис. 11. Оценка вакуума по изменению тока I_{pump} магниторазрядного насоса для режимов: 1 – деградации титановой пленки в вакуумном насосе; 2 – напыления новой пленки. Первичные данные – ток с магниторазрядных насосов. Давление пересчитано по формуле $1/2000$ мбар.

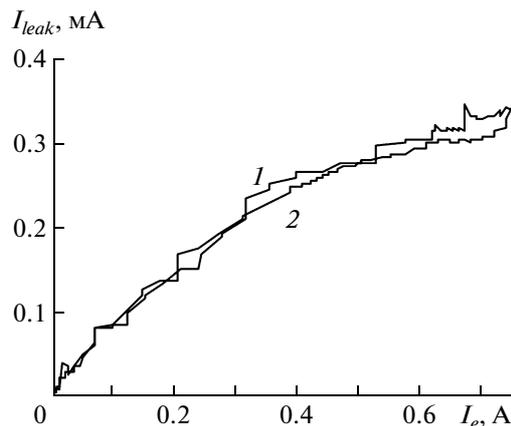


Рис. 12. Ток потерь в зависимости от величины тока I_e электронного пучка для режимов: 1 – деградации титановой пленки в вакуумном насосе; 2 – напыления новой пленки.

движении на входе и выходе из системы электростатических пластин.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОЛЛЕКТОРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВАКУУМА

В работе [14] среди эффектов, ответственных за ток потерь из коллектора, называются вакуумные условия. Для проверки этого утверждения нами были выполнены две серии измерений зависимости тока потерь и качества вакуума от тока электронного пучка. Одни измерения проводились после долгого периода работы, когда титановая пленка в вакуумном насосе уже деградировала, другие – сразу после напыления титановой пленки. Вакуум оценивался по току в магниторазрядных насосах типа ПВИГ, зависимость которого от тока пучка представлена на рис. 11. При деградации пленки включение электронного тока приводило к ухудшению первоначального вакуума в 5–6 раз (кривая 1), при наличии свежей титановой пленки вакуум ухудшался значительно слабее (кривая 2). Ток потерь представлен на рис. 12. Видно, что вакуумные условия практически не влияют на токи утечек, несмотря на то что вакуумные условия различаются в несколько раз.

СОСТАВНОЙ КОЛЛЕКТОР. АКСИАЛЬНО-НЕСИММЕТРИЧНЫЙ СЛУЧАЙ

Как уже упоминалось ранее, поток электронов из составного коллектора может быть уменьшен за счет использования поперечного магнитного поля в области коллектора. Электроны, отразившиеся от поверхности коллектора, не могут вернуться по той же траектории и как бы “запутываются” в силовых линиях магнитного поля, оставаясь

внутри коллектора. Конструкция рассматриваемого коллектора позволяет реализовать данный режим за счет удаления одной из половинок магнитной диафрагмы. В этом случае аксиальная симметрия магнитных силовых линий нарушается, и силовые линии магнитного поля смещаются в одну сторону (рис. 13).

На рис. 14 показаны в сравнении токи потерь для двух режимов работы коллектора. Анализ графиков показывает, что магнитный поворот практически не оказывает влияния на эффективность коллектора, но эффективность работы составного коллектора резко возрастает.

Такой результат можно объяснить тем, что исследуемый в этой работе коллектор не был изначально рассчитан для работы с поворотом внутри. Для коллектора с поворотом важным условием эффективного подавления потока вторичных электронов является их смещение на величину, примерно равную сумме значений радиусов пучка и входного отверстия в коллектор [10]. Смещение как основного, так и вторичного пучка происходит за счет центробежного дрейфа при движении в поворотном поле коллектора.

Для несимметричного режима работы коллектора смещение пучка (которое равно смещению основного пучка плюс смещение вторичного) примерно равно 1.5 см, что при радиусе входного отверстия в коллектор 2.5 см означает, что только малая часть вторичного пучка не пройдет в отверстие, и эффективность коллектора улучшится незначительно. Однако, поскольку пучок все же отклоняется, то при совпадении направления отклонения в коллекторе с направлением отклонения в фильтре Вина пучок сильнее отклоняется на вторичный коллектор, что повышает эффективность составного коллектора.

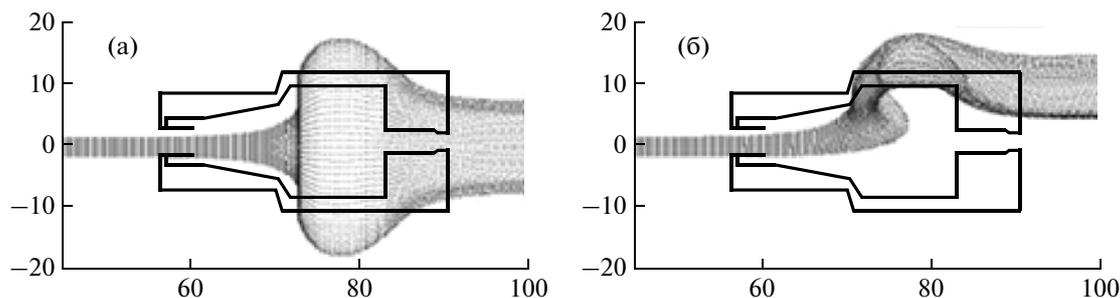


Рис. 13. Распределение силовых линий магнитного поля в аксиально-симметричном (а) и несимметричном (б) случаях.

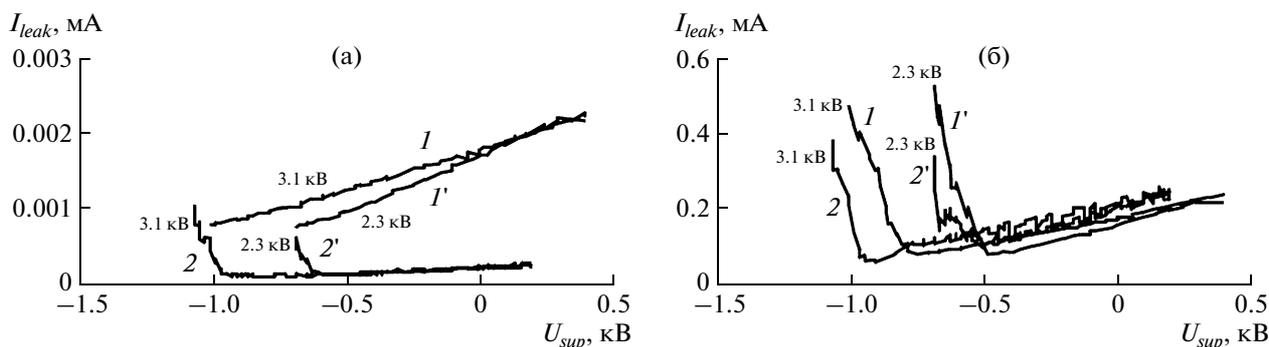


Рис. 14. Зависимость тока потерь от потенциала супрессора в случае аксиально-симметричного (I , I') и несимметричного (2 , $2'$) магнитных полей при различном напряжении коллектора (цифры у кривых) для составного коллектора (а) и коллектора (б). Ток первичного пучка 220 мА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для высоковольтной установки электронного охлаждения был создан и испытан составной коллектор стационарного электронного пучка, состоящий из фильтра Вина и собственно аксиально-симметричного коллектора. В ходе проведенных экспериментов были исследованы различные режимы работы составного коллектора, получен весьма малый, $5 \cdot 10^{-6}$, коэффициент вторичной эмиссии коллектора. Столь малый коэффициент вместе с высоким первенсом, относительно небольшими размерами и простотой изготовления и настройки позволяет утверждать, что такой коллектор является оптимальным вариантом для использования в высоковольтной установке электронного охлаждения.

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. Dietrich J., Kamerdzhiiev V., Bryzgunov M.I. et al. // Proc. COOL'09. Lanzhou, China. 2009. P. 178.
2. Alinovsky N., Batrakov A.M., Bedareva T.V. et al. // Proc. COOL'11. Alushta, Ukraine. 2011. P. 37.
3. Скринский А.Н., Пархомчук В.В. // ЭЧАЯ. 1981. Т. 12. Вып. 3. С. 557.
4. HESR electron cooler. Design study. The Svedberg laboratory Uppsala University. Uppsala, 2009.
5. Prost L.R., Shemyakin A. // AIP Conference Proc. COOL'05. Galena, USA, 2005. V. 821. P. 391.
6. Sharapa A.N., Shemyakin A.V. // Nucl. Instrum. and Methods. 1994. V. A351. P. 295.
7. Bocharov V., Bublely A., Boimelstein Yu. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2004. V. A532. P. 144.
8. Bublely A., Parkhomchuk V., Reva V. et al. // Proc. RuPAC'06. Novosibirsk, Russia, 2006. P. 25.
9. Sharapa A., Shemyakin A., Nagaitsev S. // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. V. A417. P. 177.
10. Prost L.R., Shemyakin A. // Proc. PAC'05. Knoxville, USA, 2005. P. 2387.
11. Мешков И.Н., Салимов Р.А., Файнштейн В.Г. // ЖТФ. 1973. Т. 43. Вып. 8. С. 1782.
12. Ivanov A.V., Bryzgunov M.I., Bublely A.V. et al. // Proc. RuPAC'10. Protvino, Russia, 2010. P. 233.
13. Иванов А.В., Тунов М.А. // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2008. Т. 3. Вып. 1. С. 56.
14. Боссер Ж., Быковский В.Ф., Лей Р. и др. Препринт 91-25. Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 1991.