



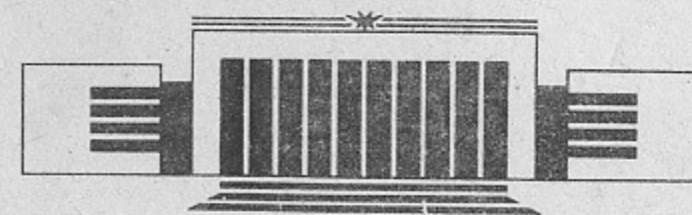
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН

44

И.Н. Мешков, В.Н. Поляков,
А.В. Смирнов, И.А. Селезнев, Е.М. Сыресин

КОЛЛЕКТОР ТИПА ЦИЛИНДРА ФАРАДЕЯ
С ТРАНСПОРТИРОВОЧНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

ИЯФ 93-79



НОВОСИБИРСК

Введение

В системах электронного охлаждения рекуперация электронного пучка высокой мощности представляет собой одну из важных задач [1, 2]. Проблемы, которые возникают при проектировании и изготовлении коллекторов, связаны с необходимостью увеличения первеанса коллектора и уменьшения мощности, выделяемой в рекуператоре. Чтобы обеспечить возможность получения вакуума $10^{-10} \div 10^{-11}$ Торр, эффективность рекуперации электронного пучка должна быть не хуже чем 10^{-4} . Для интенсивных электронных пучков необходимо иметь высокопервеансный коллектор. В системе электронного охлаждения LEAR для пучка с энергией до 35 кэВ, током до 3 А используется коллектор [3] с первеансом $P = 20 \cdot 10^{-6} \text{ А/В}^{3/2}$ и эффективностью захвата $\Delta I/I \leq 10^{-4}$. Мощность, рассеиваемая в коллекторе, составляет примерно 10 кВт.

Для проектируемой системы электронного охлаждения К-4, К-10 с током до 5 А и энергией до 100 кэВ использование коллектора с таким первеансом приведет к увеличению мощности, рассеиваемой в коллекторе, до 20 кВт. Это может привести к ухудшению вакуумных условий в накопителе. Поэтому для накопителя К-4, К-10 предложен новый коллектор [4]. Он имеет некоторые отличия: дополнительный транспортировочный электрод между репеллером и приемной стенкой коллектора рис.1 и магнитный экран, который близко подходит к области пучка.

Коллектор состоит из двух секций, первая предназначена для торможения электронного пучка до энергии 30–40 кэВ, вторая используется

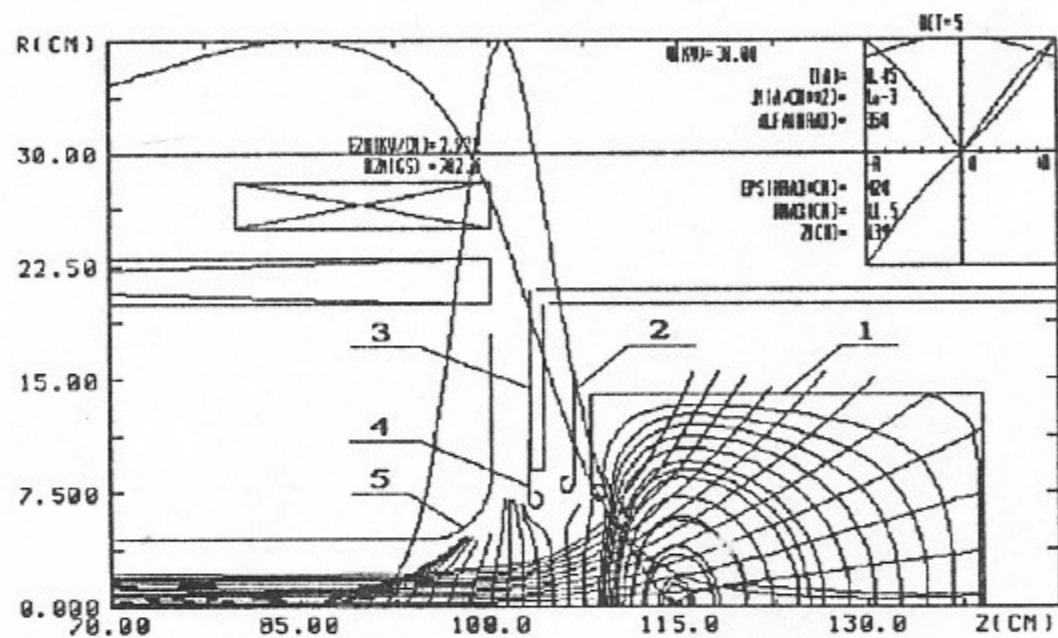


Рис. 1. Схема коллектора. 1) — приемная поверхность, 2) — транспортировочный электрод, 3) — магнитный экран, 4) — репеллер, 5) — вакуумная камера.

непосредственно для рекуперации электронного пучка. Эта секция, выполненная на напряжение 35 кВ, была изготовлена и установлена на стенде в ФТЦ, предназначенном для тестовых испытаний пушки для системы электронного охлаждения LEAR. На стенде были проведены эксперименты по формированию и рекуперации электронного пучка с током до 3 А.

1. Геометрия коллектора и некоторые конструктивные особенности

С целью увеличения первеанса коллектора необходимо, во-первых, организовать более быстрое расширение электронного пучка в коллекторе, чтобы уменьшить влияние объемного заряда на входе в коллектор за счет быстрого спада магнитного поля. Во-вторых, провести электронный пучок более глубоко в коллектор после того, как он затормозился репеллером. С этой целью между репеллером и приемной стенкой коллектора размещен транспортировочный электрод, потенциал которого более положительный чем потенциал репеллера и приемной стенки коллектора. Установка транспортировочного электрода приводит к необходимости закрыть переднюю стенку коллектора, чтобы вторичные

электроны, выбитые с поверхности коллектора, не могли сесть на него.

В коллекторе использован проходной изолятор. Это связано с возможностью использовать этот коллектор в качестве приемной секции разрабатываемого коллектора для системы электронного охлаждения накопителя К-4, К-10 на энергию 100 кэВ. Однако такая конструкция приводит к тому, что часть вакуумной камеры коллектора во время работы находится под высоким потенциалом.

2. Результаты численного моделирования

Численное моделирование транспортировки и торможения электронного пучка в коллекторе производилось с использованием пакета программ SAM [5].

На рис. 1, 2 видно, что существует область с потенциалом φ_{\min} близким к потенциалу катода. Если потенциал в этой области будет равен потенциалу катода, то произойдет частичное или полное отражение электронного пучка, что не допустимо для нормальной работы коллектора в системе электронного охлаждения.

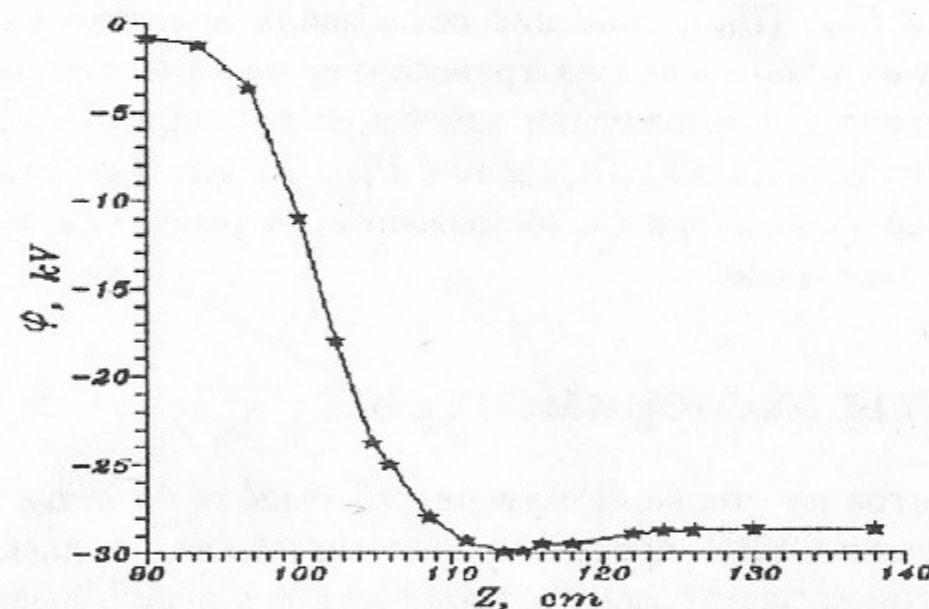


Рис. 2. Потенциал на оси пучка при потенциале катода 30 кВ.

Необходимо выбирать потенциал на электродах таким образом, чтобы всегда было полное токопрохождение. При этом потенциал электростатической пробки φ_{\min} должен быть близок к потенциалу катода. В этом случае можно ожидать наиболее эффективный захват вторичных

электронов. Необходимо заметить, что электростатическая пробка способна эффективно отражать только те вторичные электроны, которые родились глубоко в коллекторе. Вторичные электроны, которые рождаются на боковых стенках коллектора, достаточно близко к выходному отверстию, будут слабо отражаться электростатической пробкой. Для этих электронов должна эффективно работать магнитная пробка.

Вторичные электроны, вылетающие из коллектора, могут ускоряться транспортировочным электродом. Место этого электрода необходимо выбирать таким образом, чтобы в области транспортировочного электрода они были замагниченными и не могли сесть на него. В этом случае эти электроны должны будут отразиться потенциалом репеллера и вернуться в коллектор.

Для того чтобы корректно получить зависимость первеанса коллектора от напряжения на транспортировочном электроде или репеллере, необходимо подбирать напряжение на коллекторе и на репеллере или транспортировочном электроде, таким образом, чтобы потенциал φ_{\min} был примерно постоянным и равным 0.2–0.3 кВ. Для этого необходимо иметь представление о зависимости φ_{\min} от U_{col} , U_{rep} , U_{tr} (рис. 3, 4, 5). Видно что φ_{\min} наиболее сильно зависит от U_{col} (рис. 3). При фиксированном U_{col} и U_{rep} (U_{tr}), значение потенциала в пробке изменяется в зависимости от напряжения на транспортировочном электроде (репеллере). Это говорит о возможности изменения первеанса коллектора за счет изменения напряжения U_{rep} и или U_{tr} . На рис. 6 показаны зависимости первеанса коллектора от напряжения на репеллере и на транспортировочном электроде.

3. Результаты экспериментов

Целью экспериментов на стенде "Рекуператор" было проведение тестовых испытаний пушки CERN, проверка работоспособности коллектора с транспортировочным электродом, возможность его использования для рекуперации электронного пучка с $P = 5 \mu \text{ A/V}^{3/2}$.

Вакуум в стенде без пучка составляет 10^{-9} Торр, с пучком 10^{-8} Торр. Во время экспериментов была получена вольтамперная характеристика пушки (рис. 7). Из рис. 7 видно, что пушка при потенциале управляющего электрода $U_{st} = 0$ имеет первеанс $0.56 \mu \text{ A/V}^{3/2}$. Пушка позволяет формировать пучки с первеансом 0.125 до $5 \mu \text{ A/V}^{3/2}$ и

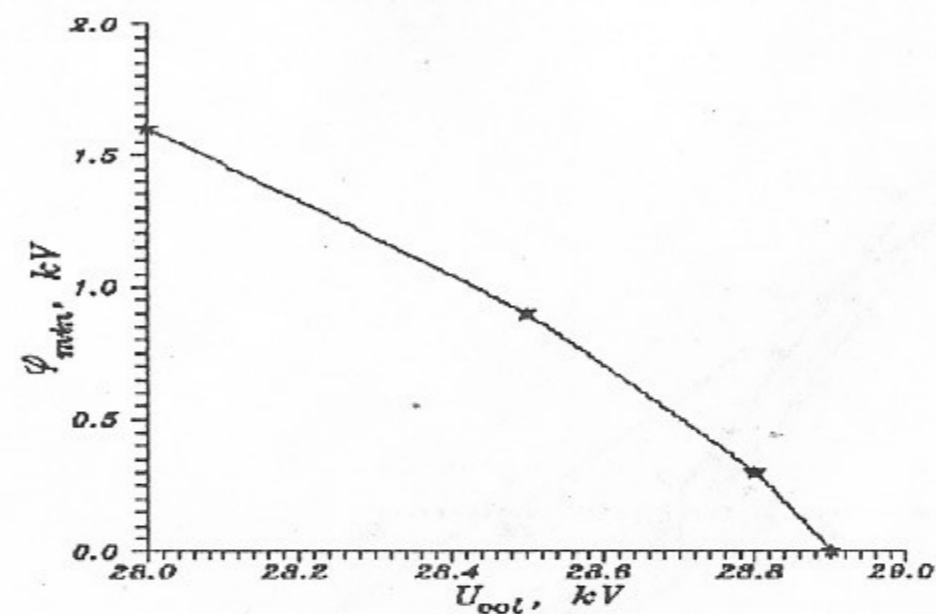


Рис. 3. Зависимость φ_{\min} от потенциала коллектора. $E_b = 30$ кэВ, $I_b = 3$ А, $U_{rep} = 29$ кВ, $U_{tr} = 25$ кВ.

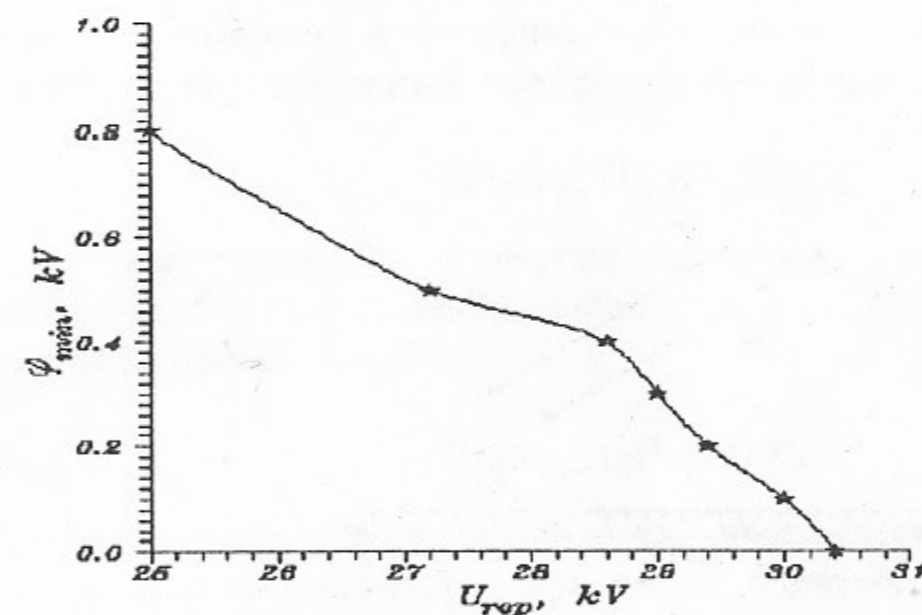


Рис. 4. Зависимость φ_{\min} от потенциала репеллера. $E_b = 30$ кэВ, $I_b = 5$ А, $U_{col} = 29$ кВ, $U_{tr} = 25$ кВ.

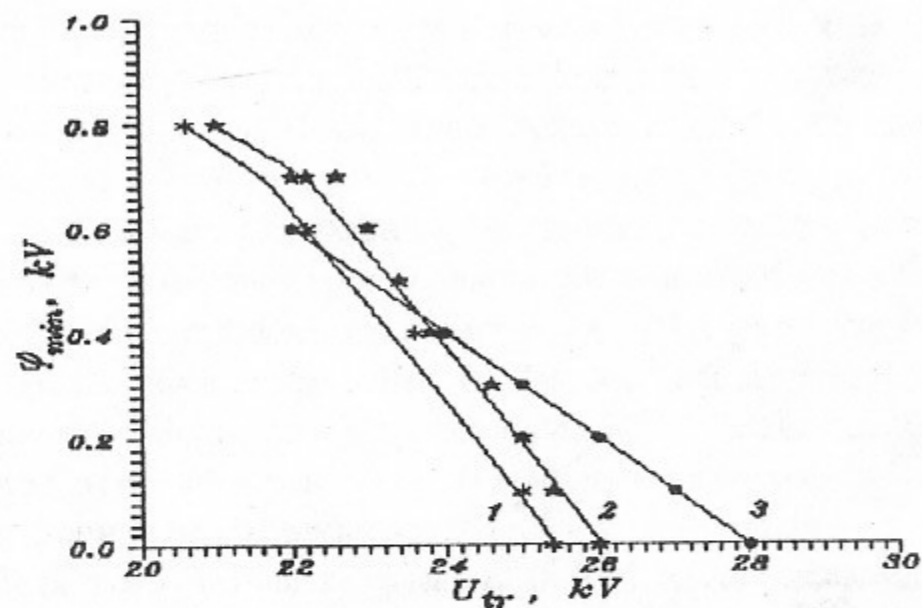


Рис. 5. Зависимость φ_{\min} от потенциала транспортировочного электрода. 1) — $E_b = 30$ кэВ, $I_b = 5$ А, $U_{col} = 28.2$ кВ, $U_{rep} = 29.8$ кВ. 2) — $E_b = 30$ кэВ, $I_b = 5$ А, $U_{col} = 28.2$ кВ, $U_{rep} = 29.4$ кВ. 3) — $E_b = 30$ кэВ, $I_b = 3$ А, $U_{col} = 28.8$ кВ, $U_{rep} = 29.0$ кВ.

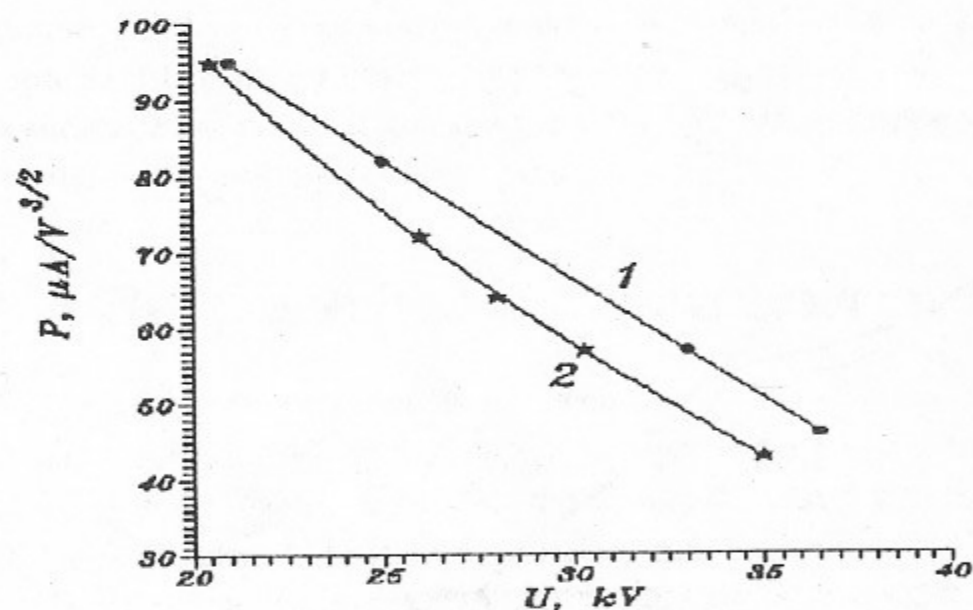


Рис. 6. 1) — зависимость первеанса коллектора от потенциала транспортировочного электрода. $E_b = 30$ кэВ, $I_b = 3$ А, $U_{rep} = 29$ кВ. 2) — зависимость первеанса коллектора от потенциала репеллера. $E_b = 30$ кэВ, $I_b = 3$ А, $U_{tr} = 25$ кВ.

максимальным током до 3.3 А. Во всех режимах работы пушки эффективность рекуперации с использованием коллектора была лучше чем 10^{-4} .

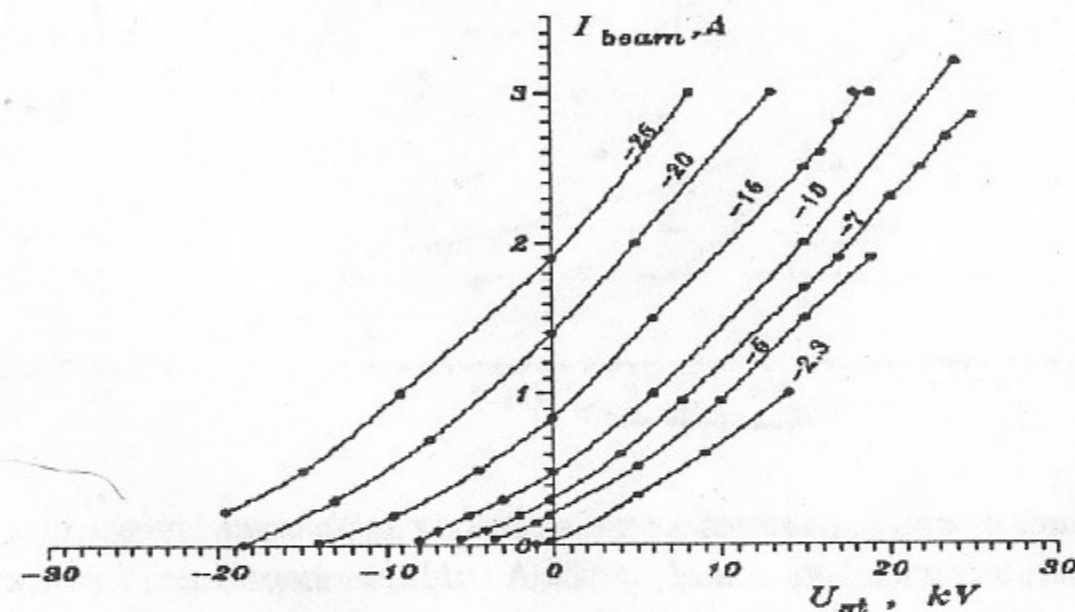


Рис. 7. Вольтамперная характеристика электронной пушки.

Экспериментально было получено, что первеанс коллектора уменьшается с увеличением первеанса пучка при фиксированном токе (рис.8). Это можно объяснить, если принять во внимание, что пучок имеет угловой разброс обусловленный дрейфовой скоростью электронов:

$$\Theta \approx V_{dp}/V_b \propto I/E_b, \quad (1)$$

где I — ток пучка, E_b — энергия электронов в пучке. Минимальный потенциал коллектора, необходимый для того, чтобы принять пучок с таким угловым разбросом, есть

$$U_{col} = E_b \Theta^2 \propto I/E_b, \quad (2)$$

(U_{col} — разность потенциалов между коллектором и пушкой). Кроме того, для эффективной рекуперации первеанс пучка и коллектора должны быть согласованы:

$$P_b(E_b/e)^{3/2} \leq P_{col} U_{col}^{3/2}. \quad (3)$$

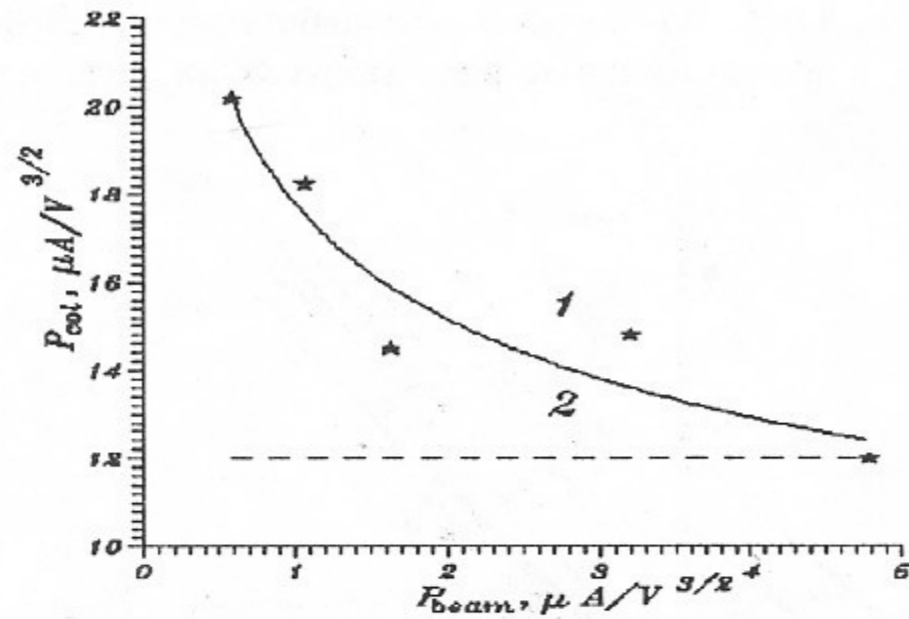


Рис. 8. Зависимость первеанса коллектора от первеанса пучка при фиксированном токе пучка $I = 3$ А. 1) — первеанс коллектора, 2) — критический первеанс.

Отсюда для энергии электронного пучка 7 кэВ и первеанса $5 \mu \text{ A/V}^{3/2}$, и с учетом ограничения максимального напряжения источника питания коллектора равного 4 кВ, получим минимально необходимый (критический) первеанс коллектора $(P_{col})_{crit} = 12 \mu \text{ A/V}^{3/2}$. Подставив выражение (2) в формулу (3), получим зависимость первеанса коллектора от первеанса и тока пучка:

$$P_{col} \propto 1/IP_b, \quad (4)$$

что согласуется с экспериментальными данными (рис.8).

На рис.9 представлена зависимость U_{col} , $\Delta I/I$, тока пучка от напряжения между катодом и управляющим электродом при фиксированной энергии электронного пучка $E_b = 7$ кэВ. Зависимость тока потерь имеет минимум при некотором токе пучка, влево-вправо от которого потери возрастают. Левая ветвь кривой связана, по-видимому, с отсутствием или малой эффективностью электростатической пробки при низком токе.

Правая ветвь, при токе пучка, большем 2 А, объясняется уменьшением первеанса коллектора и его приближением к критическому значению (рис. 8).

Этот коллектор предполагается использовать в качестве приемной секции рекуператора системы электронного охлаждения К-4, К-10 [4],

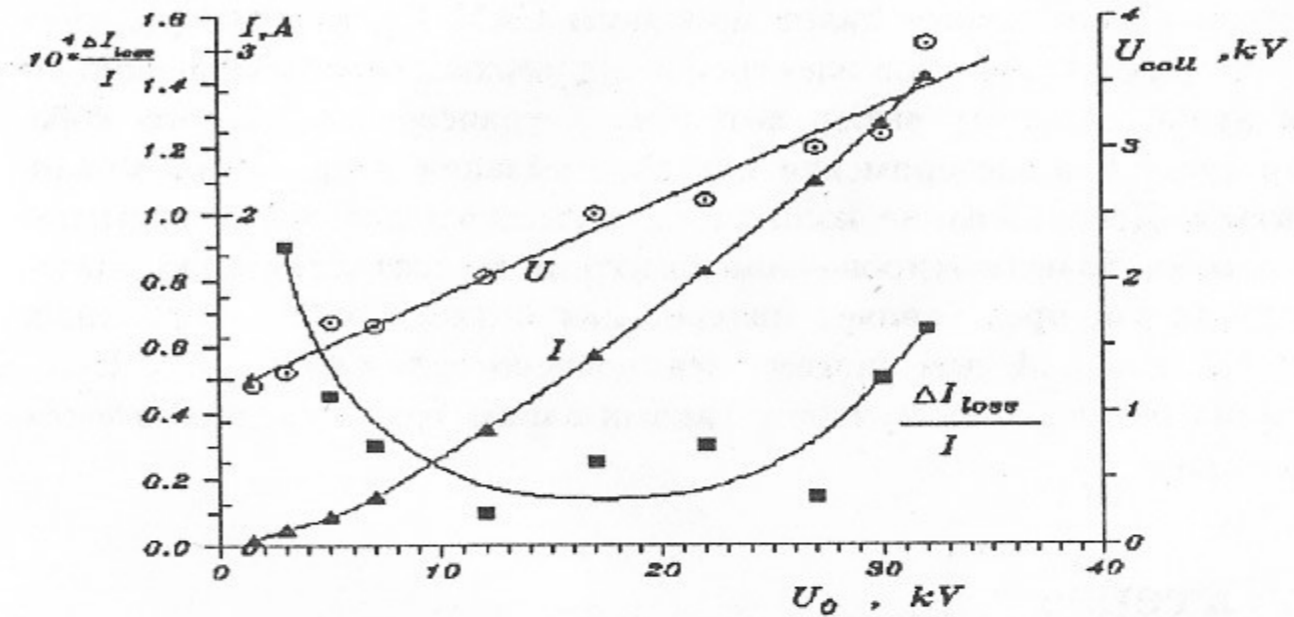


Рис. 9. Зависимость U_{col} , $\Delta I/I$ и тока пучка от напряжения между катодом и управляющим электродом при фиксированной энергии электронного пучка $E_b = 7$ кэВ.

где максимальный ток электронного пучка 5 А. Пользуясь результатами, описанными выше, можно оценить минимальное значение энергии электронного пучка, начиная с которой этот коллектор может принимать такой ток. Поскольку критический первеанс коллектора не зависит от тока и первеанса пучка, то произведение тока пучка и его первеанса есть константа (см(4)). Из эксперимента следует, что она равна $15 \mu \text{ A}^2/\text{V}^{3/2}$. Отсюда для тока 5 А получаем максимальный первеанс пучка $P = 3 \mu \text{ A/V}^{3/2}$, что соответствует энергии 14 кВ, при токе 5 А.

4. Вывод

В результате экспериментов измерен первеанс коллектора, который уменьшается от 20 до $12 \mu \text{ A/V}^{3/2}$ с ростом первеанса пучка. Экспериментально измеренный первеанс меньше расчетного. Это связано с тем, что во время работы не удалось поднять потенциал транспортировочного электрода выше потенциала коллектора, так как только при их равенстве удавалось минимизировать ток потерь. Если транспортировочный электрод имеет положительный по отношению к коллектору потенциал, то можно поднимать первеанс коллектора, однако это приводит к увеличению тока потерь. При математическом моделировании

коллектора использовался пакет программ SAM [5], который не учитывает вторичную эмиссию электронов с поверхности, одновременно со счетом пучка. Поэтому выбор потенциала транспортировочного электрода в счете и в эксперименте при минимизации тока потерь может отличаться. Использование коллектора с высоким положительным потенциалом на транспортировочном электроде и, соответственно, высоким первеансом, представляет интерес для интенсивных электронных пучков с током 5 А для систем электронного охлаждения К-4, К-10. Реализация рекуперации пучков с такими параметрами предполагается в дальнейшем.

5. Литература

1. В.И.Куделайнен, И.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, Р.А.Салимов, Ф.Н.Скринский, В.Г. Файнштейн. *Глубокое торможение электронного пучка в системе с продольным магнитным полем*. ЖЭТФ, 1976, N46, с.1678.
2. В.И.Кокулин, И.Н.Мешков, А.Н.Шарапа. *Преобразование цилиндрического пучка в трубчатый в системах с продольным магнитным полем*. Препринт ИЯФ 79-90, 1979.
3. Ж.Боссер, В.Ф.Быковский, Р.Лей, И.Н.Мешков, А.И.Рогозин, В.Н.Поляков, И.А. Селезнев, В.Б.Синицкий, А.В.Смирнов, Е.М.Сырессин, Ж.Транквиль, В.П.Фунтиков. *Новый коллектор электронного охлаждения для установки ЛИР*. Препринт ИЯФ 91-25, 1991; NIM A311 (1992) 456-471
4. И.Н.Мешков, С.А.Агишев, В.Ф.Быковский, В.Н.Поляков, И.А.Селезнев, А.В.Смирнов, Е.М.Сырессин. *Система электронного охлаждения комплекса К4 - К10*. В кн. *Накопительный комплекс тяжелых ионов К4 - К10*. Дубна, 1992.
5. М.А.Тиунов, В.М.Фомель, В.П.Яковлев. *SAM — интерактивная программа для расчета электронных пушек на мини ЭВМ*. Препринт ИЯФ 89-159, 1989.

И.Н. Мешков, В.Н. Поляков,
А.В. Смирнов, И.А. Селезнев, Е.М. Сырессин

Коллектор типа цилиндра Фарадея
с транспортировочным электродом

Ответственный за выпуск С.Г. Попов

Работа поступила 17 мая 1993 г.

Подписано в печать 20.09 1993 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 0,8 печ.л., 0,7 уч.-изд.л.

Тираж 150 экз. Бесплатно. Заказ N° 79

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротопринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.