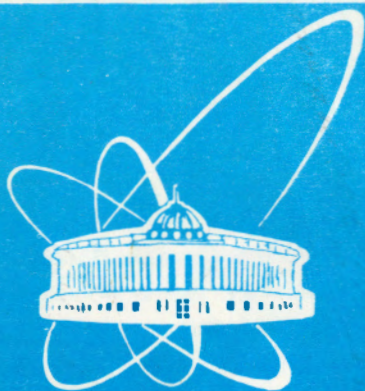


94-192



Объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

P13-94-192

С.А.Корнев

ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ ДИОДНОГО ТИПА
С КАТОДОМ И АНОДОМ
ИЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

1994

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время интенсивно ведутся разработки простых и эффективных электронных источников со взрывоэмиссионными катодами. Это связано с их широким применением в современных технологиях и ускорительной технике.

В данной работе рассматриваются импульсные источники электронов, которые предназначены для формирования микросекундных электронных пучков при напряжении на диоде 100-600 кВ, низкоэнергетичных пучков электронов с энергией 10-25 кэВ и пучков электронов с высокой плотностью мощности, а также метод измерения критических токов высокотемпературных сверхпроводников с помощью импульсных сильноточных электронных пучков.

1. АНАЛИЗ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ СО ВЗРЫВОЭМИССИОННЫМИ КАТОДАМИ

В источниках электронов диодного типа широко используются взрывоэмиссионные катоды для получения сильноточных пучков [1].

Однако, электронные источники со взрывоэмиссионными катодами имеют определенные недостатки, которые связаны со свойствами катодной плазмы.

Один из них - ограничение допустимой длительности импульса тока t пучка электронов из-за большой продольной скорости катодной плазмы, приводящей к быстрому закорачиванию диодного промежутка. Для многих материалов инициатора катодной плазмы величина продольной скорости катодной плазмы равна $V \cong (5-10) \cdot 10^6$ см/с. Отсюда следует, что при расстоянии между анодом и катодом $D = 1$ см, допустимая длительность импульса тока пучка электронов $t = 100-200$ нс. Увеличение зазора между анодом и катодом ограничено условиями зажигания катодной плазмы и законом Чайльда-Ленгмюра.

Основным условием формирования катодной плазмы является превышение напряженности электрического поля E в диоде некоторого порогового значения $E_{\text{пор}}$, которое связано с временем формирования катодной плазмы эмпирической формулой [2]:

$$E = UK/D > E_{\text{пор}} = 10r\rho^{0.5} / t_0, \quad (1)$$

где: U - напряжение на диоде; K - коэффициент усиления электрического поля на катоде; D - расстояние между анодом и катодом; r - начальный радиус эмиттера; ρ - плотность материала катода; t_0 - время формирования микроплазмы

При среднем радиусе микроэмиттера порядка 10^{-3} см, плотности материала катода (графита) $2.25 \text{ г}\cdot\text{см}^3$, времени формирования катодной плазмы 50 нс пороговая напряженность электрического поля составляет $3 \cdot 10^5 \text{ В/см}$. Отсюда следует, что при напряжении на диоде 300 кВ, диодном зазоре 1 см, $V = 5 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ (для графита) допустимая длительность импульса тока пучка электронов составляет 200 нс.

Для увеличения допустимой длительности импульса тока пучка электронов применяются различные методы, некоторые из которых находятся в противоречии с этой формулой. Для планарных диодных источников электронов для получения средней напряженности электрического поля в диоде при больших зазорах применяются инициаторы катодной плазмы на основе углеродно-волоконистых материалов с высоким геометрическим коэффициентом усиления электрического поля [3], диэлектрические включения [4] и др.

Из модифицированного закона Чайльда-Ленгмюра, с учетом продольной скорости катодной плазмы :

$$j = 2.34 \cdot 10^{-6} v^{1.5} / (D - vt_p)^2, \quad (2)$$

где: j – плотность электронного тока;
 U – напряжение на диоде;
 D – расстояние между анодом и катодом;
 V – продольная скорость катодной плазмы;
 t_p – время,

следует, что при увеличении зазора между анодом и катодом величина плотности электронного тока j небольшая и нелинейно возрастает во времени t_p . Однако из условий формирования катодной плазмы следует ограничение на допустимый зазор между анодом и катодом.

Из этого сравнительного анализа видно, что для формирования микросекундных сильноточных электронных пучков необходимо формировать катодную плазму при малой напряженности электрического поля в диоде. Из этого следует, что основная задача при разработке сильноточных микросекундных электронных пушек состоит в выборе материала инициатора катодной плазмы, который позволяет формировать катодную плазму при этих условиях.

С задачей получения микросекундных электронных пучков тесно связана другая задача – формирование низкоэнергетичных пучков электронов, поскольку в ней определяющим фактором является формирование катодной плазмы при напряжении в десятки киловольт.

После открытия высокотемпературных сверхпроводников [5] были начаты исследования их электрических свойств. В работах [6,7], посвященных исследованию электрического пробоя в вакууме между электродами из иттриевых и висмутовых керамик было показано, что средняя напряженность электрического поля при наносекундном времени формирования катодной плазмы составляет $\cong (1-4) \cdot 10^4$ В/см. При этом не наблюдается значительной разницы в этих величинах для керамик, находящихся при температуре жидкого азота или комнатной температуре. Последнее означает, что эти материалы можно использовать в

качестве инициаторов катодной плазмы для различных устройств. Сравнение иттриевой и висмутовой керамики показывает, что формирование катодной плазмы на поверхности висмутовой керамики несколько "облегчено" и пороговая напряженность электрического поля составляет $\cong 1 \cdot 10^4$ В/см.

Из приведенного анализа экспериментальных результатов следует, что использование висмутовой керамики на основе Bi-Sr-Ca-Cu-O в качестве инициатора катодной плазмы позволяет при относительно малых напряжениях на диоде формировать катодную плазму, которая является эмиттером электронов. Первые предварительные экспериментальные результаты по эмиссионным свойствам катодной плазмы для иттриевой керамики были получены автором данной работы в [8].

2. АНАЛИЗ ЭФФЕКТОВ ПРОХОЖДЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ЧЕРЕЗ КОЛЬЦЕВЫЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКИ

На основе результатов экспериментов, выполненных в Японии [9] и в ОИЯИ [10], по самосжатию импульсного сильноточечного пучка электронов в короткой трубке из высокотемпературного сверхпроводника можно сделать выводы об использовании этого эффекта для получения плотных электронных пучков малого сечения. Эффект состоит в следующем. При прохождении скомпенсированного по заряду электронного пучка через трубку из сверхпроводника, находящегося в сверхпроводящем состоянии, в последнем наводятся токи изображения. Токовое взаимодействие тока пучка электронов с токами изображения в сверхпроводящем кольце позволяет осуществить эффективное отражение скомпенсированного по заряду пучка электронов от стенок этого кольца. Величина отражающей силы зависит от проводимости стенок отражающего элемента согласно результатам исследований [11, 12] и является максимальной в случае использования сверхпроводника [13].

Таким образом, использование материалов из высокотемпературных сверхпроводников для отражающих экранов позволяет достаточно эффективно изменять траектории электронов. В результате этого можно осуществить режим работы электронного источника с уменьшением поперечного размера пучка (сжать по сечению пучок) и, следовательно, увеличить плотность мощности пучка электронов.

При этом необходимо отметить, что механизм самосжатия пучка электронов требует своего уточнения, особенно понимания роли эффекта Месснера в процессах самосжатия. Это связано с малыми значениями токов, при которых наблюдается самосжатие пучка электронов собственным магнитным полем. Величины электронных токов лежат на уровне нескольких сот ампер при кинетической энергии несколько сот кэВ. Это вызывает дополнительный интерес, потому что в этом случае фактор

$$v/\gamma = J/17\beta\gamma[\text{kA}] \ll 1, \quad (3)$$

где: $\beta = v/c$ (v - скорость электронов, c - скорость света);
 γ - релятивистский фактор.

В результате этих рассуждений видно, что эффект самосжатия компенсированного электронного пучка с помощью высокотемпературных сверхпроводников может быть использован при разработке сильноточной электронной пушки с высокой плотностью мощности по поперечному сечению.

3. КОНСТРУКЦИИ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ

3.1. Электронная пушка для получения микросекундных и низкоэнергетичных электронных пучков

Конструкция электронной пушки для получения микросекундных

и низкоэнергетичных электронных пучков схематично приведена на рис. 1. Источник электронов состоит из вакуумной камеры, проходного высоковольтного изолятора, катодной ножки с инициатором катодной плазмы из висмутовой керамики на основе Bi-Ca-Sr-Cu-O и анода. Диаметр инициатора катодной плазмы равен 10 мм. Фотография катода представлена на рис. 2. Анодом является металлическая мелкоструктурная сетка с коэффициентом прозрачности $\cong 0.7$.

Вакуумная система собрана на основе парамаслянного насоса ВА-0.5.

Для питания источника электронов использовался генератор импульсного напряжения типа Аркадьева-Маркса с амплитудой напряжения 100 - 600 кВ и длительностью импульса напряжения $\cong 1$ мкс. Для питания источника электронов в режиме низкоэнергетичных электронных пучков использовался генератор с двойной формирующей LC-линией с амплитудой импульса напряжения 10 - 25 кВ и длительностью 500 нс.

Для измерения тока использовались LR - интегрирующие пояса Роговского и цилиндр Фарадея с малоиндуктивным шунтом тока. Поперечное распределение плотности тока исследовалось при помощи винипрозовых пластинок (метод автографов) и двухкоординатного (X - Y) секционированного коллектора. Каждая координатная пластина (X или Y) этого коллектора представляет собой плату из фольгированного стеклотекстолита с окном, в котором имеются золоченые вольфрамовые проволочки диаметром 0.1 мм и шагом 1.5 мм. Координатные пластины располагаются под углом 90° относительно друг друга и устанавливаются на штоке, который имеет возможность плавного перемещения в продольном и азимутальном направлениях. Перемещение в продольном направлении осуществляется при помощи специальной зубчатой передачи шаговым двигателем ШД-5. По числу тактовых импульсов, поступающих на шаговый двигатель, с высокой точностью определяется координата пластин с проволочными коллекторами. Съем сигналов в режиме запоминания осуществляется при помощи специального коммутатора.

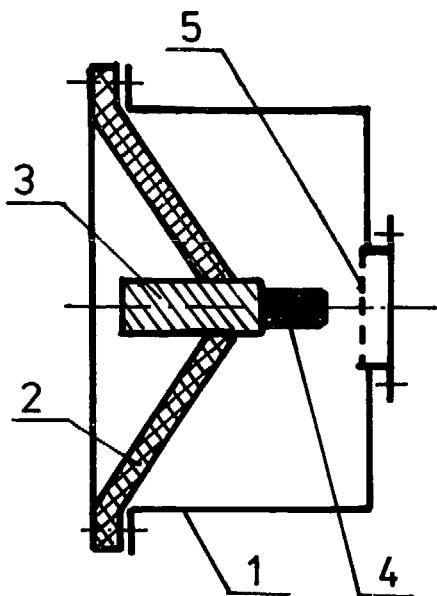


Рис.1. Конструкция электронного источника для получения микросекундных электронных пучков:

1 - вакуумная камера; 2 - высоковольтный изолятор; 3 - катодная ножка; 4 - инициатор катодной плазмы на основе висмутовой керамики; 5 - анод



Рис.2. Фотография катода

3.1.1. Характеристики электронной пушки

Из коммутационных характеристик диода вычислена продольная скорость катодной плазмы для катода из висмутовой керамики, составляющая $2 \cdot 10^6$ см/с. Из этого следует, что для получения микросекундных электронных пучков минимальный зазор между анодом и катодом может составлять 2 см.

Исследование эмиссионных характеристик электронной пушки в микросекундном диапазоне показало следующее. При зазоре между анодом и катодом 2 - 3 см при напряжении до 600 кВ был получен электронный пучок длительностью $\cong 1$ мкс. При этом ограничение длительности импульса тока пучка электронов было связано с параметрами генератора импульсного напряжения. Величина электронного тока удовлетворяет модифицированному закону Чайльда-Ленгмюра. На рис. 3 приведена в.а.х. диода при зазоре между анодом и катодом 2 и 3 см. Из них видно, что этой величины электронного тока достаточно для широкого спектра экспериментов по радиофизике, модификации материалов и др.

Исследование микроструктуры электронного пучка показало, что поперечная неоднородность плотности тока пучка электронов не превышает 5 - 6 %.

Ресурс работы катода на основе висмутовой керамики около 10^5 импульсов в микросекундном диапазоне длительностей.

Вольт-амперные характеристики диода в режиме низкоэнергетичных электронных пучков приведены на рис. 4 при зазоре между анодом и катодом 1 и 2 см. Из них видно, что величина электронного тока удовлетворяет модифицированному закону Чайльда-Ленгмюра и его можно использовать для регулировки плотности тока пучка электронов.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что использование висмутовой керамики в качестве катода позволяет формировать микросекундные и низкоэнергетичные электронные пучки.

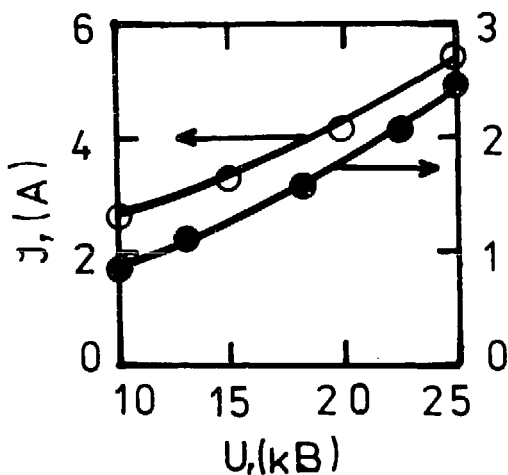


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика диода при зазоре между анодом и катодом 2 см (o) и 3 см (●), длительность импульса тока пучка 1 мкс

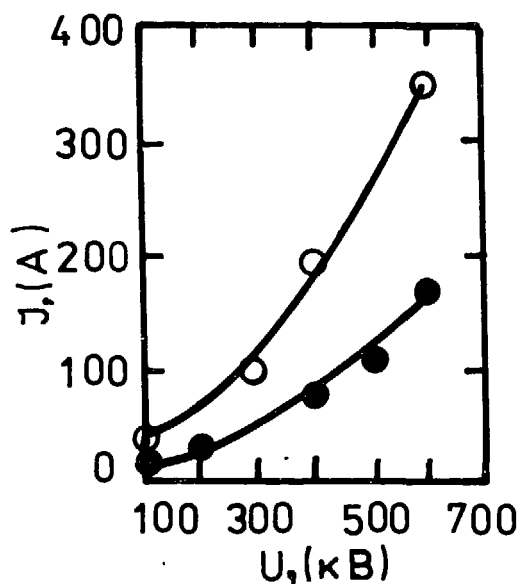


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика диода при зазоре между анодом и катодом 1 см (o) и 2 см (●)

3.2. Электронная пушка для получения сверхплотных электронных пучков

Электронная пушка для получения сверхплотных электронных пучков по поперечному сечению имеет два варианта, которые схематично показаны на рис. 5а,б. В целом, конструкции этих источников электронов аналогичны конструкции источника электронов, описанного в предыдущем параграфе. Катодом является висмутовая керамика, но может быть и другой материал. В первом варианте источника электронов (рис. 5а) анодом является сам высокотемпературный сверхпроводник, который охлаждается до азотной температуры и при работе находится в сверхпроводящем состоянии. Фотография анода и азотного криостата приведена на рис. 6. Во втором варианте источника (рис. 5б) элемент сжатия пучка электронов устанавливается за сетчатым анодом. Элемент сжатия пучка представляет собой кольцо из сверхпроводящей керамики, находящееся в медной трубке и установленное в азотный криостат. На рис. 5б показан элемент сжатия, состоящий из двух колец. Фотография электронной пушки с выносным элементом сжатия представлена на рис. 7.

Для анода и элемента сжатия пучка использовалась иттриевая керамика типа $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$, приготовленная по стандартной методике. Толщина колец в элементе сжатия пучка электронов была равна 2 мм.

Для термометрии используются сопротивления типа ТВО-0.125 номиналом от 10 до 15 ком. В этом заключается отличие от аналогичного термодатчика на основе сопротивлений типа ТВО - 0.125 номиналом 1 ком [14]. Основное преимущество увеличения величины сопротивления состоит в увеличении падения напряжения при том же токе через датчик, который равен 100 мкА. Эксперименты с пучком электронов показали, что наиболее надежными температурными датчиками являются сопротивления ТВО, так как наименее подвержены воздействию пучка электронов и рентгеновскому излучению при посадке электронов на стенки

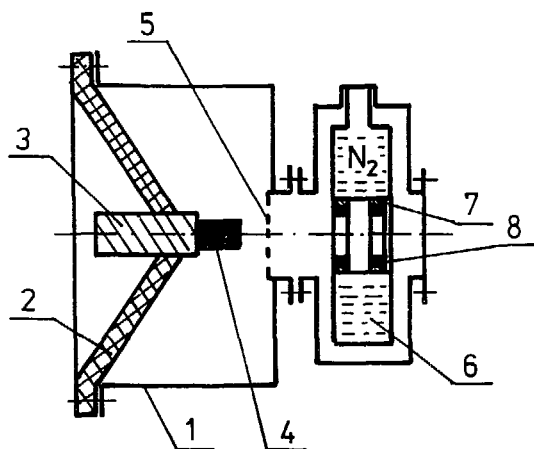
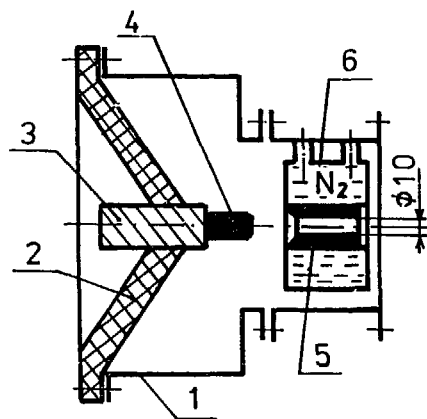


Рис.5 а,б. Конструкции электронных пушек для получения сверхплотных электронных пучков:

1- вакуумная камера; 2 - высоковольтный изолятор; 3 - катодный электрод; 4 - инициатор катодной плазмы; 5 - анод; 6 - азотный криостат; 7 - медная трубка; 8 - кольцо из высокотемпературного сверхпроводника

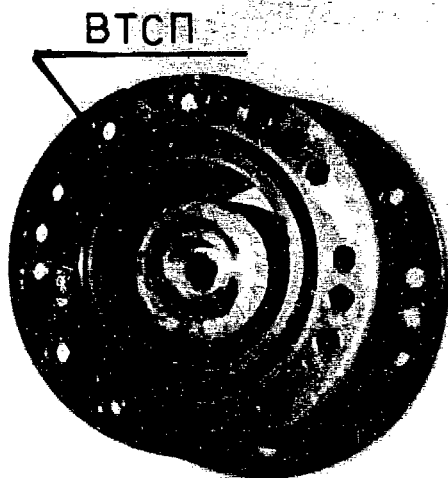


Рис.6. Фотография анода в азстном криостате



Рис.7. Фотография источника электронов с криостатом

криостата, кольца из сверхпроводника, корпуса сопротивления. Это объясняется наличием керамического корпуса у резистора и слабой зависимостью сопротивления от дозы рентгеновского излучения в отличие от полупроводникового термодатчика.

Применение термодатчика практически полностью отпадает из-за гальванической связи с кольцом из высокотемпературного сверхпроводника, что приводит к скачку величины напряжения, когда через анод или элемент сжатия проходит пучок электронов.

Давление остаточного газа в вакуумной камере регулируется с помощью натекателя. Это необходимо для подбора условий нейтрализации объемного заряда пучка электронов, которые рассчитываются по эмпирической формуле:

$$\tau_n \approx 0.7/\beta_z P, \quad (4)$$

где: τ_n - время полной нейтрализации объемного заряда пучка электронов, [нс];

$$\beta_z = V_b/C \quad (V_z - \text{продольная скорость электронов,} \\ C - \text{скорость света);}$$

P - давление остаточного газа, [торр].

Для питания источника электронов используется генератор импульсного напряжения типа Аркадьева-Маркса с амплитудой напряжения 100 - 600 кВ и длительностью импульса напряжения 300 нс.

3.2.1. Результаты измерений

На рис. 8 приведены вольтамперные характеристики электронной пушки первого варианта с различной температурой анода: $T = 300, 150, 78$ К. Из них видно, что при уменьшении температуры анода уменьшается его сопротивление и коэффициент токопрохождения через анод возрастает. При этом также возрастает коэффициент сжатия пучка, равный отношению радиуса пучка на входе в анод R_1 к радиусу пучка после анода R_0 , см. рис. 9. Автограф пучка электронов приведен на рис. 10, где

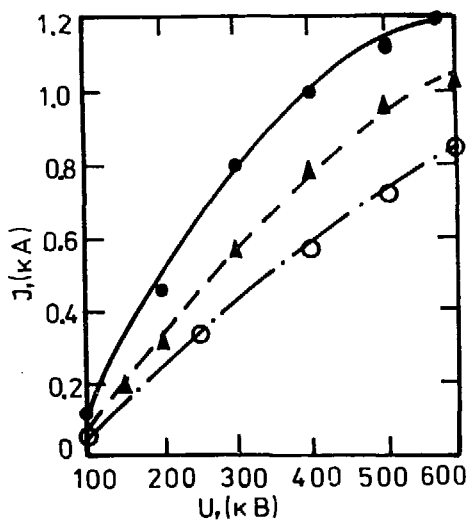


Рис. 8. Вольт-амперная характеристика диода первого варианта при различных температурах анода: ○ - 300 К; ▲ - 150 К; ● - 78 К

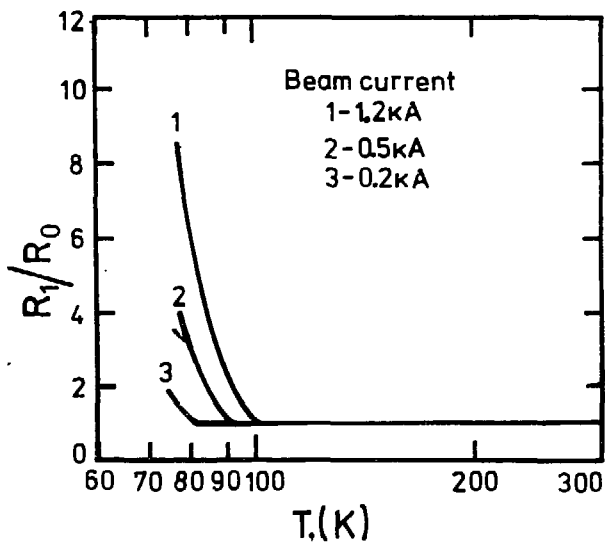


Рис. 9. Зависимость R_1/R_0 пучка электронов от температуры T при напряжении на диоде 400 кВ

темная часть пучка показывает размер пучка после анода, находящегося при комнатной температуре, а центральная светлая часть после анода при азотной температуре. Из них видно, что переход анода в сверхпроводящее состояние приводит к самосжатию пучка электронов. Этот эффект можно объяснить эффектами токового взаимодействия, рассмотренными выше. Уменьшение диаметра пучка от 10 мм до 2 мм означает увеличение плотности мощности в 25 раз и позволяет получить плотность мощности в диапазоне нескольких ГВт/см². Для примера, при напряжении на электронной пушке $U = 400$ кВ, токе пучка электронов $J = 1000$ А, диаметре пучка электронов 2 мм плотность мощности пучка электронов ΔP равна:

$$\Delta P = U \cdot J / S \cong 10^{10} \text{ Вт/см}^2, \quad (5)$$

где: S - площадь поперечного сечения пучка электронов.

Исследование микроструктуры пучка электронов показало наличие некоторой неоднородности плотности тока пучка электронов по поперечному сечению на уровне 25- 30% для токов в диапазоне до 800 А при напряжении на источнике электронов до 300кВ. При больших токах и напряжении на диоде неоднородность плотности тока пучка уменьшается до 5%.

Ресурс работы анода из высокотемпературного сверхпроводника ограничен, что связано с распылением анода при посадке пучка на его стенки и потере сверхпроводящих свойств. При получаемых параметрах пучка электронов ресурс анода на основе иттриевой керамики составляет около 10^4 включений.

Исследование второго варианта источника электронов с вынесенными элементом сжатия показывает, что коэффициент сжатия после первого кольца равен 1 - 3 для пучка электронов с током 0.2 - 1.2 кА и кинетической энергией 100 - 600 кэВ. Для примера на рис. 11 приведена зависимость коэффициента токопрохождения пучка электронов от тока пучка через элемент

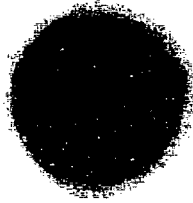


Рис.10. Автограф пучка на винипрозе:
темная часть - автограф пучка при теплом аноде;
светлая часть - автограф пучка при аноде, находящемся в
сверхпроводящем состоянии

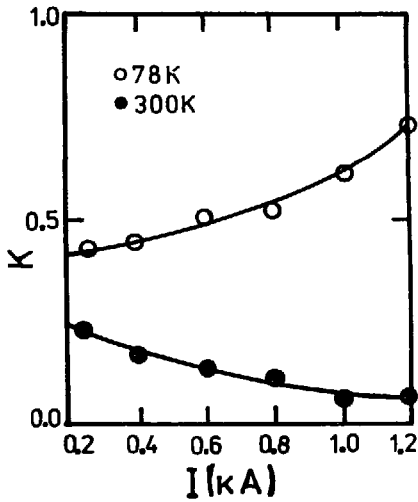


Рис.11. Зависимость коэффициента токопрохождения через два кольца из сверхпроводника при комнатной и азотной температурах

сжатия, состоящий из двух сверхпроводящих колец при комнатной и азотной температуре. Коэффициент токопрохождения пучка электронов равен отношению тока пройденного пучка к току инжектируемого пучка. Из этого видно увеличение коэффициента токопрохождения. Давление остаточного газа составляло 10^{-2} торр.

Исследование микроструктуры электронного пучка после элемента сжатия показало высокую поперечную однородность: неоднородность плотности тока пучка электронов меньше 4 - 5%.

Ресурс элемента сжатия составляет около 10^5 импульсов пучка электронов, прошедших через этот элемент. Причина ограничения ресурса элемента сжатия та же, что и в первом случае. Последующий отжиг в атмосфере кислорода позволяет восстановить сверхпроводящие свойства.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что рассмотренный метод получения сверхплотных электронных пучков путем самосжатия в кольцах из высокотемпературных сверхпроводников позволяет осуществить получение высокой плотности электронного пучка и использовать этот эффект в различных исследованиях.

ПРИМЕНЕНИЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ КРИТИЧЕСКИХ ТОКОВ ВТСП

Для измерения критических токов целесообразнее применять импульсные методы [15, 16]. В этом случае снимаются проблемы выделения тепла на контактах и измерения критических токов становятся довольно простыми. Несмотря на простоту импульсного метода измерения критического тока высокотемпературного сверхпроводника, в нем остаются некоторые трудности. Основная из них состоит в необходимости измерения падения напряжения на образце при помощи дифференциального усилителя, что связано с методом запитки током сверхпроводящего образца. Для устранения указанного недостатка необходимо осуществлять измерения падения напряжения без

дифференциального усилителя. Для этого предлагается использовать в качестве источника тока импульсный электронный пучок с длительностью импульса тока в несколько сотен наносекунд.

Схема измерений приведена на рис. 12. В этом случае

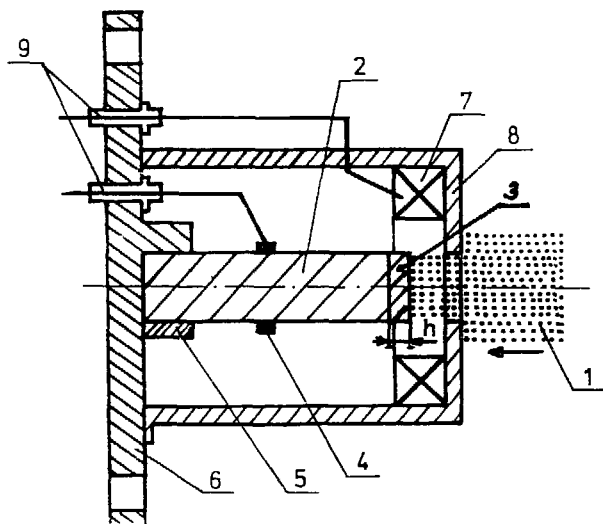


Рис. 12. Схема измерения критических токов с помощью сильноточных электронных пучков: 1 - пучок электронов; 2 - высокотемпературный сверхпроводник; 3 - модифицированный слой высокотемпературного сверхпроводника; 4 - контакт; 5 - контактный электрод; 6 - фланец; 7 - трансформатор тока; 8 - крышка

условия адиабатики выполняются, так как длительность импульса тока пучка электронов значительно меньше тепловой постоянной высокотемпературного сверхпроводника, поэтому тепловые эффекты проявляются только на глубине пробега электронов, определяемой их кинетической энергией. Действительно, тепловая постоянная высокотемпературных сверхпроводников на основе висмутовой или иттриевой керамики, вычисленная по формуле, [2]:

$$\tau_m = 2h\epsilon\rho / \lambda, \quad (6)$$

где: h - пробег электронов, c, ρ, λ - удельная теплоемкость, плотность и удельная теплопроводность сверхпроводящей керамики,

составляет $10^{-5} - 10^{-4}$ с при глубине пробега электронов от 50 до 200 мкм. Такой пробег имеет место для электронов с кинетической энергией от 100 до 500 кэВ. Следовательно, при нормальном падении на ВТСП электронного пучка только на этой глубине наблюдаются тепловые эффекты, например проплавление керамики, а далее сверхпроводник остается "чистым" и на нем возможно проводить токовые измерения.

При сверхпроводящем состоянии падение напряжения равно нулю, а при переходе в нормальное состояние с возрастанием сопротив-

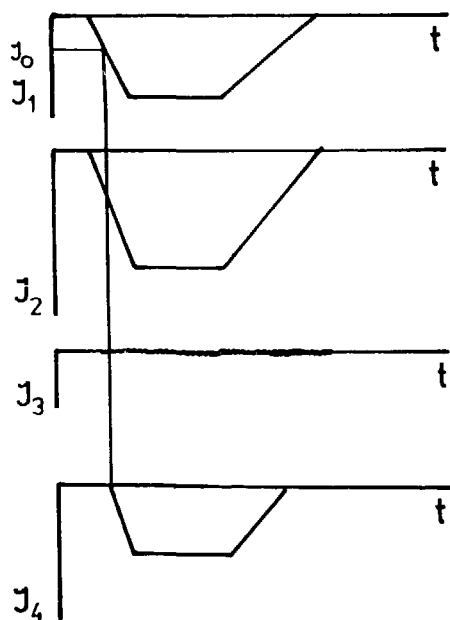


Рис. 13. Типичные осциллограммы:

- J_1 - ток с пояса Роговского;
- J_2 - ток с образца при $t = 300\text{K}$;
- J_3 - ток с образца, который находится в сверхпроводящем состоянии;
- J_4 - ток с образца, который перешел в нормальное состояние;
- J_0 - величина критического тока

ления сверхпроводника появляется напряжение, которое измеряется с помощью осциллографа. Переход в нормальное состояние определяется критическим транспортным током. Для примера на рис. 13 приведены типичные осциллограммы с одного из образцов. Таким образом, по осциллограммам импульса тока пучка электронов можно определить критический ток сверхпроводника.

Необходимо отметить, что данный метод измерения критических токов высокотемпературных сверхпроводников позволяет проводить измерения с образцами любой формы и сечения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение можно сделать следующие выводы:

- Источник электронов со взрывоэмиссионным катодом на основе висмутовой керамики (Bi-Sr-Ca-Cu-O) при комнатной температуре позволяет формировать сильноточные электронные пучки микросекундного диапазона, а также электроны низких энергий.

Использование сверхпроводящей керамики, находящейся в сверхпроводящем состоянии, в качестве материала анода позволяет формировать электронные пучки с высокой плотностью тока по поперечному сечению за счет самосжатия скомпенсированного по заряду пучка электронов.

- На основе периодической системы из сверхпроводящих колец можно осуществлять транспортировку скомпенсированного по заряду электронного пучка.

- Электронный пучок может быть использован при измерении критического тока высокотемпературных сверхпроводников различного сечения и геометрии.

В заключение автор выражает свою глубокую благодарность сотрудникам ОИЯИ Алтынову В.А., Балалыкину Н.И., Боровкову Д.Л., Зубареву Е.В., Сиколенко В.В., Костюченко С.В., Ореловичу О.Л. за помощь в работе и плодотворные дискуссии; сотрудникам Государственного научно-исследовательского энергетического института (г. Москва) Башкирову Ю. А., Флейшману А.С. за предоставленные кольца высокотемпературных сверхпроводников и полезные обсуждения постановки экспериментов.

Работа выполнена при поддержке Государственной программы
"Высокотемпературная сверхпроводимость", проект № 91035, шифр
"Электрон".

Литература

1. Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984.
2. Латам Р. Вакуумная изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Коренев С.А. и др. ПТЭ, 1989, № 5, с. 194.
4. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Издательство "Советское Радио", 1974.
5. Bednorz J.G., Muller K. A. Z. Phys., 1986, vB64, p.189.
6. Korenev S.A. Proc. 3th International Conference on Ion Implantation and Ion Equipment, Elenite, Bulgaria, 1990, p. 267.
7. Месяц В.Г., Шкуратов В.С. Тезисы докладов IX Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике, Свердловск, ИЭФ УРО АН СССР, т. 1, с. 67, 1988 .
8. Korenev S.A. JINR Rapid Communication N4 -30-88, Dubna, JINR, 1988, p. 87.
9. Matsuzawa H, e.a. J. Appl. Phys., 65 (7), 1 April 1989, p. 2596.
10. Korenev S. Book of abstracts IX International Pulsed Power Conference, Albuquerque, New-Mexico, 1993, p.54.
11. Ходатаев К.В. Атомная энергия, 32б, вып.5, 1972, с. 379.
12. Диденко А.Н., Григорьев В.П., Усов Ю.П. Мощные электронные пучки и их применение. М., Атомиздат, 1977.
13. Диденко А.Н., Рябчиков А.И. Известия вузов, № 10. 1979.
14. В.И. Дацков. Препринт ОИЯИ № 8-83-717, ОИЯИ, Дубна, 1983.
15. Роуз-Инс А., Родерик Е. Введение в физику сверхпроводимости. М.; Мир, 1972.
16. Коренев С.А., Сиколенко В.В. Сообщение ОИЯИ № Р 13-93-471. ОИЯИ, Дубна, 1993.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 мая 1994 года.