

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЯ ИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

© 2006 г. А. В. Бублей, 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 29.04.2005 г.

Разработаны методы измерения профиля мощных электронных пучков с использованием тонкой вольфрамовой проволоки, перемещаемой поперек пучка. В одном методе измеряется ток электронов, перехватываемых проволокой, и профиль пучка определяется в предположении аксиальной симметрии пучка из решения уравнения Абеля. В другом – детектируется локальное излучение проволоки, нагретой пучком до 1700–2200 К. Для улучшения чувствительности и пространственного разрешения проволока дополнительно подогревается током. Измеряемая плотность тока пучка $\sim 5\text{--}50 \text{ А/см}^2$, разрешение $\sim 0.1 \text{ см}$.

PACS: 07.77.Ka, 29.27.Fh, 29.27.Bd, 29.20.Dh

ВВЕДЕНИЕ

Охлаждение ионного пучка сопутствующим пучком холодных электронов нашло широкое применение в физике ускорителей [1]. Этот метод впервые был опробован в Новосибирске в 1974 г. [2] и в настоящее время является одним из основных способов достижения высокой фазовой плотности ионных пучков в накопителях. В экспериментах были обнаружены даже переходы ультрахолодных пучков во внутреннее упорядоченное состояние, что дало развитие специальному направлению в физике ускорителей – “физике кристаллических пучков”. Однако при высоких плотностях тока на ряде установок наблюдалось развитие когерентных неустойчивостей, что приводило к возникновению проблем с накоплением пучков. Кроме того, в ряде случаев становилась существенной и рекомбинация ионов на электронах охлаждающего пучка.

Одним из способов решения перечисленных выше проблем является создание электронного пучка с заданным радиальным профилем. Интенсивность охлаждения прямо пропорциональна электронной плотности и обратно пропорциональна кубу амплитуды бетатронных колебаний ионов. Таким образом, уменьшая плотность электронного пучка в центре, можно, незначительно уменьшив время охлаждения, существенно подавить процесс рекомбинации и нежелательное коллективное ион-электронное взаимодействие.

Использование электронного пучка с изменяемым профилем позволяет также реализовать дополнительные возможности в ускорительных экспериментах, например: удерживать размер ионного пучка в заданных пределах, не допуская большого сдвига частоты бетатронных колебаний на пространственном заряде, либо максимально

охлаждать центральную часть ионного пучка при его взаимодействии с внутренней мишенью.

Для решения этих задач была разработана электронная пушка с управляемым профилем пучка [3, 4]. На специальном стенде “пушка–коллектор” в ИЯФ СО РАН [5] были изучены особенности работы этой электронной пушки, а также измерены профили пучка в разных режимах ее работы. Ниже приведены результаты этих измерений.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерения профиля электронного тока использовалась тонкая вольфрамовая проволока, перемещаемая шаговым двигателем перпендикулярно пучку. Профиль пучка измерялся двумя способами.

Первый способ заключался в измерении тока электронов, попадающих на проволоку. В предположении аксиальной симметрии пучка распределение плотности тока пучка $j_e(r)$ можно найти из решения уравнения Абеля:

$$J_e(y^2) = d \int_0^R j_e(r^2) \frac{dr^2}{\sqrt{r^2 - y^2}}, \quad (1)$$

где d – диаметр проволоки (20 мкм), R – внешний радиус пучка (около 1.5 см), r – текущий радиус пучка, y – координата хорды от центра пучка вдоль линии перемещения, $J_e(y^2)$ – измеренная зависимость тока с проволоки от координаты. Измерения проводились в сильном внешнем магнитном поле, поэтому предполагалось, что вторичные электроны оседают на проволоку.

При втором способе проводились локальные измерения излучения нагреваемой пучком проволоки. При каждом положении проволоки про-

дольное распределение ее свечения сканировалось специальным приемником излучения.

Профиль плотности мощности пучка вдоль проволоки $Q(x)$ в общем случае связан с плотностью излучения уравнением

$$-\pi a^2 \left[\frac{d}{dx} \left(\chi(T) \frac{dT}{dx} \right) \right] = \frac{j_h^2}{\pi a^2} \rho(T) + 2aQ(x) - 2\pi a q(T), \quad (2)$$

где $T(x)$ – профиль температуры вдоль хорды, x – текущая координата вдоль хорды, J_h – ток накала проволоки, $\rho(T)$ – удельное сопротивление вольфрама, $q(T)$ – плотность излучаемой мощности, $\chi(T)$ – коэффициент теплопроводности вольфрама.

В данном уравнении учтены следующие эффекты: перенос тепла к концам проволоки за счет теплопроводности (левая часть уравнения), приток тепла за счет нагрева внешним током (первый член в правой части), нагрев нити электронным током пучка (второй член в правой части), излучение мощности за счет свечения (третий член в правой части).

Для калибровки датчика мощности излучения, улучшения динамического диапазона фотоприемной аппаратуры при измерении профиля пучка использовался подогрев проволочки внешним током с известной мощностью. Кроме того, при подогреве проволоки улучшается пространственное разрешение, поскольку возрастает доля потерь на излучение (полезный сигнал) по сравнению с потерями на теплопроводность.

Для восстановления профиля пучка, в общем случае, необходимо знать зависимость $T(S)$, где S – сигнал приемника излучения. Из-за необходимости дифференцирования при обработке профиль $S(x)$ необходимо снимать с возможно лучшим пространственным разрешением.

Схема стенда “пушка–коллектор” для измерения профиля пучка представлена на рис. 1. Магнитная система стенда состоит из двух установленных вертикально соленоидов 3, 4. Пушка 2 расположена внизу и вдвинута в нижний соленоид на глубину ~ 7.5 см. Для формирования поля в области катода пушки использован концентратор 5 магнитного потока, выполненный из железа. Коллектор 1 размещен на 1 см выше верхнего соленоида внутри экрана, формирующего поле. Расстояние между пушкой и коллектором ~ 110 см. Питание соленоидов – раздельное, что позволяло варьировать размер пучка на входе в коллектор. Диапазон изменения магнитных полей 0.3–0.7 кГс. Промежуток между соленоидами (~ 20 см) использовался для от качки и в диагностических целях. Вакуумная камера выполнена в виде трехмерной крестовины 7, по вертикальной трубе которой проходит пучок. Размещение аппаратуры

на горизонтальных патрубках показано на схеме измерения профиля пучка (рис. 2).

W-проволока длиной 10 см и диаметром 20 мкм через изоляторы натянута на пружинящую металлическую рамку, закрепленную на подвижной штанге (см. рис. 2). Все это размещено внутри вакуумной камеры. Концы проволоки выведены наружу через керамический разъем. Перемещение штанги перпендикулярно пучку осуществлялось через сильфон 5 шаговым двигателем.

Излучение от раскаленной вольфрамовой нити выводилось через стеклянное вакуумное окно 3. Приемником излучения служил фотодиод 1 с усилителем ОРТ211, установленный внутри фотокамеры 2 “Зенит-ЕТ” со штатным объективом “Гелиос-44” и щелевой диафрагмой. Пространственное разрешение оптической системы по длине составляло 0.5 мм. Фотоаппарат был закреплен на сканирующем устройстве, которое с помощью электромотора совершало колебания в горизонтальной плоскости. Полный угловой размах колебаний 10° при плече ~ 100 см позволял с запасом просматривать всю длину проволоки. На каждом шаге выполнялось пять проходов вдоль проволоки и при каждом прохождении с помощью амплитудно-цифрового преобразователя осуществлялось около 100 считываний сигналов с фотодиода и датчика координаты.

Поскольку мощность излучения сильно возрастает с температурой, рабочая температура проволоки должна быть высокой. Максимальная рабочая температура вольфрама в вакууме равна 2800 К [6], однако при такой температуре вольфрам заметно испаряется. В этом случае приемлемой является температура W-проволоки 2200 К, при которой давление насыщенных паров равно $7.4 \cdot 10^{-10}$ Торр. Соответствующая плотность мощности излучения $q = 37$ Вт/см², отсюда следует оценка допустимой локальной плотности мощности пучка: $Q \approx \pi q \approx 120$ Вт/см². При температуре 2200 К излучение имеет максимум на длине волны $\lambda_m \approx 1.3$ мкм.

Первая серия измерений проводилась со сравнительно слабыми стационарными пучками: энергия электронов 1 кэВ, токи до 0.17 А. Радиус пучка составлял 1.5 см, средняя по сечению пучка плотность мощности доходила до ~ 24 Вт/см².

Во второй серии пушка работала в номинальном режиме. Формировались пучки с токами до 2.4 А и с энергией электронов до 5 кэВ. Последующее использование таких пучков для охлаждения ионов требует лишь их ускорения. В стационарном пучке со средней по сечению плотностью мощности ~ 1.7 кВт/см² проволока сгорает, поэтому на управляющий электрод пушки подавалась периодическая последовательность отпирающих ($\tau = 0.28$ мс) и запирающих импульсов. Среднее значение плотности мощности пучка при этом

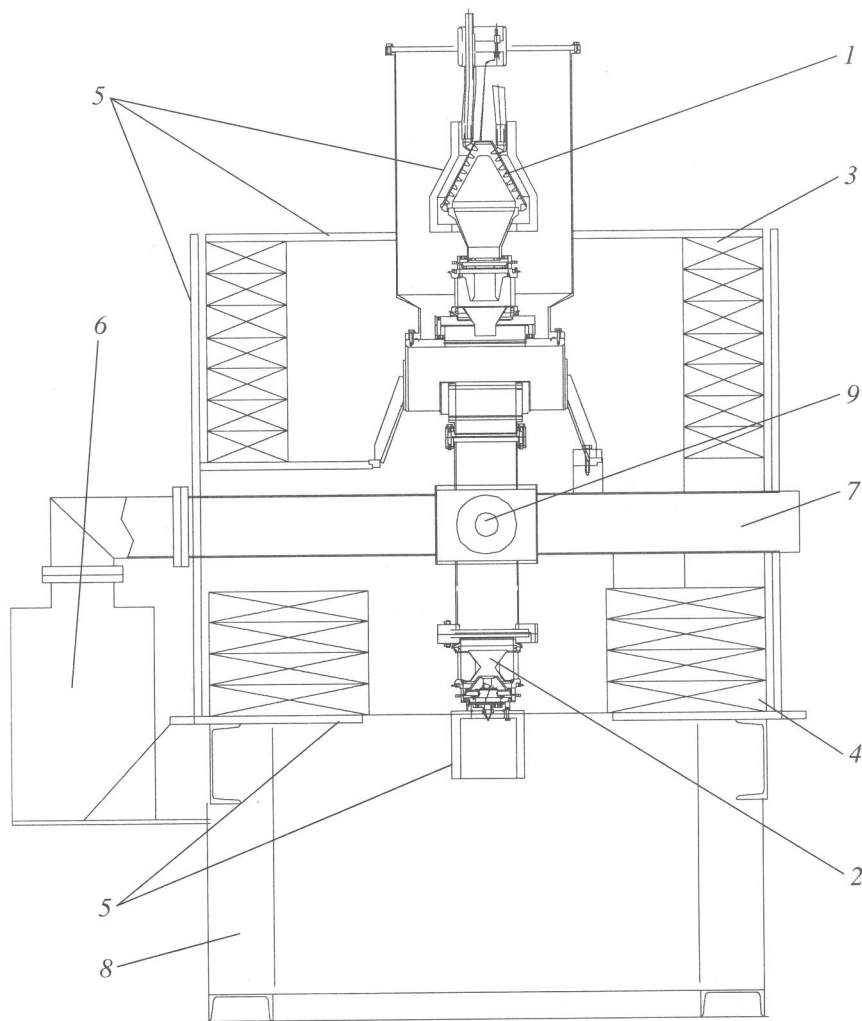


Рис. 1. Схема стэнда "пушка-коллектор". 1 – коллектор, 2 – электронная пушка с изменяемым профилем пучка, 3 – катушки магнитной системы коллектора, 4 – катушки магнитной системы пушки, 5 – магнитопроводы и концентраторы магнитного потока, 6 – магнитоотрядный насос, 7 – "крестовина" для откачки (одно плечо) и ввода зонда (другое плечо), 8 – несущая конструкция стэнда, 9 – смотровое окно вакуумной установки.

было 40 Вт/см^2 , чему соответствовала средняя температура проволоки $\sim 1770 \text{ К}$. Тепловой скин-слой $(4k\tau)^{1/2} = 1.7 \cdot 10^{-2} \text{ см}$, где $k = 0.25 \text{ см}^2/\text{с}$ – температуропроводность вольфрама, на порядок больше диаметра проволоки, и, следовательно, в каждом импульсе проволока прогревалась по всему сечению. Приращение температуры за импульс при плотности мощности 1.7 кВт/см^2 составило 80 К , что дает размах колебаний температуры на фоне среднего значения.

Приведенные выше оценки средней тепловой нагрузки на проволоку в несколько раз меньше допустимой нагрузки. Однако у полых или параболических пучков локальная плотность мощности в несколько раз больше средней и соответственно локальный нагрев проволоки выше.

КАЛИБРОВКА ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

В процессе калибровки проводилось сканирование по всей длине проволоки с потактовой записью зависимости сигнала фотодиода от координаты при 14-ти значениях тока накала J_k . Часть измеренных зависимостей приведена на рис. 3а. Видно, что почти во всех измерениях вдоль проволоки сигнал с фотодиода близок к постоянному. Следовательно, практически вся поглощаемая мощность излучалась. Конкурирующая с излучением продольная теплопроводность заметно проявлялась на краях проволоки лишь при малых значениях тока накала (нижние кривые).

Регулярная неоднородность сигналов при $x = -3.4 \text{ см}$ может быть связана с локальным утолщением проволоки. По оценкам, наблюдаемое во всех измерениях изменение сигнала соответствует локальному увеличению диаметра проволоки

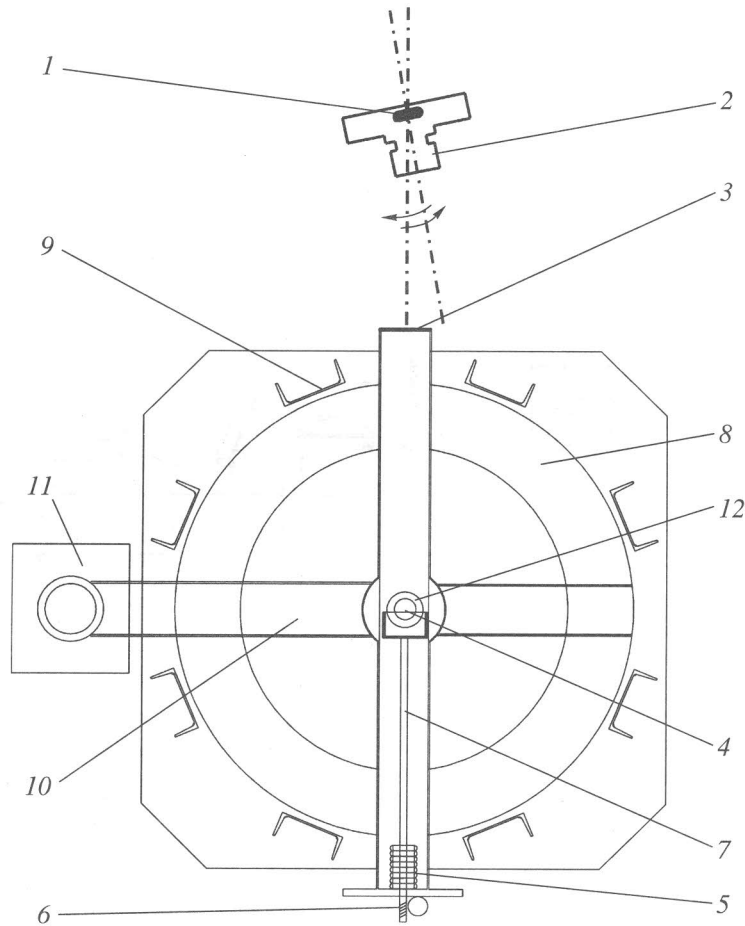


Рис. 2. Схема измерений профиля пучка. 1 – фотодиод, 2 – фотоаппарат “Зенит-ЕТ”, 3 – вакуумное окно, 4 – вольфрамовая проволока, 5 – сильфон, 6 – механический привод, 7 – подвижная штанга, 8 – обмотка соленоида, 9 – детали магнитопровода, 10 – вакуумная камера, 11 – магниторазрядный насос, 12 – электронный пучок.

на ~ 1.5 мкм. Другое возможное объяснение – локальное уменьшение излучательной способности, обусловленное неоднородности коэффициента черноты. Так как данная неоднородность на протяжении всей работы была неизменной, то она может быть достаточно просто учтена при обработке экспериментальных данных. Сигнал при $x < -5$ см и $x > 5$ см, который, как правило, на порядок меньше сигнала с проволоки, – это сигнал “засветки” от рассеянного излучения. На уровне сигнала $S < 10^{-3}$ мВ уже проявлялась “засветка” от катода.

На рис. 3б показана зависимость сигнала из центра проволоки от мощности накала P_k . Зависимость близка к квадратичной при $P_k > 0.1$ мВт. Обратная зависимость $q_k(S_k)$ позволяет по измеренному сигналу $S(x)$ найти профиль плотности мощности пучка вдоль проволоки $Q(x) = \pi q(x)$ в случае, когда профиль достаточно гладкий и теплопроводностью вдоль проволоки можно пренебречь. Здесь $q_k = P_k/(\pi d L)$ – плотность мощности

излучения, $d = 19.2 \cdot 10^{-4}$ см – диаметр проволоки, $L = 10$ см – длина проволоки.

Для восстановления по измеренному сигналу $S(x)$ профилей пучков с крутой границей требуется знать температурную зависимость сигнала фотоприемника S (см. уравнение (2)). Для этого можно использовать близкую к линейной зависимости удельного сопротивления вольфрама от температуры. Соответственно каждому из 14-ти

измеренных значений $\rho_k = \frac{U_k \pi d^2}{4 J_h L}$, где U_k – напря-

жение накала, соответствует справочное значение температуры T_k . Полученная в результате зависимость $S_k(T_k)$ приведена на рис. 4а.

Известно, что излучательная способность $\epsilon(T) = q(T)/\sigma T^4$ сильно зависит от состояния поверхности. Сначала проволока светилась неравномерно, местами очень ярко. Устойчивые и надежные экспериментальные данные были получены только по истечении некоторого времени, после того как вся поверхность проволоки достаточно

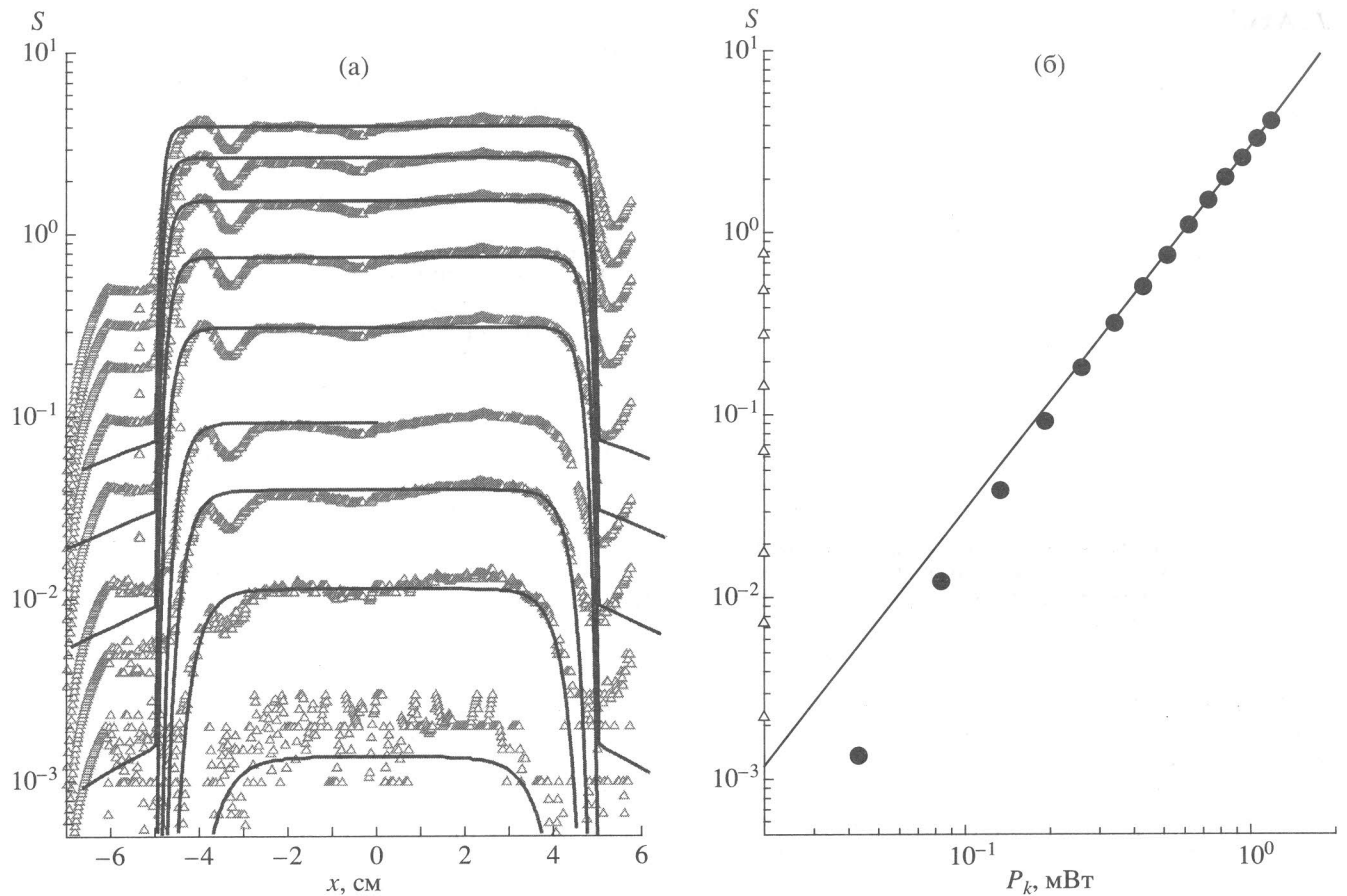


Рис. 3. а – профили сигнала фотодиода при разных значениях тока накала проволоки (сплошные кривые – расчетные профили сигнала (см. ниже)); б – зависимость сигнала от мощности накала.

долго пробыла под электронным пучком и прокалилась при максимально допустимых значениях тока. Калибровка $q_k(S_k)$ и $T_k(S_k)$ проводилась по истечении некоторого времени, после того как поверхность проволоки полностью очистилась и достигла равновесного состояния.

В качестве проверки калибровки на рис. 4б показано соответствие измеренной зависимости плотности мощности излучения $q_k(T_k)$ и справочной зависимости $q(T)$. Более того, значения сигнала фотоприемника $S(T_k)$, умноженные на постоянную C , хорошо ложатся на кривую $q_\lambda(T)$ – плотность мощности излучения в полосе фотоприемника с нормировкой по его чувствительности. Кривая является произведением $\epsilon(T)$ и интеграла по длине волны от произведения формулы Планка для излучения черного тела на относительную (единица в максимуме) спектральную чувствительность приемника излучения. Пропускающая способность стекла (вакуумное окошко, линзы) приблизительно постоянна в полосе чувствительности фотоприемника.

Таким образом, результатом калибровки являются две зависимости. Первая – это полученная в

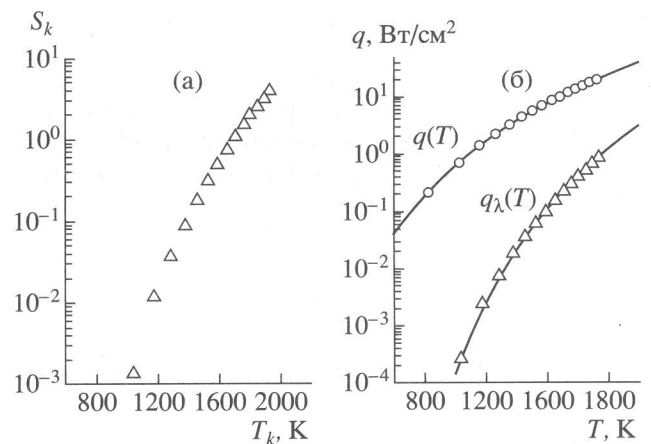


Рис. 4. а – сигналы фотодиода S_k как функция температуры T_k , определенной по справочной температурной зависимости удельного сопротивления $\rho(T)$. б – зависимость плотности мощности излучения $q(T)$ (сплошная кривая – справочные значения, точки – измеренные значения $q_k(T_k)$); зависимость плотности мощности излучения $q_\lambda(T)$ в полосе фотоприемника (сплошная кривая – расчет, точки – нормированные значения сигнала фотоприемника).

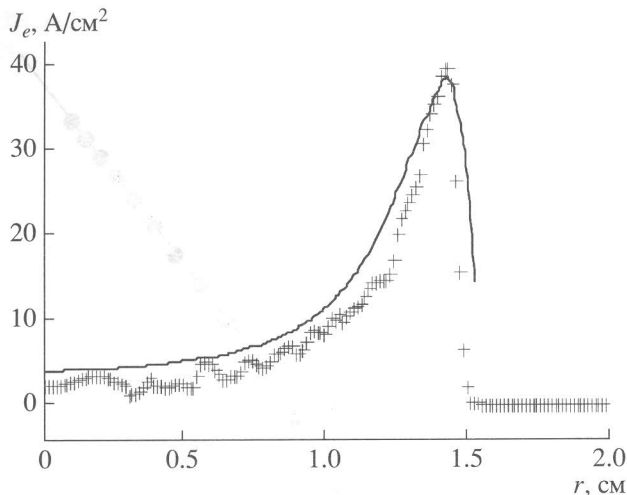


Рис. 5. Нормированный профиль пучка (крестики), восстановленный из прямых измерений тока на проволоку. Сплошная линия – результат численного моделирования работы пушки.

прямых измерениях зависимость сигнала фотоприемника S от плотности излучаемой мощности q . Если профиль пучка достаточно гладкий и теплопроводностью вдоль проволоки можно пренебречь, то несложно определить профиль, используя обратную зависимость $q(S)$. Вторая – это зависимость сигнала фотоприемника S от температуры проволоки T , необходимая в том случае, когда теплопроводностью вдоль проволоки пренебречь нельзя. Она является результатом обработки измерений с использованием справочных данных. Достоверность зависимости $S(T)$ подтверждается только хорошим совпадением справочных и измеренных зависимостей на рис. 4а, 4б. Альтернативой здесь могли бы быть пирометрические измерения, однако, соответствие истинной и яркостной температур также вопрос справочный. Как уже отмечалось, для восстановления профиля пучка необходима не только обратная зависимость $T(S)$, но и ее производные.

ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ПУЧКА

На рис. 5 показан нормированный профиль плотности тока пучка, полученный из измерений

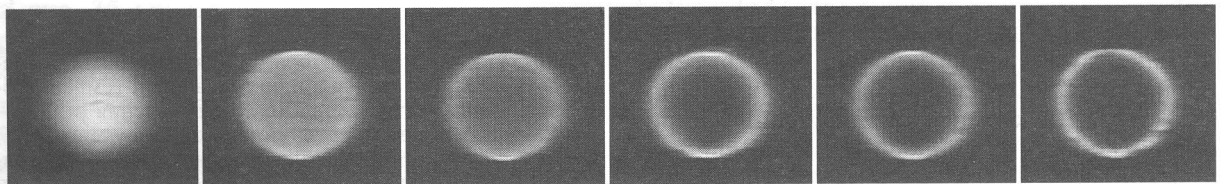


Рис. 6. Распределение плотности излучаемой мощности при сканировании пучков, формируемых при различных напряжениях U_{contr} на управляющем электроде пушки (слева направо): 0, 100, 200, 350, 400 и 600 В.

тока на пошагово вводимую поперек пучка проволоку. Пучок предполагался аксиально-симметричным, и профиль является решением уравнение Абеля (1). На рис. 5 показан также профиль, являющийся результатом численного моделирования с помощью программ SAM [3] работы пушки при тех же ее параметрах.

На рис. 6 представлены распределения плотности излучаемой мощности при двухмерном сканировании электронного пучка в разных режимах работы пушки. Распределения представлены в виде “кадров”, на которых значению плотности соответствует определенная степень яркости. Регистрировалось излучение при сканировании фотоприемника вдоль пересекающей пучок проволоки (на “кадрах” – слева направо), затем проволока пошагово перемещалась поперек пучка (на “кадрах” – снизу вверх). Везде напряжение катода пушки $U_{cath} = -1$ кВ, напряжение анода $U_a = 0.5$ кВ. Профиль пучков задавался напряжением на управляющем электроде U_{contr} относительно катода.

Наблюдаемая азимутальная неоднородность распределений связана с тем, что, начиная со 2-го кадра, плотность мощности пучка сосредоточена в узком слое на внешней границе. Соответственно из-за продольной теплопроводности происходит размытие профиля температуры и, как следствие, плотности излучаемой мощности. Вверху и внизу проволока пересекает этот слой по хорде, длина нагреваемого пучком участка здесь больше, чем при пересечении по диаметру, и соответственно размытие температуры проявляется слабей.

На рис. 7 представлены результаты измерений профиля пучка обоими способами в режиме работы пушки: $U_{cath} = -1$ кВ, $U_{contr} = 400$ В при токе пучка $J_e = 0.17$ А. Координаты центра пучка $x = 0$ и $y = 0$, проволока натянута параллельно оси X и пошагово перемещалась вдоль оси Y . Показаны $q(x, 0)$ – профиль плотности излучаемой мощности вдоль проволоки, пересекающей пучок по диаметру, и $q(0, y)$ – профиль плотности излучаемой мощности по оси Y , полученный выборкой сигналов с координатой $x = 0$ из серии перемещений проволоки поперек пучка. Также показан профиль плотности тока пучка $j(r)$, полученный из измерений тока на проволоку, перемещаемую пошагово поперек пучка.

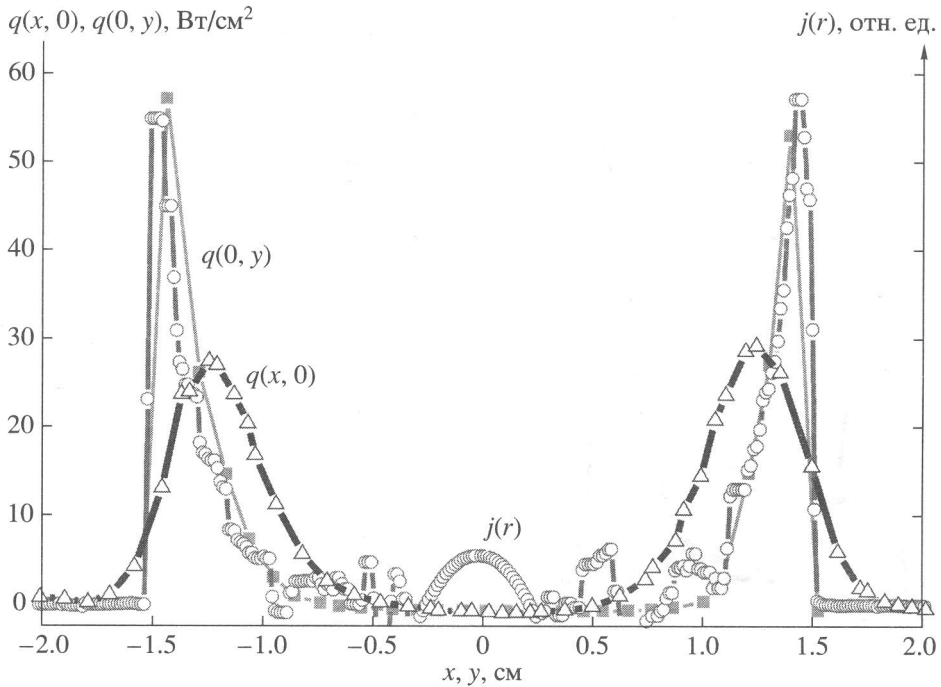


Рис. 7. Распределения плотности излучаемой мощности по взаимно перпендикулярным диаметрам пучка: $q(x, 0)$ – вдоль проволоки, $q(0, y)$ – вдоль линии перемещения проволоки. Распределение плотности тока пучка $j(r)$.

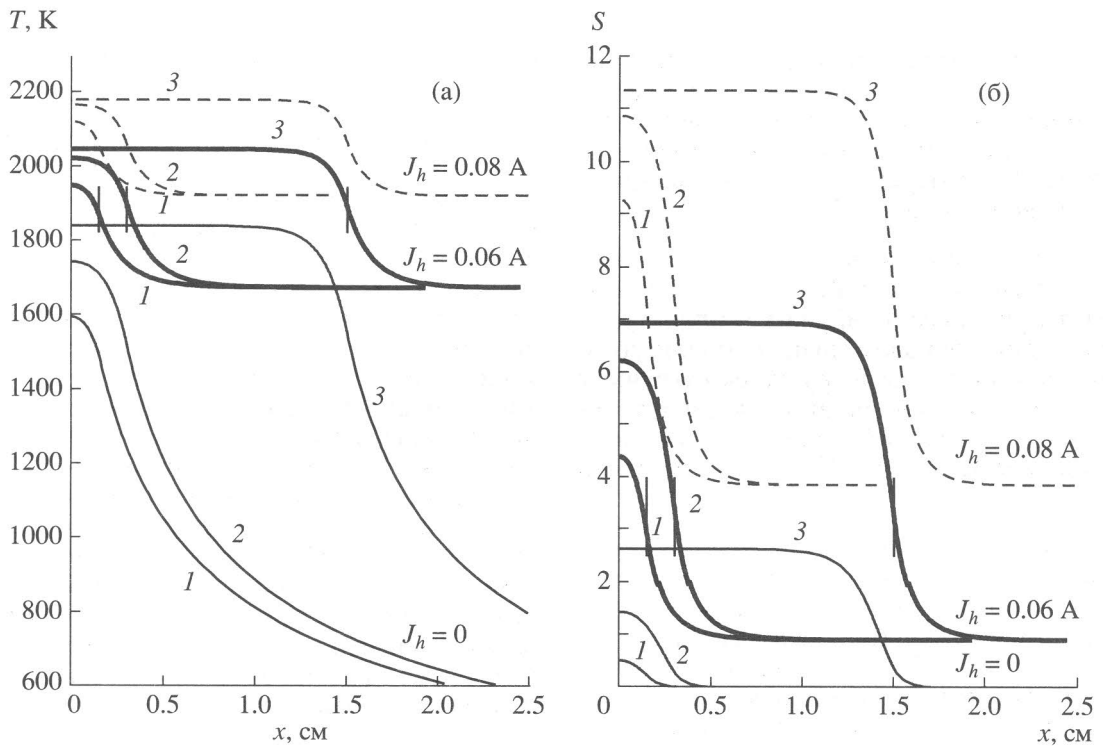


Рис. 8. Профили температуры (а) и сигналы фотоприемника (б) при нагреве проволоки пучком с плотностью мощности $Q_0 = 50 \text{ Вт/см}^2$ (цифры у кривых показывают ток подогрева проволоки J_h). В каждой серии нагрев проволоки пучком происходит на длине $2x_0 = 3 \text{ см}$ (1), $2x_0 = 0.6 \text{ см}$ (2) и $2x_0 = 0.3 \text{ см}$ (3).

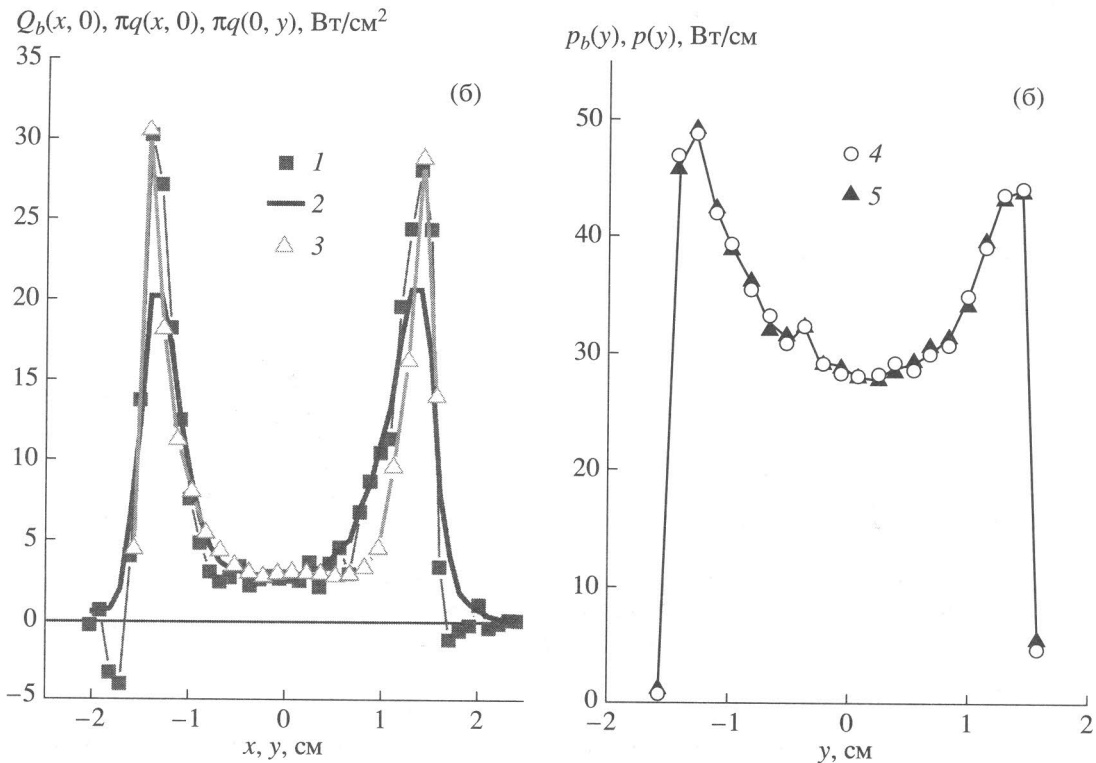


Рис. 9. а – профили плотности мощности в сечениях по центру пучка: 1 – пучка $Q_b(x, 0)$, 2 – излучения вдоль проволоки $\pi q(x, 0)$, 3 – излучения поперек проволоки $\pi q(0, y)$; б – интегралы $p_b(y_i)$ (4) и $p(y_i)$ (5) по хордам с координатами y_i поперек пучка.

На рис. 8а показаны профили температуры, являющиеся решениями уравнения (2) для длинной проволоки, равномерно нагреваемой на длине $-x_0 \leq x \leq x_0$ пучком с плотностью мощности $Q_0 = 50 \text{ Вт/см}^2$. Рассмотрено влияние на профили подогрева проволоки током J_h .

На рис. 8б показаны сигналы фотоприемника, которые, согласно калибровке рис. 3, соответствовали бы полученным профилям температуры. Полученные таким образом сигналы можно сравнить с измерениями по диаметру плоского пучка с радиусом $R = 1.5 \text{ см}$, с измерениями полого (трубчатого) пучка с радиусом $R = 1.5 \text{ см}$ и толщиной $\delta R = 0.3 \text{ см}$ по диаметру $2x_0 = 0.3 \text{ см}$ и по внешней хорде $2x_0 = 0.6 \text{ см}$.

Из этих графиков следует, что для нахождения профиля плотности мощности пучка с помощью уравнения (2) по измеренной зависимости $S(x)$ приемлемыми являются только измерения с подогревом проволоки. Действительно, при сильной зависимости сигнала фотоприемника от температуры, учитывая, что общая длина проволоки является конечной ($L = 10 \text{ см}$), только при подогреве могут быть получены адекватные значения как величины сигнала, так и характерных линейных размеров изменения и сигнала, и температу-

ры. Видно, что ток накала $J_h = 0.06 \text{ А}$ близок к оптимальному.

На рис. 9 приведены результаты, полученные при сканировании полого пучка подогретой проволокой. Ток накала проволоки $J_h = 0.05 \text{ А}$. Средняя мощность пучка 220 Вт : импульсный ток пучка $\sim 1.9 \text{ А}$, ток коллектора 44 мА (скважность 43) и энергия электронов 5 кэВ . На рис. 9а показан профиль плотности мощности пучка $Q_b(x, 0)$ по его диаметру и профиль плотности излучаемой мощности $\pi q(x, 0)$ за вычетом доли излучения от тока накала J_h . Для нахождения профилей использованы сигнал $S(x, 0)$ с проходящей по диаметру пучка проволоки, калибровки $T(S)$ и $q(S)$, уравнение (2) и справочные зависимости для $\rho(T)$ и $\chi(T)$. Проволока перемещалась поперек пучка с шагом 0.15 см . Сигналы фотоприемника $S(x, y_i)$ измерены в 20-ти положениях. Профиль плотности излучаемой мощности $\pi q(0, y)$, полученный из выборки сигналов $S(0, y_i)$ в сечении по центру пучка и также за вычетом доли излучения от накала, показан для сравнения.

На рис. 9б приведены интегралы $p_b(y_i) = \int Q_b(x, y_i) dx$ и $p(y_i) = \pi \int q(x, y_i) dx$ по хордам с координатами y_i поперек пучка, значения которых с

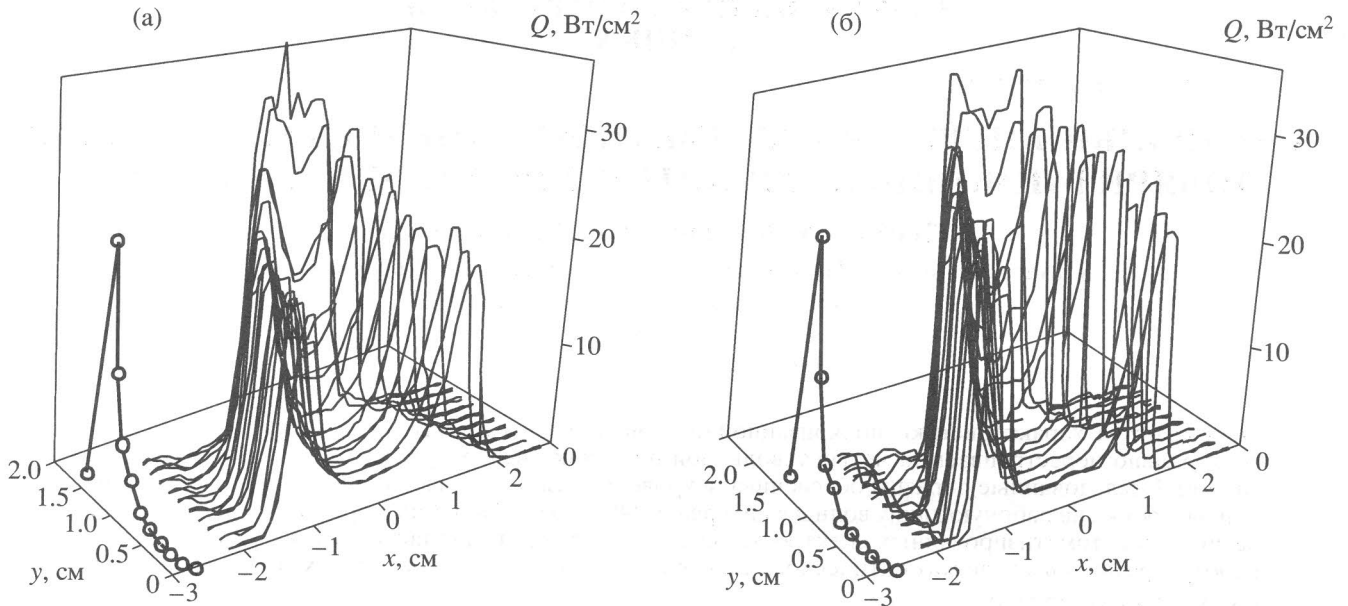


Рис. 10. Профили плотности мощности пучка $Q(x)$, восстановленные из измеренных при сканировании профилей сигнала $S(x)$ без учета левой части уравнения (2) (а) и с ее учетом (б). В плоскости YZ (слева) приведен профиль пучка в сечении $X = 0$.

хорошей точностью совпадают. Это означает, что поглощаемая проволокой мощность пучка излучается, а не уходит вдоль проволоки на крепежную рамку.

На рис. 10 приведены распределения плотности мощности пучка при восстановлении профиля с учетом теплопроводности и без. Видно, что в случае учета левой части уравнения (2) восстановленный профиль становится более однородным вдоль координаты Y (рис. 10б). В плоскости YZ (слева) приведен профиль пучка в сечении $X = 0$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения, выполненные с использованием проволоки, позволили адекватно на опыте определить форму пучка. Измерения тока через проволоку с учетом распределения свечения вдоль проволоки позволили получить надежные данные о профиле пучка. Измеренные профили хорошо согласуются с результатами численных расчетов. Описанный метод позволяет проводить абсолютные измерения плотности интенсивных электронных пучков. Электронные пушки описанной выше конструкции были смонтированы

на установках электронного охлаждения ЕС-35, ЕС-300 (Institute of Modern Physics, Ланьчжоу, Китай) и LEIR (CERN, Швейцария). Профили электронного пучка, измеренные в различных режимах работы электронной пушки, являются необходимыми данными для ее дальнейшей эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parkhomchuk V.V., Skrinsky A.N. // Physics – Uspekhi. 2002. V. 43. № 5. P. 473.
2. Budker G.I., Dikansky N.S. et al. // Proc. IV All-Union Meeting on Accelerators of Charged Particles (Moscow, 1974). Moscow: Nauka, 1974. V. 2. P. 309 // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1975. V. VS-22. P. 2093.
3. Bublei A., Goncharov A., Ivanov A. et al. // Proc. of EPAC. Paris, France, 2002. P. 1357.
4. Bublei A.V., Parkhomchuk V.V., Reva V.B. // International Workshop on Beam Cooling and Related Topics. (ECool-2003) RIKEN, Japan, May 19–24 2003.
5. Константинов С.Г., Пархомчук В.В., Рева В.Б. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 1. С. 91.
6. Эсне В. Технология электровакуумных материалов. Т. 1. Металлы и материалы с металлической проводимостью. М.: ГЭИ, 1962.