

УДК 621.384.6

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ В АТМОСФЕРЕ

Н.И. Айзацкий, В.Н. Борискин, В.А. Гурин, А.Н. Савченко, А.А. Сарвилов, В.И.Татанов

Научно-Исследовательский Комплекс «Ускоритель»
Национальный Научный Центр «Харьковский Физико-Технический Институт»
Украина, 61108, Харьков, Академическая, 1
E-mail: boriskin@kipt.kharkov.ua
Поступила в редакцию 9 февраля 2005 г.

Разработан метод измерения двумерной плотности распределения электронов в пучке с помощью профилометра вторичной эмиссии. Исследована работа профилометра в атмосфере с пучками электронов энергией до 12 МэВ и импульсным током до 1А. Показана возможность использования измеренных под разными углами профилей пучка заряженных частиц для реконструкции их двумерной плотности распределения методом компьютерной томографии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электронный пучок, профилометр, вторичная эмиссия, компьютерная томография

Разработка методов оперативного контроля параметров пучка в атмосфере на выходе линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) представляет интерес в связи с широчайшим внедрением радиационных технологий в различные области науки и техники [1]. Облучаемые объекты, как правило, расположены в воздушной атмосфере в бункере ЛУЭ. В настоящей работе измерялись параметры пучков с энергией до 12 МэВ с импульсным током до 1 А при рабочей частоте ЛУЭ 50–300 Гц. Для оперативного контроля положения и профиля пучка на мишени разработан специальный монитор вторичной эмиссии. Сигналы с монитора используются для измерения профилей пучка и определения плотности распределения электронов в пучке методом компьютерной томографии.

Цель работы – исследование возможности определения плотности распределения электронов в пучке с помощью профилометра вторичной эмиссии.

КОНСТРУКЦИЯ МОНИТОРА

Монитор состоит из рамки с эмитирующим и собирающим электродами и платформы с приводом вращения (рис.1). Собирающий электрод изготовлен из тонкой алюминиевой сетки, к которой подведено положительное напряжение до +100 В. Эмитирующий электрод состоит из четного количества алюминиевых пластинок шириной $W_1=2,8$ мм и толщиной 0,15 мм. Пластинки закреплены в рамке. Внутренние расстояния между пластинками определяются исходя из размеров облучаемого объекта. В нашем опытном образце монитора внутреннее окно имеет диаметр 60 мм. Пластинки параллельны между собой и перпендикулярны оптической оси ускорителя. Платформа устройства заземлена. Механическая часть устройства позволяет вращать блок эмитирующих электродов на 180° с фиксацией угла поворота в каждой точке измерения при одновременном параллельном измерении токов со всех электродов. При прохождении через пластинки электронов высокой энергии на них возникает положительный сигнал за счет эмиссии с их поверхности вторичных дельта-электронов.

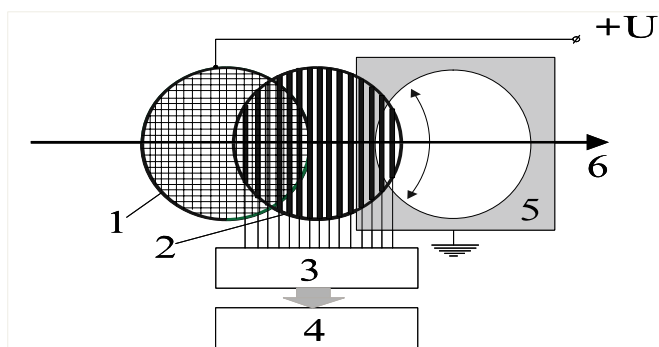


Рис. 1 Структурная схема монитора.

- 1 - собирающий электрод, 2 - электроды эмиссии,
- 3 – измерительное устройство, 4 - вычислительная машина,
- 5 – платформа устройства с приводом вращения,
- 6 - падающий пучок заряженных частиц.

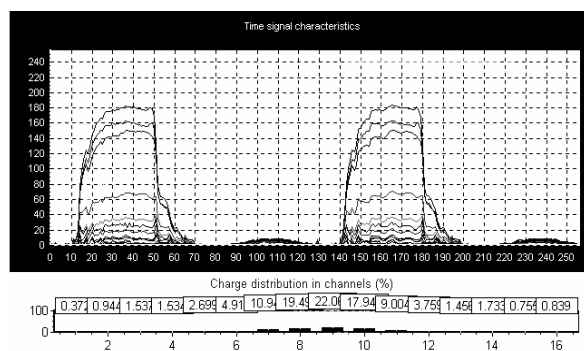


Рис.2 Видеogramма процесса измерения сигналов с монитора

Сигналы с монитора амплитудой до 800 мВ (рис.2) по кабелям РК75 длиной около 40 м подаются через коммутатор на вход аналого-цифровых преобразователей [2]. Монитор устанавливался в атмосфере на расстоянии $L=120$ мм от плоскости выпускной фольги ускорителя. Центр внутреннего окна монитора с помощью специальных винтов совмещается с оптической осью ускорителя.

При работе монитора в атмосфере может иметь место нелинейная зависимость получаемого на пластинках заряда от интенсивности первичного пучка из-за оседания на пластинках заряженных частиц ионизированной атмосферы и вторичных электронов с низкой энергией. Однако эти процессы в нашем случае оказывают незначительное влияние. В работе [3] нами показано, что вторично-эмиссионный ток с алюминиевых пластин в данном диапазоне энергий прямо пропорционален заряду пучка электронов. Коэффициент вторичной эмиссии равен 3,1 %. На рис. 2 приведены серии импульсных сигналов с пластин монитора. Площадь импульсов прямо пропорциональна суммарному заряду электронов, попавших в пластины монитора.

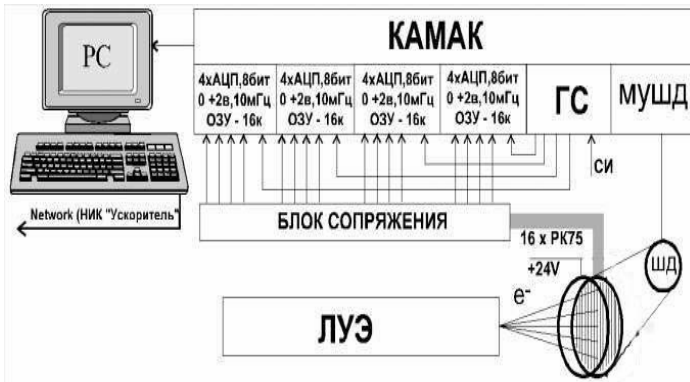


Рис.3 Функциональная схема системы контроля профилей пучка.

АЦП – аналого-цифровые преобразователи,
ГС – модуль синхронизатор, ШД – шаговый двигатель,
МУШД – модуль управления шаговым двигателем

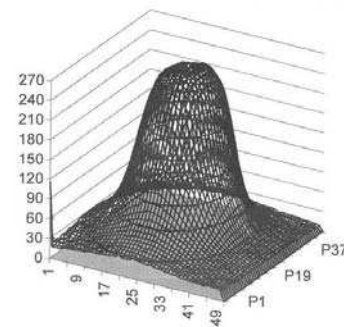


Рис.4 3D-распределение плотности затемнения стекла под действием серии импульсов электронов ускорителя КУТ в плоскости монитора (120 мм от выпускной фольги).

Измеренные значения токов передаются в вычислительную машину (рис.3), где накапливаются профили пучка, измеренные под разными углами поворота монитора, а затем с помощью математических методов компьютерной томографии вычисляется плотность распределения заряженных частиц в поперечном сечении пучка и положение пучка относительно эмитирующих электродов.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПО ПРОФИЛЯМ ПУЧКА

Как уже было показано выше, величина сигнала с пластины монитора пропорциональна суммарному заряду электронов, попавших в нее. Если ширину пластины устремить к бесконечно малой величине, то суммарный заряд (R) с нее можно представить в виде:

$$R(r, \varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \varphi + y \sin \varphi - r) dx dy, \quad (1)$$

где $f(x, y)$ - функция распределения частиц пучка в плоскости монитора; r – расстояние от начала координат до соответствующей пластины монитора; φ - угол поворота монитора относительно оси X .

Уравнение (1) называется преобразованием Радона. Для решения (1) с целью восстановления функции $f(x, y)$ разработано достаточно много математических методов [4,5]. В нашей работе мы пользовались алгоритмом, приведенным на сервере [5]. В этой работе показано, что если функция R имеет непрерывную производную по r и для ее интерполяции могут быть использованы полиномы 3-й степени, то в дискретной форме восстановленная функция $f(x, y)$ имеет вид (2):

$$f^*(x, y) = 1/(2\pi N) \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M (R(r_i, \varphi_j) S_0(z)), \quad (2)$$

$$S_0(z) = x \cos \varphi_j + y \sin \varphi_j + a + (1-i)h, \quad (3)$$

$$z = x \cos \varphi_j + y \sin \varphi_j, \quad r_i \leq a, \quad 0 \leq \varphi_j < \pi,$$

где M – количество пластин; N – количество поворотов; a – радиус внутреннего окна; h – шаг расстановки пластин.

Ясно, что шаг сетки (x, y) , в узлах которой вычисляется функция (2) должен превышать ширину пластины монитора. Для оценки размеров сечения и вида функции распределения частиц в плоскости монитора нами

использовался фотометрический метод. На рис. 4 показаны результаты фотометрирования плотности распределения электронов в пучке. Толщина используемого для фотометрии стекла была равна 3 мм.

Для получения количественной оценки плотности распределения электронов в пучке использовался сканер EPSON 1660. При этом мы традиционно исходили из предположения, что при коротких экспозициях степень потемнения стекла линейно связана с плотностью распределения электронов в пучке. Результаты, приведенные на рис. 4, получены при импульсном токе 0,5 А и энергии электронов 12 МэВ (количество импульсов равно 400). Видно, что плотность распределения электронов в пучке близка к нормальной. Поэтому использование алгоритмов из работы [5] в нашем случае оправдано.

Погрешность оценки плотности распределения определяется несколькими факторами.

1. Шаг сетки (x,y) , в узлах которой вычисляется функция (2), не должен быть меньше ширины пластины монитора. Соответственно, если функция $f(x,y)$ имеет пики, у которых ширина основания меньше ширины пластин, то эти пики при восстановлении будут сглажены.

2. Погрешность измерения значений сигналов с пластин монитора определяется параметрами измерительного канала. В нашем случае использовались 8-разрядные АЦП с частотой квантования 10 мГц. Соответственно, относительная ошибка измерения величины R зависела от амплитуды сигнала с пластин (рис.2) и колебалась от 1 до 10%.

3. Для выбора количества пластин (M) эмитирующего электрода и числа поворотов монитора (N) были рассчитаны значения функции $f(x,y) = \exp(-(y^2+x^2))$ при изменении переменных x и y от +4 до -4 с шагом 0,2. И для разных вариантов значений M и N рассчитывались значения интегралов R . Затем для каждого значения интеграла R по формулам (1-3) рассчитывались значения функции $f^*(x,y)$ в тех же точках, что и исходная функция $f(x,y)$. Для оценки погрешности восстановления функции распределения вышеуказанным методом вычислялся усредненный квадрат разности $d2 = (f^*(x,y) - f(x,y)/k)^2$, где k - количество узлов сетки. Результаты расчетов приведены на рис. 5. На основании этих данных нами выбраны параметры опытного образца монитора: $M=16$; $N=32$; $a=30$ мм; $h=3,2$ мм. Можно ожидать, что в этом случае погрешность восстановления функции $f(x,y)$ в каждой точке будет не хуже 10%.

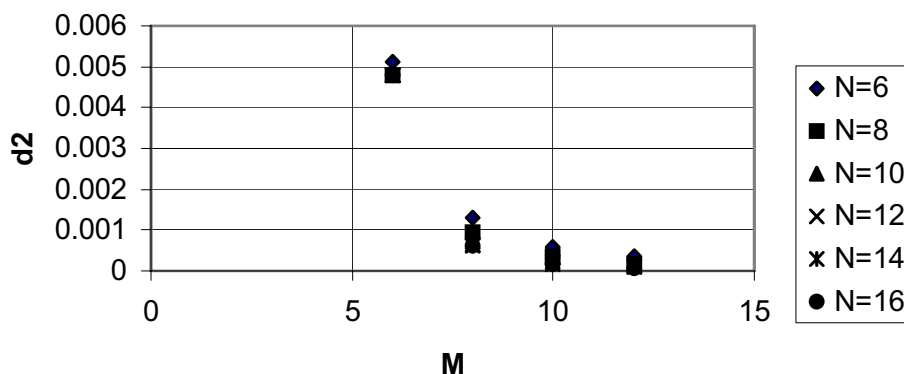


Рис.5 Зависимость погрешности ($d2$) восстановления функции распределения от количества пластин (M) и числа поворотов монитора (N).

На рисунках 6,7 приведены результаты опытного использования монитора на односекционном технологическом ЛУЭ КУТ [6].

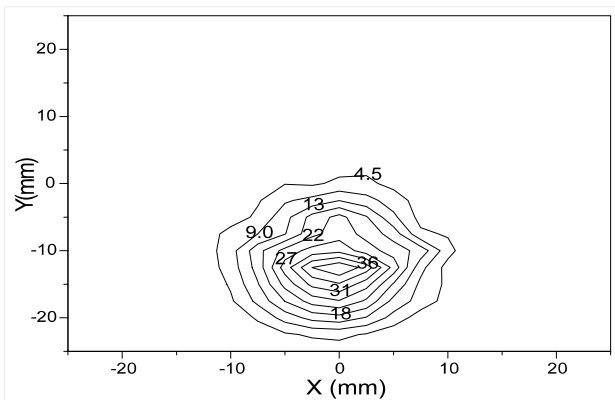


Рис.6. Пример томографической реконструкции плотности распределения частиц в пучке ускорителя КУТ. Расстояние от выпускной фольги до монитора 120 мм.

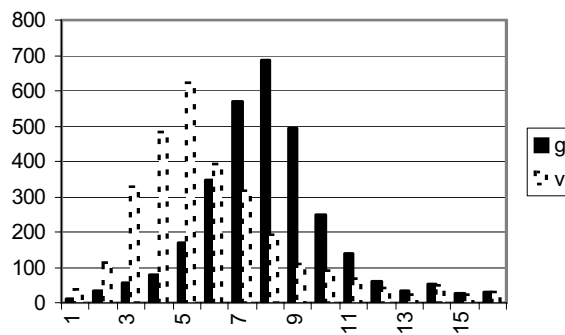


Рис.7. Гистограмма сигналов с пластин монитора. Горизонтальный (g) и вертикальный (v) профили пучка ускорителя КУТ.

ВЫВОДЫ

Проведенные разработки метода измерения двумерной плотности распределения электронов в пучке позволили смоделировать и создать опытный образец профилометра вторичной эмиссии для работы в атмосфере. Экспериментальные исследования показали возможность использования измеренных под разными углами профилей пучка заряженных частиц для реконструкции их двумерной плотности распределения методом компьютерной томографии.

Канал оперативного контроля профиля пучка в настоящее время проходит опытные испытания на ускорителе КУТ.

Авторы благодарны А.Н. Довбне, Ю.П. Степановскому и В.Л. Уварову за полезные советы и обсуждение результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M.I. Ayzatsky, V.N. Boriskin, A.M. Dovbnya et al. The NSC KIPT Electron Linacs –R&D // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations. -2003. -Vol. 2(41). -P.19-24.
2. M.I. Ayzatsky, V.N. Boriskin, V.A. Gurin et al. Multichannel system for research of secondary emission pulse electron beam generation // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations. -2004. -Vol. 1(42). -P.118-119.
3. V.N. Boriskin, V.A. Gurin, V.A. Popenko et al. Monitoring channel of the technological linac beam cross-section // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations. -2001. -Vol. 5(39). -P.147-149.
4. A.Kak, M.Slaney. Principles of computerized tomographic imaging // IEEE Press, NY, 1999. -329p.
5. М.М.Лаврентьев. Условно-корректные задачи. //Российский Фонд Фундаментальных Исследований, гранты: 03-07-90060, 00-07-90342, СО РАН, Новосибирск, 2003. (<http://cs.nstu.ru/ipp/CT/ct2.htm>).
6. A.N.Dovbnya, M.I. Ayzatsky, V.N. Boriskin et al. Electron Linacs Based Radiation Facilities of Ukrainian National Science Center KIPT / Bulletin of the American Physical Society, May 1997. -V.42. -No.3. -P.1391.

THE DISTRIBUTION DENSITY MONITORING OF THE ELECTRON BEAM IN AIR

N.I. Ayzatsky, V.N.Boriskin, V.A.Gurin, A.N.Savchenko, A.A.Sarvilov, V.I.Tatanov

Scientific-Production Complex "Accelerator"

National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology"

Ukraine, 61108, Kharkov, 1, Academicheskaya St.

E-mail: boriskin@kipt.kharkov.ua

The method of measurement of two-dimension distribution density in electron beam by secondary emission monitor is developed. The monitor work with electron beams of energy up to 12 MeV and of pulse currents up to 1 A is researched. The beam cross-sections were measured at different angles of monitor turn. The probability was demonstrated to use obtained data for reconstruction of two-dimension distribution density in electron beam by computer tomography method.

KEY WORDS: electron beam, monitor, secondary emission, computer tomography