

# Высокочувствительные ионизационные многопараметрические датчики для диагностики ускоренных пучков

С.Т.Латушкин, В.Г.Михайлов, В.Х.Лихтенштейн,  
В.А.Резвов, В.И.Скляренко, Л.И.Юдин  
РНИЦ “Курчатовский Институт”, Москва, Россия

## Особенности работы датчика сечения пучка

В Курчатовском институте [1, 2, 3] предложены способ и устройство ионизационного датчика для оперативного наблюдения реального пространственного распределения тока пучка по его сечению. Ионизационный датчик изображения сечения пучка (ДИСП) отличается от известных профилометров [4] использованием электростатического анализатора, размещённого после коллимирующей щели экстрактора (рис.1).

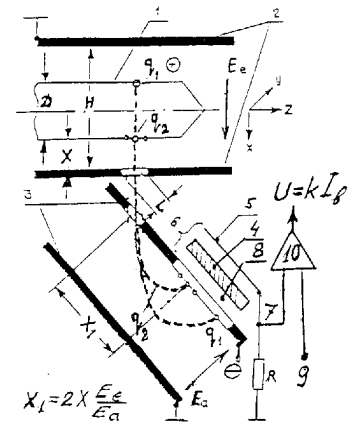


Рис. 1: Структура ионизационного датчика изображения сечения пучка 1 – исследуемый пучок; 2 – экстрактор; 3 – анализатор; 4 – МКП; 5 – экран с люминофором 6 – открытый ЭОП; 7 – выходной сигнал для мониторинга тока пучка; 8 – дополнительный ускоряющий промежуток; 9 – корректирующий сигнал; 10 – регулируемый усилитель.

Здесь частицы ионизованного остаточного газа (ионы или электроны) анализируются по их энергии. Энергия частиц определяется электростатическим потенциалом в точке их возникновения на различных уровнях апертуры экстрактора. Анализатор размещён под углом  $45^\circ$  к направлению извлечения ионов и к плоскости анализатора. Это обеспечивает линейную связь размеров полученного двумерного изображения с размерами сечения исследуемого пучка. Легко показать, что размер  $X$  в сечении пучка (рис.1) линейно связан с размером его изображения  $X_1$  выражением  $X_1 = 2 \cdot X \cdot E_e / E_a$ , где  $E_e$  и  $E_a$  — напряжённости электростатического поля экстрактора и анализатора [5].

Открытый электронно-оптический преобразователь на базе МКП формирует на люминисцентном экране оптическое изображение реального сечения пучка. Промышленная ТВ камера используется для записи оптического изображения сечения с целью последующего представления и обработки (рис.2). Такой датчик позволяет оперативно и без разрушения пучка контролировать реальную форму и размеры сечения ускоренного пучка, распределение плотности тока пучка по его сечению, положение

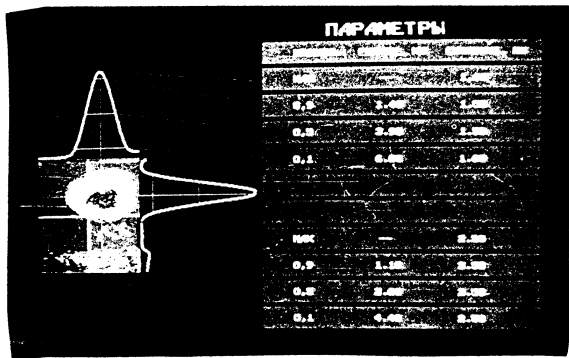


Рис. 2: Пример изображения сечения пучка на мониторе компьютера.

### Чувствительность датчика

Абсолютная чувствительность датчика, естественно, зависит от массы, зарядности, энергии исследуемого пучка, от величины давления и состава остаточного газа в объеме датчика и от ширины извлекающей щели  $L$  выходного электрода экстрактора. Оценки показывают [6], что устройство позволяет регистрировать ионизирующие потоки частиц, создающие на входной поверхности ЭОП плотность потока ионов  $\sim 100 \text{ частиц/мм}^2 \text{ сек}$ . Это соответствует при давлении  $10^{-5}$  Торр плотности пучка протонов с энергией 30 МэВ порядка  $10^{-10} \text{ А/мм}^2$ .

### Разрешающая способность

Разрешающая способность устройства диагностики в целом зависит от размера щели  $L$ , поскольку он прямо влияет на разрешение анализатора по энергии. Уширение изображения на входе ЭОП определяет величину  $L/D$ , где  $D$  — размер исследуемого пучка по вертикали. Например, при  $D=10$  мм и допустимом разрешении 10% допустимая величина  $L=1$  мм. Для  $D=10$  мм и разрешении 1% допустимая ширина щели 0,1 мм. Как показано в работе [4], большинство ионов остаточного газа имеют энергию в пределах 0,02 эВ в диапазоне энергий ионизирующих пучков 0,01–100 МэВ. Поэтому можно пренебречь смещением регистрируемых ионов за счёт их собственных скоростей при характерных напряжённости полей в датчике  $E=1-2$  кВ.

Деформация изображения сечения пучка под действием внешних магнитных полей и объёмного заряда пучка также рассматривалась в [6, 5]. При характерных зазорах между электродами экстрактора и анализатора  $\sim 3 - 4$  см и напряженности электрического поля в них 1–2 кВ/см магнитные поля с индукцией 0,01 Тл приводят к деформации изображения не более чем на 1 мм.

### Сбор и обработка информации

Оптический сбор информации о параметрах сечения пучка выгодно отличается от обычно используемого считывания сигналов с большого количества токоприёмных электродов. В этом случае исключаются различного рода помехи, связанные с уравнительными токами по земляным цепям. В результате заметно повышается чувствительность. Исключается большое количество проходных вакуумных разъёмов. Улучшается разрешающая способность датчиков. Использование стандартного промышленного телевидения обеспечивает оперативный визуальный контроль сечения

центра тяжести сечения пучка и его смещение от оси ионопровода. Следует отметить, что выходной ток ЭОП в пределах его линейности при стабильном вакууме отображает величину тока ускоренного пучка в непрерывном и в импульсном режимах.

Очевидно, что ионизационные датчики могут успешно использоваться для регистрации пучков любого ионизирующего излучения, например пучков синхротронного излучения, пучков ускоренных нейтральных частиц.

пучка по большому числу каналов. Современные средства мультимедиа позволяют оцифровать, запомнить и исследовать любое изображение сечения пучка в процессе работы и сохранить его для последующего сравнительного количественного анализа изображений.

### **Экспериментальные результаты и развитие работ**

В соответствии с рис.1 элементы конструкции датчика размещаются на двух противоположных фланцах. Фланцы встраиваются в бокс, размещаемый на ионопроводе. Характерные размеры фланцев DN100ISO и DN160ISO. Для специальных задач (например, широкий плоский пучок) возможны более сложные конструкции. В датчиках используются по две МКП с общим усилением до  $10^7$ . Рабочее давление в ионопроводе  $10^{-5} - 10^{-7}$  Торр, пространственное разрешение при визуальном контроле не хуже 1 мм. Поле обзора датчиков пучка от  $30 \times 30$  мм до  $300 \times 50$  мм. По измерениям при указанных параметрах порог чувствительности для различных ионов в широком диапазоне энергий не превышает десятков нА тока пучка на  $1 \text{ см}^2$  его сечения. На ускорителе UNILAC (GSI, Дармштадт) были проведены сравнительные измерения положения и размеров сечения пучка для описываемого ионизационного датчика и датчика на базе ортогональных проволочек [7]. Многочасовые экспозиции с пучком ионов селена  $Se_{12}^{82}$  в диапазоне токов 50 нА – 5 мкА при энергии 360 МэВ подтвердили подобие изображений сечения пучка и стабильность его работы.

### **Контроль тока пучка**

Как следует из работы [1], выходной ток ЭОП в пределах его линейности при стабильном вакууме однозначно отображает величину тока исследуемого пучка как в непрерывном, так и в импульсном режимах. Предложена коррекция измерения тока экрана ЭОП для исключения влияния нестабильного вакуума на количественные измерения (рис.1). Дополнительный электрический сигнал с вакуумметра в соответствующем масштабе и знаке подается на регулируемый усилитель тока с экрана ЭОП. Результирующий сигнал на выходе усилителя с достаточной точностью отражает величину тока исследуемого пучка.

### **Коррекция смещения пучка**

Предложена и реализована конструкция экрана ЭОП с люминофором, поделённого на четыре квадранта. Каждый квадрант изолирован от соседних, сопротивление утечки не менее 1 МОм. Поэтому ток каждого квадранта пропорционален интегральному значению тока части отображения сечения исследуемого пучка, приходящегося на соответствующий квадрант. При этом изображение сечения пучка на экране ЭОП остаётся практически прежним. Раздельное измерение тока каждого квадранта позволяет получить с выходов ионизационного датчика через суммирующие усилители электрические сигналы, пропорциональные смещению центра тяжести сечения пучка вверх-вниз и влево-вправо. Эти сигналы могут непосредственно использоваться через цепи обратной связи для оперативного управления соответствующими коректорами положения пучка в ионопроводе.

### **ДИСП для пучков с низкой энергией**

Для наблюдения за сечением пучков с низкими энергиями 10–100 кВ в схему датчика введены компенсаторы, возвращающие частицы на выходе датчика на осевую

линию тракта транспортировки (рис.3). Первая проверка работы датчика с компенсаторами смещения проводилась с ионами водорода при энергиях 20-25кэВ. По визуальному контролю смещение центра тяжести пучка на выходном экране не выходило за доли миллиметров. Это смещение объясняется, по-видимому, недостаточно точно выставленной геометрией элементов датчика и будет в дальнейшем устранено. Максимальное отклонение пучка имеет место в середине экстрактора и равно  $h = E \cdot d^2 / (2 \cdot W)$ . Например, при энергии пучка  $W=20$  кВ для характерных параметров  $H=4$  см;  $d=4$  см;  $D=1$  см, напряженность поля экстрактора  $E=2$  кВ/см, смещение пучка  $h_{max} = 0,8$  см.

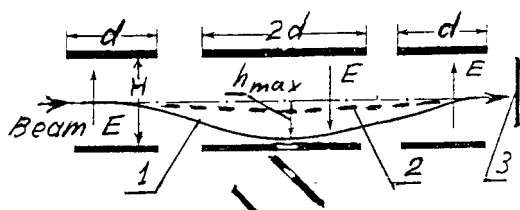


Рис. 3: Структура датчика для контроля частиц с низкой энергией. 1 – траектория пучка для высокой напряженности поля; 2 – траектория для низкой напряженности поля; 3 - люминисцентный экран.

Изменение энергии пучка  $W$  или напряжения на электродах датчика приведет к смещению пучка по оси  $X$ , которое может быть истолковано как реальное смещение пучка. Прямым путём уменьшения величины смещения пучка в экстракторе  $h_{max}$  и на выходе датчика является снижение напряжения на экстракторе. Измерения показали, что снижение напряжения на порядок ведёт к уменьшению эффективности регистрации ионов остаточного газа на входе МКП. Этот результат хорошо коррелирует с исследованиями, опубликованными в [8] для ионов. Поэтому в настоящее время в конструкцию датчика вводится промежуток между анализатором и входной МКП ЭОП для дополнительного ускорения регистрируемых частиц (поз.8 на рис.1).

### Контроль микросгустков пучков

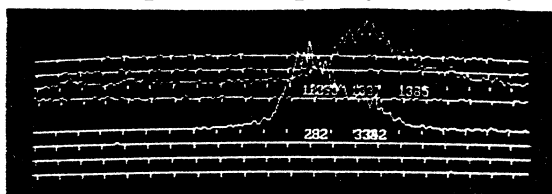


Рис. 4: Изображение микросгустков пучка → циклотрона с двух временных датчиков при измерении энергии пучка. Метки времени – 1 нс.

Сигналов выходного тока ЭОП от каждого микросгустка позволяют получить интегральную форму, обработанную и представленную на ЭВМ. На циклотроне РНЦ КИ в настоящее время установлены и подготовлены к установке несколько таких датчиков в различных участках ионопроводов. На пролётной базе 12 м это обеспечит измерение энергии с разбросом не хуже 0,5%.

### Заключение

Разработаны и многократно успешно апробированы различные модификации многопараметрических ионизационных датчиков для пучков ионизирующих излучений. Несколько ДИСП установлены на циклотроне РНЦ КИ.

Проведены первые испытания работы датчика в области низких энергий, успешно прошли испытания датчика в области энергий пучков в сотни МэВ.

Развивается электроника для визуализации и оцифровки регистрируемых сигналов. Подготавливаются эксперименты по регистрации пучков СИ и нейтральных пучков.

Продолжаются работы по созданию базовых конструкций датчиков для расширенного применения.

Опыт работы с подобными устройствами подтверждает богатые возможности для использования на разнообразных ускорителях в широком диапазоне интенсивностей, энергий, типов исследуемых пучков для научных исследований и прикладных работ.

Работа поддержана Российским Фондом фундаментальных исследований, грант 94-02-4133г, грант 95-02-07558г.

## Литература

- [1] Михайлов В.Г., Резвов В.А., Скляренко В.И., Юдин Л.И. и др. Труды 8-го Всесоюз. совещ. по УЗЧ, т.2, стр. 336, Дубна 1983.
- [2] Резвов В.А., Юдин Л.И. А.с. №1392645 СССРю БИ. 1988, №16, стр. 32.
- [3] Михайлов В.А., Резвов В.А., Скляренко В.И., Юдин Л.И. А.с. №1962528 СССР БИ. 1989 №8, стр. 294.
- [4] De Luca W.N. IEEE Trans. Nucl. Sci. V NS-16, p. 813.
- [5] V.G. Michailov, A.A. Roschin, Rezvov V.A., L.I. Ioudin at al. Proc. of EPAC-94, London, July 1994, V 2, p. 1743-1745.
- [6] Михайлов В.Г., Леонов В. В., Резвов В.А., Юдин Л.И. и др. ПТЭ 1995, №6, стр. 39-53.
- [7] Rezvov V.A., Ioudin L.I., Hofmann S., Popoko V.G. at al. "Residual gas profil monitorat SHIP, GSI", Scientific report GSI, 1996 ( to be published).
- [8] Tarty H., Bosqued J.M., Reme H. Nucl. Instr. Meth., 69, 254, (1969).