

УДК 621. 384.601(075.8)

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО ПРОФИЛЯ ПУЧКА SPS, ИЗМЕРЕННОГО МЕТОДОМ ИОННО-ЛУЧЕВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Суханова Л.А., Воронцов В.А., Шестак В.П.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ),
Москва, Россия (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31) ppa2009@inbox.ru
rpsqnt@gmail.com*

Приводятся методика и результаты по определению поперечного профиля пучка протонного ускорителя SPS по данным его зондирования ленточным ионным пучком и сравнение полученного профиля с профилем, измеренным проволоочным зондом. В качестве экспериментальных данных были использованы кривые отклонения для различных энергий пучка SPS. Методика их обработки включала в себя разбиение экспериментальных данных на отдельные участки, их усреднение и сглаживание полиномами до шестого порядка включительно. Профиль пучка рассчитывался дифференцированием сглаженной кривой отклонения. Полученные результаты показывают, что в отличие от предположения авторов эксперимента о его симметричности он имеет асимметричный вид, и поперечный размер пучка оказывается меньше размера, указанного авторами эксперимента. Они подтверждают перспективность применения метода корпускулярного зондирования для диагностики пучков заряженных частиц ускорителей на высокие энергии.

Ключевые слова: ускорители заряженных частиц, диагностика пучков заряженных частиц, электронно-лучевое и корпускулярное зондирование.

THE SPS BEAM TRANSVERSE PROFILE RECONSTRUCTION BY THE ION BEAM PROBE METHOD

Sukhanova L.A., Vorontsov V.A., Shestak V.P.

*National Research Nuclear University MEPhI (NRNU MEPhI), Moscow,
Russia (115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31) qprsq@yandex.ru*

The methodic and results for the proton accelerator SPS beam transverse profile determination on its ribbon ion beam probing data are presented and the comparison of this profile with the wire probe measured profile is made. The deviation curves for the different SPS beam energies were used as the experimental data. The working methodic has included the data dividing on several parts, their averaging and smoothing by the splines up to the sixth order. The beam profile was calculated by the smoothed deviation curve differentiation. The results are showed that the profile is asymmetric, this contradicts the experiment author consumption, and the beam dimension is less than their beam dimension. The results show that the application of the corpuscular beam probe method is perspective for the accelerated charged particle beams diagnostic.

Key words: the charged particle accelerators, the charged particle beam diagnostic, electron and corpuscular beam probing.

Развитие ускорительной техники предполагает расширение и совершенствование средств измерения и контроля различных параметров и характеристик пучков заряженных частиц. Диагностика пучка осуществляется как для исследования его динамики в процессе ускорения для обеспечения требуемых параметров пучка на выходе ускорителя, так и для наладки и настройки ускорителя или накопителя, точной установки уровня интенсивности

пучка при постановке эксперимента, исследования различных режимов ускорителя, создания систем автоматического управления работы установки и т.д.

Разнообразие методов и средств диагностики пучка заряженных частиц связано с необычайно широким спектром как типов самих пучков, их параметров и характеристик, так и способов их получения и использования в фундаментальных и прикладных исследованиях, проводимых с помощью ускорительной техники.

Предварительное ознакомление с применением метода корпускулярного и, в частности, электронно-лучевого зондирования для измерения параметров пучков заряженных частиц показало его перспективность и значительные потенциальные возможности. Электронный зонд как первичный преобразователь обладает такими достоинствами, как прозрачность, быстродействие, универсальность. Согласно известной классификации он может быть отнесен к комбинированному корпускулярно-полевому типу, так как информация об электромагнитном поле исследуемого пучка собирается и переносится частицами зондирующего пучка, попадающими после зондирования на коллектор.

Простейшая схема электронно-лучевого зондирования нерелятивистского, несгруппированного пучка заряженных частиц может быть описана следующим образом. Зондирующий пучок электронов движется в плоскости, перпендикулярной направлению движения исследуемого пучка, отклоняясь под действием его электрического поля в вертикальном направлении, и поступает на коллектор, размещенный в плоскости, ортогональной его движению. Так как угол зондирования, равный углу между направлениями движения исследуемого и зондирующего пучков, является прямым, такая схема называется схемой нормального зондирования.

Изменяя положение электронной пушки, расположенной в плоскости, ортогональной оси инжектора, в вертикальном направлении, можно снять зависимость отклонения зондирующего электронного пучка на коллекторе от вертикальной координаты положения электронной пушки, определяющей плоскость зондирования, так называемую кривую отклонения. Она имеет характерный максимум, примерно соответствующий границе исследуемого пучка. Информация о его параметрах и характеристиках заключена в возрастающей части кривой отклонения.

Набор параметров и характеристик исследуемого пучка при электронно-лучевом зондировании определяется моделью исследуемого пучка, согласованной с выбранным способом его диагностики, в данном случае электронно-лучевым зондированием.

Одной из наиболее актуальных задач диагностики пучков ускорителей заряженных частиц является измерение поперечного профиля. Особенно важно знать профиль и

положение центра тяжести для встречных пучков. Применение традиционных способов нахождения профиля не всегда оправдано ввиду непрозрачности первичного преобразователя и невысокой точности результатов.

Результаты зондирования протонного пучка SPS ленточным пучком ионов Хе, полученные в [1,2], показаны на рис.1.

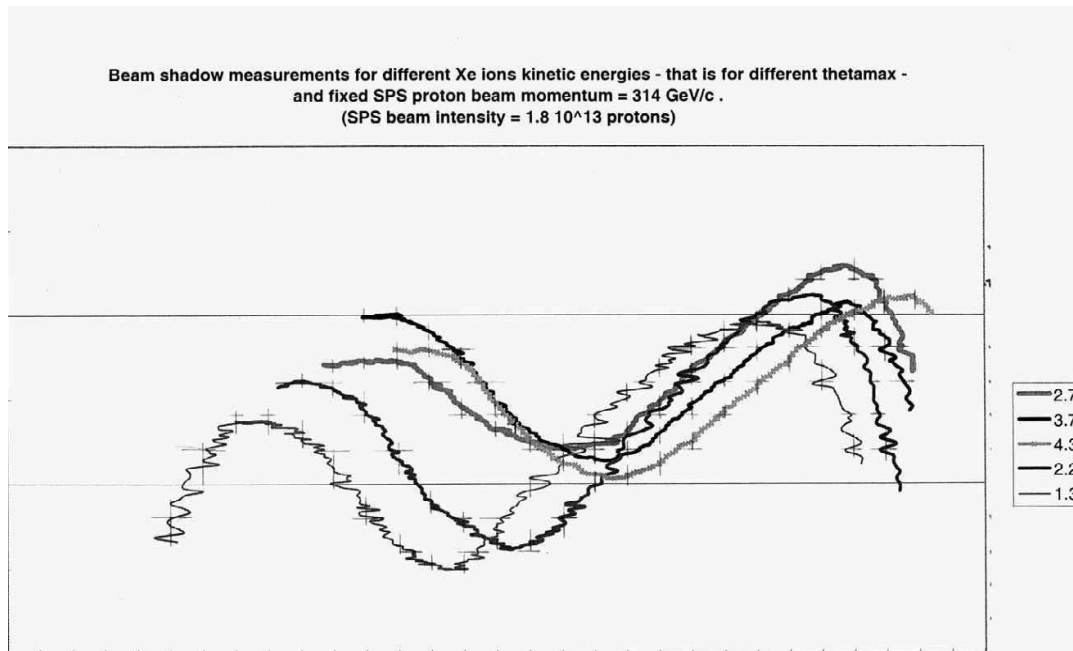


Рис. 1. Экспериментальные кривые отклонения, энергия SPS пучка 314 ГэВ, интенсивность пучка $1.8 \cdot 10^{13}$, энергии зондирующего Хе ионного пучка:

2.7 кэВ, 3.7 кэВ, 4.3 кэВ, 2.2 кэВ, 1.3 кэВ

Они предполагают априори аппроксимацию плотности поперечного распределения заряда исследуемого пучка нормальным распределением и последующее нахождение его среднего и дисперсии. Однако подобный подход некорректен при измерении профиля пучка с распределением заряда, отличным от нормального. Сравнение параметров нормального распределения, полученных теоретически и по данным измерения профиля проволочным зондом, по мнению авторов эксперимента, даёт вполне удовлетворительное их совпадение.

На кафедре электрофизических установок НИЯУ МИФИ в течение ряда лет проводятся работы по исследованию корпускулярной диагностики пучков заряженных частиц как теоретического, так и экспериментального характера [3,4,5]. В частности, разработан метод определения профиля исследуемого пучка при зондировании его ленточным пучком. Этот метод был применён для обработки экспериментальных данных по ионно-лучевому зондированию пучка SPS, приведенных в [1,2]. Он заключается в параметризации прицельного параметра и кривой отклонения, выражаемых через плотность распределения заряда ленточного зондирующего пучка на плоскости регистрации.

Для применения предлагаемого метода определения профиля пучка был разработан комплекс программ, включающий преобразование и масштабирование данных эксперимента, их кусочную аппроксимацию, интерполяцию и дифференцирование полученной сглаживающей кривой, составление библиотеки экспериментальных данных, кривых отклонения и соответствующих им профилей. Преобразование и масштабирование данных эксперимента представляет собой их сканирование, определение и замену координат точек и представление их в виде текстового файла.

Кусочная аппроксимация методом средних квадратов предполагает произвольный выбор расположения и количества точек и использование кубичного сплайна. Участки разрыва заполняются интерполяционными полиномами шестой степени, сохраняющими гладкость аппроксимирующей кривой и её производной. Библиотечные данные являются файлами, содержащими графики экспериментальных данных, кривых отклонения и их профилей.

Полученные экспериментальные данные были обработаны по указанной методике с применением описанного программного комплекса. Некоторые из них приводятся в настоящей работе.

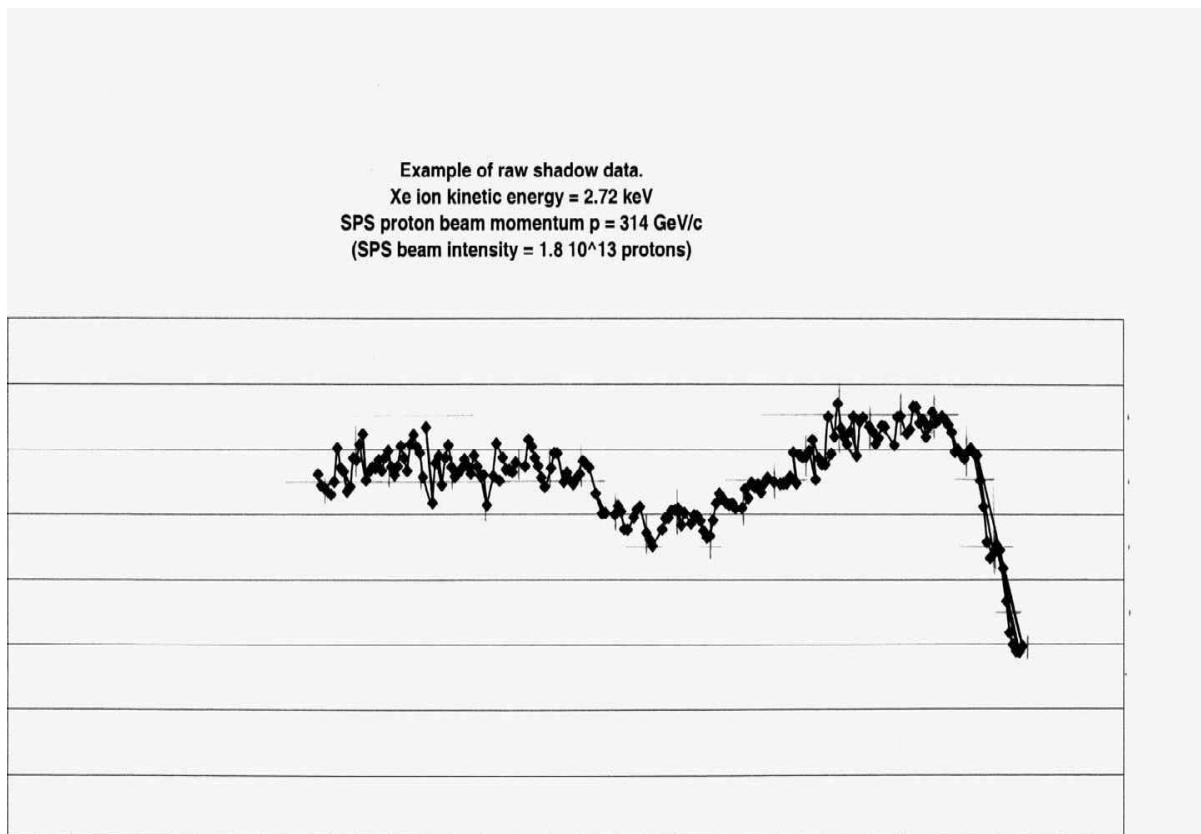


Рис. 2. Экспериментальные кривые отклонения, энергия SPS пучка 314 ГэВ, интенсивность пучка $1.8 \cdot 10^{13}$ для энергии зондирующего Хе ионного пучка: 2.7 кэВ

На рис. 2 приведены экспериментальные данные по одной из кривых отклонения, полученных в ходе эксперимента при зондировании пучком ионов Хе пучка протонов SPS с энергией 314 ГэВ и интенсивностью $1.8 \cdot 10^{13}$ частиц в сгустке.

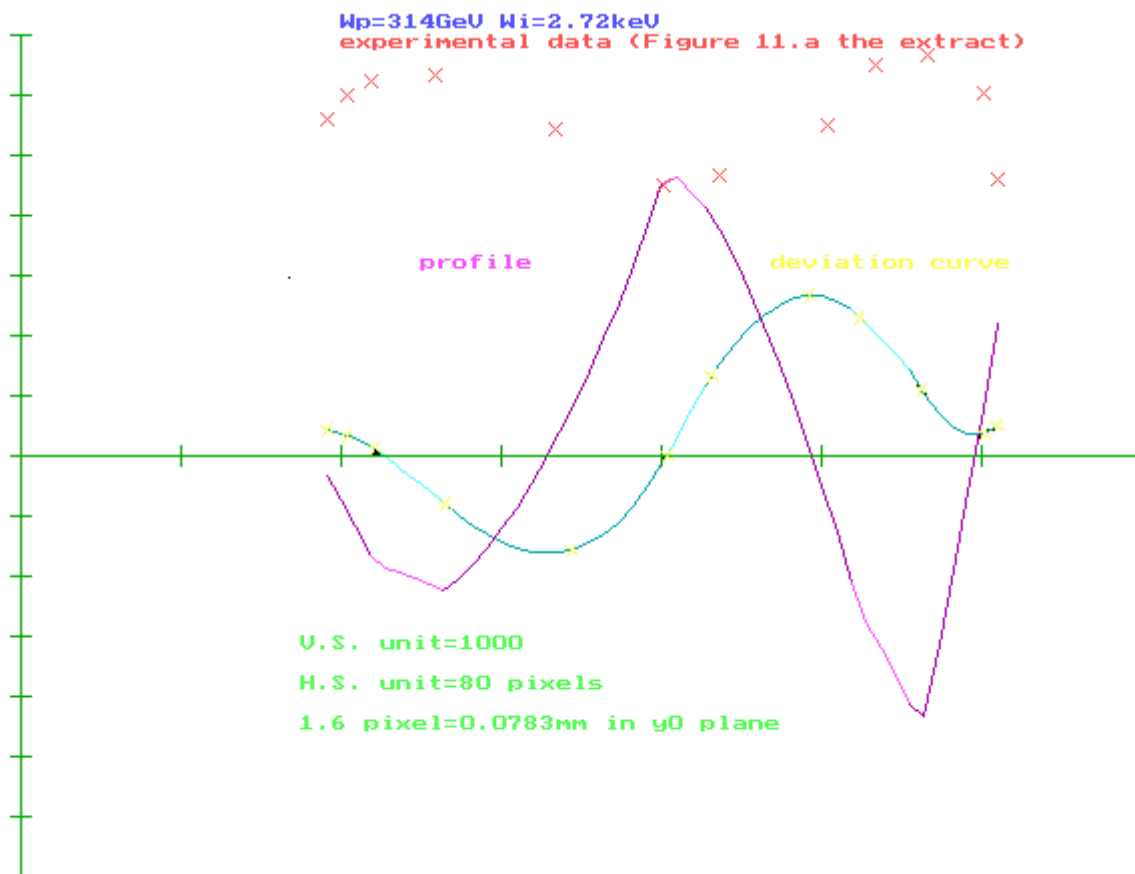


Рис. 3. Расчётная кривая отклонения и поперечный профиль пучка SPS с энергией 314 ГэВ, и интенсивностью $1.8 \cdot 10^{13}$ для энергии зондирующего Хе ионного пучка: 2.7 кэВ

× – сглаженная экспериментальная кривая отклонения,
 deviation curve (жёлтый цвет) – расчётная кривая отклонения,
 profile (фиолетовый цвет) – поперечный профиль пучка протонов,
 данные масштабирования (зелёный цвет).

По этим экспериментальным данным, изображённым на рис 3. крестиками, согласно описанной выше методике, была построена расчётная кривая отклонения, имеющая гладкость полинома шестой степени, показанная на рис. 3 под надписью deviation curve жёлтого цвета. Разноцветные участки этой кривой соответствуют набору полиномов третьей и шестой степени, аппроксимирующих данные эксперимента. Полиномы третьей степени выделены тёмным цветом, а сглаживающие их полиномы шестой степени выделены светлым

цветом. Полученная кривая отклонения была продифференцирована, в результате чего был определён поперечный профиль пучка протонов, расположенный на рис. 3 справа от надписи rprofile. Он определяется только монотонно возрастающей частью кривой отклонения и принимает, соответственно, только положительные значения. Остальные участки кривой отклонения и её производной не имеют физического смысла.

Результаты расчётов, проведенных для исследуемых и зондирующих пучков различных энергий, позволяют определить не только формы профилей пучков SPS, имеющие асимметрию, но и границы сечения пучков и их центры тяжести. В отличие от работы [1], где приведен профиль цуга сгустков, усреднённый по поперечному сечению камеры, в настоящей работе наряду с указанным профилем получены профили цуга сгустков, усреднённые по поперечному сечению сгустка. Для встречных пучков именно эти профили определяют светимость пучка. Они показывают, что реальный поперечный размер пучка, видимо, меньше, чем соответствующий размер, определённый по поперечному профилю из работы [1].

Полученные результаты указывают на перспективность применения корпускулярной диагностики для определения таких параметров встречных пучков, как поперечный профиль, поперечный размер, центр тяжести поперечного сечения.

Список литературы

1. J. Bosser, A. Feschenko, R. Maccaferri

Ion profilometer for the SPS and LHC accelerators. Unpublished.

2. J. Bosser, E. Chevallay, C. Dimopoulou, A. Feschenko, R. Maccaferri

Ion curtain profilometer // Preprint CERN. – 1999. – PS/BD/Note 99-15.

3. Воронцов В.А., Гуторов Д.А., Шестак В.П. Метрологическая аттестация метода корпускулярной диагностики.// Научная сессия МИФИ-2002. – Сб. научных трудов. – Т.7 – С.185.

4. Воронцов В.А., Шестак В.П. Реконструкция поперечного профиля пучка SPS, измеренного методом ионно-лучевого зондирования.// Научная сессия МИФИ-2002. – Сб. научных трудов. – Т.7. – С. 190.

5. Воронцов В.А., Гуторов Д.А., Шестак В.П. Перспективы развития корпускулярной диагностики пучков УЗЧ. Научная сессия МИФИ-2003. Сб. научных трудов. – Т.7. – С.145.

Рецензенты:

Собенин Н.П., д.т.н., профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва.

Шиканов А.Е., д.т.н., профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва.