

УДК 621.384.6

ПОПЕРЕЧНОЕ СКАНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ИНЖЕКТОРА ЕРЕВАНСКОГО СИНХРОТРОНА С ПОМОЩЬЮ СКАНЕРА НА ВИБРИРУЮЩЕЙ СТРУНЕ

А.Э. АВЕТИСЯН, С.Г. АРУТЮНЯН, И.Е. ВАСИНЮК, М.М. ДАВТЯН

Национальная лаборатория им. А.И. Алиханяна, Ереван

(Поступила в редакцию 17 февраля 2011 г.)

Для сканирования электронных пучков с большими поперечными размерами пучка разработан Сканер на Вибрирующей Струне (СВС) с расширенной апертурой. Тестовые эксперименты проведены на электронном пучке инжектора Ереванского синхротрона с энергией 40 МэВ и током 4–10 мкА в открытой атмосфере. Разработана конструкция СВС для сканирования пучков с еще большими поперечными размерами. Данная разработка является новым прецизионным инструментом диагностики пучков в ускорителях, причем за счет универсальности используемого принципа действия она может быть с успехом применена также для профилирования протонных и ионных пучков с большой апертурой.

1. Введение

Принцип действия сканера на вибрирующей струне основан на зависимости частоты собственных колебаний струны от натяжения струны [1]. В наших предыдущих разработках была использована схема непосредственного прохождения измеряемого пучка через вибрирующую струну. Для возбуждения собственных колебаний струны было использовано взаимодействие между струной и полем постоянного магнита. Для согласования длины струны с параметрами сканирования пучка была предложена достаточно удобная схема: два концевых участка струны находились в магнитном поле, а средняя зона оставлялась свободной для сканирования пучка. Обычно длина струны выбирается в области десятков мм (30–60) и центральная свободная зона струны составляет порядка одной трети длины струны, т.е. 10–20 мм. Для пучков с миллиметровыми поперечными размерами эта схема работает удовлетворительно. Однако для пучков с размерами, большими апертуры СВС, или при измерении области гало пучка некоторые частицы пучка ударяются о детали СВС (магнитная система, зажимы струны, держатели, винты и т.д.). Этот эффект был отмечен в работе [2], где СВС использовался для измерения гало протонного пучка ускорителя PETRA. Вид СВС в парк-позиции представлен на рис.1. Отметим, что каждый шаг в градации яркости на рисунке соответствует падению плотности пучка на порядок.

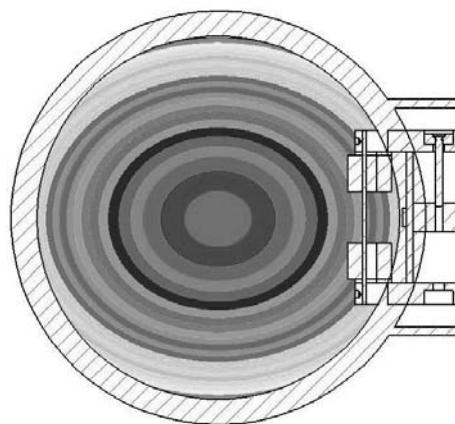


Рис.1. CBC в парк-позиции на ускорителе PETRA.

2. Эксперимент

2.1. Сенсор

Целью эксперимента являлись измерения вертикального профиля электронного пучка электронов с энергией 40 МэВ инжектора синхротрона НЛА (Национальная Лаборатория им. А.И. Алиханяна, ранее Ереванский физический институт). Ток пучка составлял до 10 мкА и предполагаемый поперечный размер пучка около 20 мм.

Такой пучок предполагалось использовать для производства радиоизотопов на базе фотоядерной реакции. Главной задачей было получение изотопа ^{99m}Tc облучением триоксида молибдена электронным пучком, который конвертировался в поток фотонов тормозного излучения в пластине из тантала [3].

В оптимальной магнитной системе магниты расположены в центрах полуволн генерируемой второй гармоники. Так для струны длиной 38 мм расстояние между магнитами составляло 11 мм. Для увеличения апертуры сканера до 20 мм магниты были сдвинуты к зажимам концов струны, но это привело к потере оптимальности схемы возбуждения генерации колебаний. Была разработана специальная ударная схема возбуждения собственных колебаний электромеханического резонатора, компенсирующая этот недостаток.

По сравнению с предыдущими экспериментами были разработаны новые электронные схемы: расположенная в кольцевом зале ускорителя электроника содержала только схему, которая возбуждала колебания струны и усиливала сигнал синусоидальной формы до амплитуды 3 В. Питание для этой электроники и питание для шагового двигателя, а также передача выходных информационных сигналов осуществлялась посредством многожильного кабеля длиной 60 м с сопротивлением 3.4 Ом для каждого отдельного провода. Питание передавалось по двоярным проводам. Информационные сигналы передавались по витым парам: этим подавлялись электрические помехи, вызванные работой сильноточных ускорительных устройств.

2.2. Температурная зависимость СВС

Датчик СВС содержит много составных деталей. Специфическое значение характеристических временных констант каждой из них зависит от температуры. Эти значения зависят от теплоемкости и теплопроводности материала, а также от размеров данной детали. Ситуация также существенно зависит от того, расположен СВС в вакууме или в атмосфере. Тепловая инерция минимальна для тонкой вибрирующей струны и максимальна для несущей базы СВС. Таким образом, отклик периодического термоциклирования СВС сильно зависит от скорости изменения температуры датчика. На рис.2 приведены результаты такого термоциклирования со следующими параметрами: подъем температуры со скоростью 0.5 град/мин до 70°C, выдержка 40 мин, спуск температуры со скоростью 0.5 град/мин до 30°C, выдержка 40 мин. Петля на рис.2 по времени проходит в направлении против вращения часовой стрелки. Гистерезисное поведение на графике обусловлено вышеуказанными различиями тепловых характеристик деталей СВС. Медленная зависимость СВС от температуры окружающей среды оценена приблизительно как -4 Гц/град.

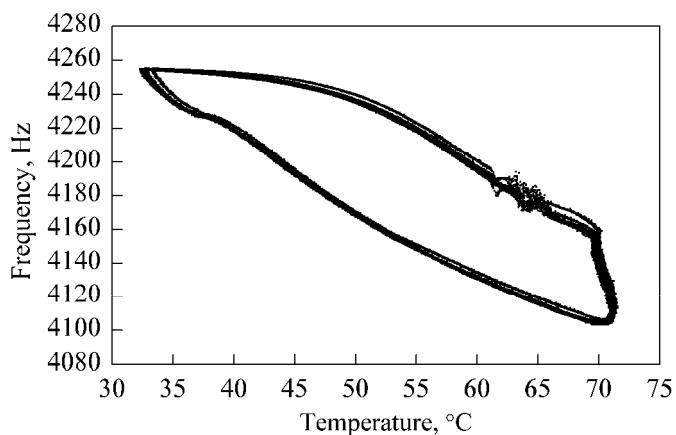


Рис.2. Термоциклирование СВС с периодом 240 мин.

2.3. Сканирование

Во время указанных выше исследований методов производства радиоизотопов использовался электронный пучок линейного ускорителя. Для данной задачи размер пучка являлся важным параметром, поскольку подвергаемый облучению материал представлял собой таблетку с диаметром 18 мм, размер и положение пучка должны были быть согласованы с этим условием. Таким образом, требовалось, чтобы апертура СВС превышала 20 мм.

Для возможности наблюдения взаимодействия пучка с отдельными деталями СВС последние были покрыты люминофорной краской. Изображение визуализировалось видеокамерой. Процесс сканирования представлен на рис.3. Центральное яркое пятно на экране входа в мишень соответствует профилю

пучка. Слайд (А) представляет положение СВС в парк-позиции, апертура датчика отмечена жирными линиями. На слайде (В) показана ситуация, когда пучок касается магнитных полюсов датчика (участки касания показаны стрелками). На слайде (С) видно, что экспонируемая пучком область с продолжением сканирования существенно увеличивается. На последнем слайде (D) показано, как, помимо магнитных полюсов, пучок экспонирует также несущую базу СВС (стрелка сверху вниз).

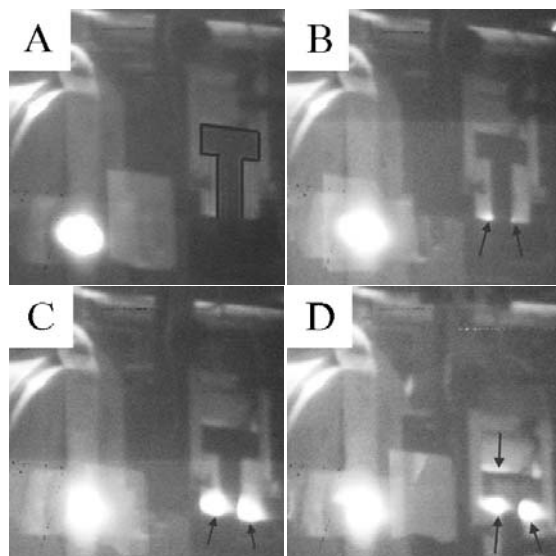


Рис.3. На слайдах В, С и D видно, как визуализируются покрытые люминофором детали СВС при их дальнейшем экспонировании пучком.

Рис.3 показывает, что горизонтальный размер пучка на самом деле больше 20 мм (размер апертуры СВС). Таким образом, большое количество электронов соударяется с деталями СВС и прогревает их. В первую очередь пучок соударяется с внешними деталями магнитной системы и в конце сканирования может пересечься также с несущей базой СВС. Каждая прогреваемая деталь в свою очередь стимулирует два различных процесса воздействия на частоту. Во-первых, происходит смещение точек ущемления струны из-за механических связей прогреваемой детали, во-вторых, посредством различных механизмов теплопередачи происходит воздействие на температуру вибрирующей струны. В наших экспериментах основным процессом теплопередачи являлось конвективное движение воздуха. Расширение точек ущемления струны приводит к увеличению частоты, а прогрев струны, наоборот, приводит к уменьшению частоты колебаний струны. Баланс между этими двумя процессами динамический и существенно зависит от скорости сканирования. Результаты двух таких сканирований на одну и ту же глубину со скоростями 5 мм/мин и 10 мм/мин представлены на рис.4.

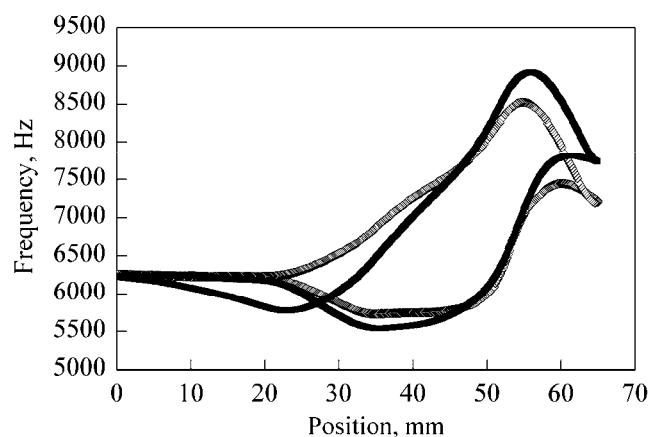


Рис.4. Два сканирования с глубиной 65 мм с разными скоростями (ромбики – 10 мм/мин, черные квадратики – 5 мм/мин).

Процесс становится тем более сложным, чем большее количество деталей СВС экспонируется пучком. На приведенном графике частоты со значениями, большими 6240 Гц, должны интерпретироваться как перегрев базы СВС. Это происходит при сканировании на глубину более чем 50 мм. Как видно, воздействие такого перегрева было очень большое – более 2500 Гц.

При обоих сканированиях процесс начинался при первом соударении электронного пучка со струной (положение 20 мм), когда СВС еще оставался в состоянии теплового баланса. Чтобы использовать это обстоятельство, мы провели два однонаправленных сканирования (вперед и назад) на глубину 50 мм с предварительно термосбалансированным датчиком СВС. Соответствующие данные представлены на рис.5.

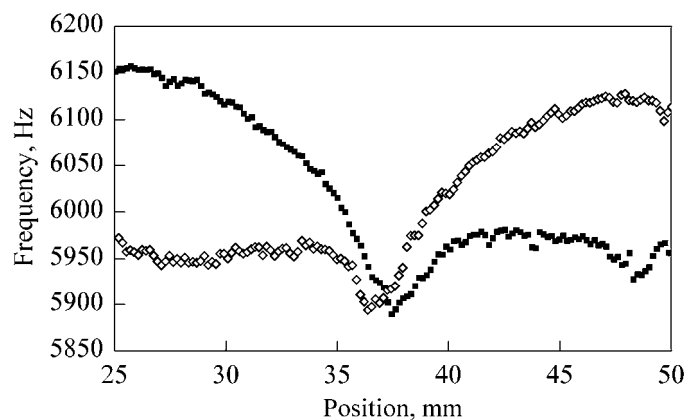


Рис.5. Результаты двух однонаправленных сканирований со скоростью 10 мм/мин вперед и назад (вперед – черные квадратики, назад – ромбики).

С помощью данных этих сканирований можно восстановить профиль пучка. На рис.6 это произведено усреднением частоты двух сканирований в

одинаковом положении (светлые ромбики). Описание этого поведения распределением Гаусса изображено темными квадратами (рис.6): положение пика – 37.24 мм, стандартное отклонение – 3.1 мм.

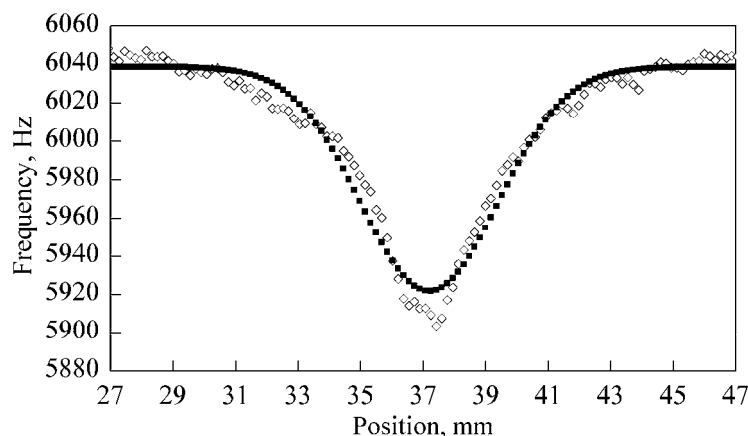


Рис.6. Восстановленный по двум сканированиям профиль пучка (ромбики – среднее по двум сканированиям в данной точке, черные квадраты – фитирование гауссовой функцией).

3. СВС с большой апертурой

Эксперименты, описанные выше, показали, что большая апертура для СВС иногда весьма желательна. Сканирование датчиками СВС обычного типа, где вибрирующая струна одновременно служит чувствительным элементом для пучка, неудовлетворительно, потому что требует существенного расширения магнитной системы. При этом отклонения магнитной схемы от оптимальной приводят к трудностям в генерации колебаний. Для решения этой проблемы струна была разделена на два сегмента [4]: сегмент, чувствительный к пучку (2), и сегмент, вибрирующий в магнитном поле (см. рис.7). На рис.7 представлен общий вид прототипа СВС с большой апертурой (СВС_БА). В данном случае апертура датчика составила 50×100 мм. Видно коромысло, посредством которого произведено разделение струны на вибрирующую и измерительную части. В нижней части расположена вибрирующая струна в магнитной системе.

Данное инженерное решение дает возможность применения разных материалов для чувствительной и вибрирующей струн, в качестве чувствительной могут быть использованы струны даже из диэлектрических материалов. В запланированных экспериментах был использован датчик СВС_БА в открытой атмосфере, так что здесь для обеих струн можно было использовать проволоку из закаленной нержавеющей стали с хорошими механическими характеристиками.

Чувствительная струна в конструкции СВС_БА почти свободна от значительных тепловых контактов с другими деталями датчика, поэтому для минимизации зависимости от температуры окружающей среды в качестве несущих стоек были использованы прутки из инвара. Суточные дрейфы частоты датчика



Рис.7. Фотография SVC_БА, установленного на выходе пучка из инжектора ереванского синхротрона.

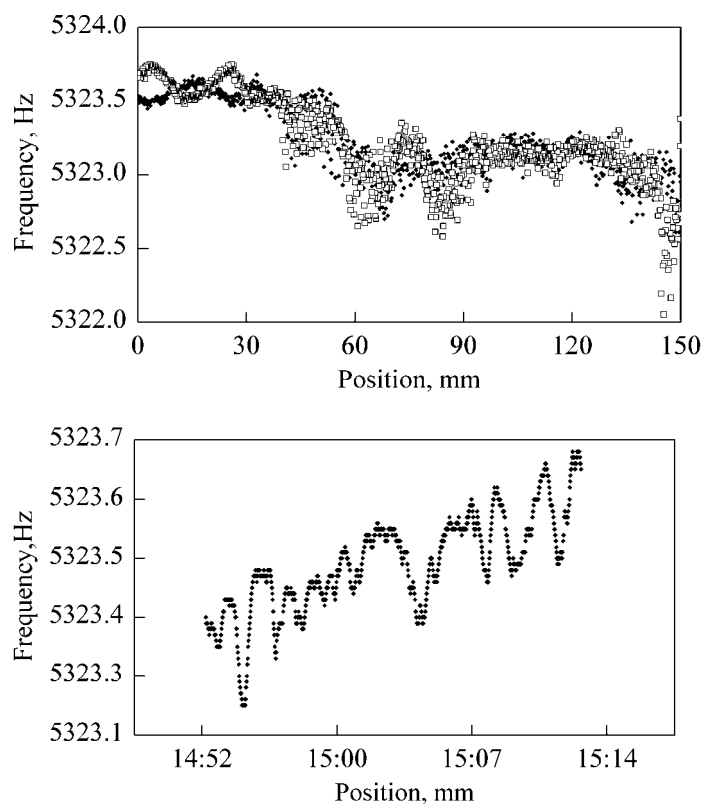


Рис.8. (а) Сканирование со скоростью 10 мм/мин на глубину 150 мм без пучка (черные квадратики – вперед, ромбики – назад). Наблюдаемый шум сигнала при сканировании объясняется вибрацией подающего механизма сканера. (б) Поведение частоты SVC_БА в парк-позиции в течение 20 мин.

составляли приблизительно 1 Гц. Для предотвращения прямых конвективных возмущений датчик СВС_БА был обернут алюминиевой фольгой.

На рис.8а показан результат предварительного сканирования СВС_БА на глубину 150 мм без электронного пучка. Для сравнения поведения СВС_БА в покое и в движении на рис.8б представлен график зависимости частоты датчика в парк-позиции от времени.

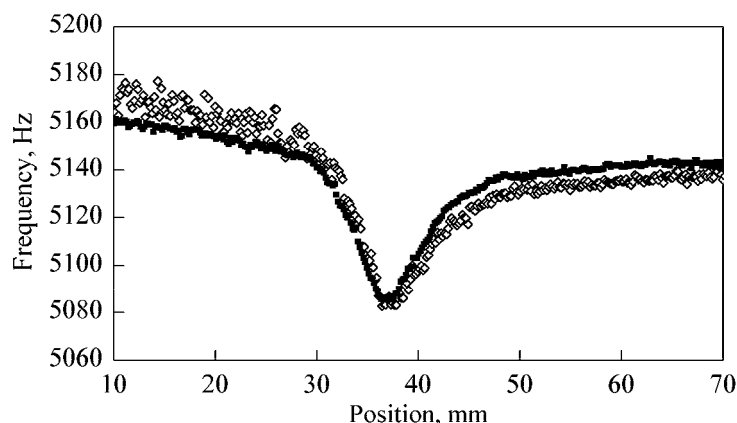


Рис.9. Частотный сигнал датчика СВС_БА при сканировании вперед (ромбики) и назад (черные квадратики).

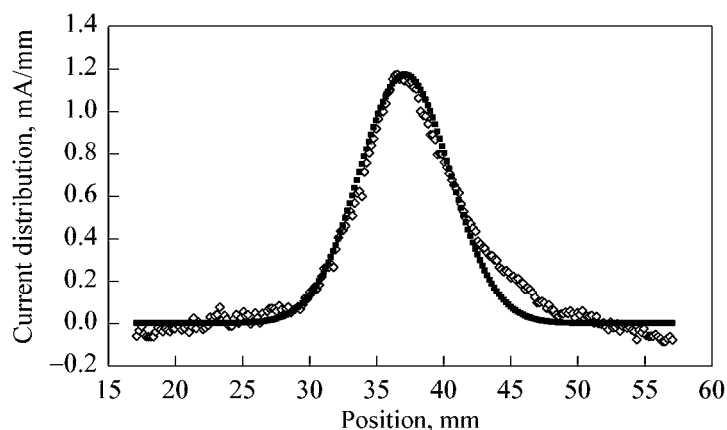


Рис.10. Восстановление профиля электронного пучка по дифференциальному сигналу датчика СВС_БА (ромбики). Фитирование с помощью распределения Гаусса с параметрами $\sigma = 3.4$ мм и средним значением 37.1 мм представлено черными квадратами. Распределение нормировано на полный ток пучка 10 мкА.

Типичное сканирование электронного пучка с энергией 40 МэВ и током 10 мкА показано на рис.9.

Во время сканирования электронный пучок проходит сначала нижнюю стойку из инвара (нижняя деталь 6 на рис.7) и потом устанавливается в свобод-

ном пространстве перед чувствительной струной. В это время происходит процесс термализации датчика, что приводит к увеличению шума в сигнале частоты. Учитывая это, восстановление профиля пучка произведено по данным сканирования в направлении назад. После вычитания «хвостов» распределения дифференциальный сигнал был умножен на множитель 0.0195 мкА/мм/Гц. Результат такой операции представлен на рис.10.

4. Заключение

Эксперименты показали, что сканеры на вибрирующей струне могут быть с успехом использованы для профилирования пучков с большой апертурой. Разработан новый тип СВС с двумя отдельными струнами, что позволило достичь апертуры 50×100 мм. При этом вибрирующая и чувствительная струны могут быть изготовлены из различных материалов, последняя может быть даже диэлектрической. Фактически разработан и испытан новый метод диагностики пучков в ускорителях, направленный на прецизионное измерение пучков с большими поперечными размерами, в том числе, в области гало пучка. Метод может найти широкое применение, в частности, при профилировании пучков в новых высокоэнергетических протонных ускорителях, где измерения в области гало невозможно производить с помощью традиционных струнных сканеров из-за их недостаточной чувствительности.

Авторы благодарны Дж. Бергозу за постоянную поддержку. Работа выполнялась также при поддержке проекта МНТЦ А-1444, финансируемого Канадой.

ЛИТЕРАТУРА

1. **S.G.Arutunian.** Beam Instrumentation Workshop, BIW08, May 2008, Lake Tahoe, USA, pp.1-7.
2. **S.G.Arutunian, K.G.Bakshetyan, N.M.Dobrovolski, M.R.Mayilyan, V.A.Oganessian, A.E.Soghoyan, I.E.Vasiniuk, K.Wittenburg.** Proc. 9th Europ. Part. Accel. Conf., 5-9 July 2004, Lucerne, Switzerland, pp.2457-2459.
3. **R.H.Avagyan, A.E.Avetisyan.** 7th International Conference Nuclear and Radiation Physics. September 8-11, 2009, Almaty, Kazakhstan, <http://www.inp.kz/konferencii-1/arhiv/cbornik-dokladov-icnrp09>.
4. **S.G.Arutunian, A.E.Avetisyan, N.M.Dobrovolski, M.R.Mailian, I.E.Vasiniuk, K.Wittenburg, R.Reetz.** Proc. 8th Europ. Part. Accel. Conf., 3-7 June 2002, Paris, France, pp.1837-1839.

YEREVAN SYNCHROTRON INJECTOR ELECTRON BEAM TRANSVERSAL SCAN WITH VIBRATING WIRE SCANNER

A.E. AVETISYAN, S.G. ARUTUNIAN, I.E. VASINIUK, M.M. DAVTYAN

The Vibrating Wire Scanner (VWS) with aperture 20 mm was developed to scan the electron beam with large transversal sizes. Test experiments with VWS placed in open atmosphere were done on the 40-MeV electron beams of the Yerevan Synchrotron Injector with 4–10 μA at outlet. A new design of VWS is proposed to scan the beams with even greater transversal sizes.