

Ա.Ի. ԱԼԻԽԱՆՅԱՆԻ ԱՆՎԱՆ ԱԶԳԱՅԻՆ ԳԻՏԱԿԱՆ ԼԱԲՈՐԱՏՈՐԻԱ  
(ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ)

Լազարևա Էլեոնորա Հենրիխի

ՏԱՐԲԵՐ ՓՆԶԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՄԱՆ ՀԱՄԱՐ ՆԱԽԱՏԵՍՎՈՂ ՏՍՏԱՆՎՈՂ ԼԱՐՈՎ  
ՄՈՆԻՏՈՐՆԵՐԻ ՆՈՐ ՄՈՂԻՖԻԿԱՑԻԱՆԵՐԻ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԵՎ  
ՍՊԵՑԻՖԻԿ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԸ

Ա.04.20 - «Լիցքավորված մասնիկների փնջերի ֆիզիկա և արագացուցչային տեխնիկա» մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

**ՄԵՂՄԱԳԻՐ**

ԵՐԵՎԱՆ - 2018

---

---

НАЦИОНАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ИМ. А.И. АЛИХАНИЯ  
(ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ)

Лазарева Элеонора Генриховна

СВОЙСТВА И СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НОВЫХ МОДИФИКАЦИЙ  
МОНИТОРОВ ВИБРИРУЮЩЕЙ СТРУНЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ  
ПУЧКОВ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических  
наук по специальности 01.04.20 – “Физика пучков  
заряженных частиц и ускорительная техника”

ЕРЕВАН - 2018

Ատենախոսության թեման հաստատված է ԱԱԳԼ (Եր ՖԲ) -ում

Գիտական ղեկավար՝	Ֆիզ. մաթ. գիտ. դոկտոր Ս. Գ. Հարությունյան (ԱԱԳԼ (Եր ՖԲ))
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝	Ֆիզ. մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր Է. Ս. Լազիևիկ (ՔԵՆԴԼ ՍՀԲ), տեխ. գիտ. թեկնածու Ա. Ն. Շահինյան (ԱԱԳԼ (Եր ՖԲ))
Առաջատար կազմակերպություն՝	Երևանի Պետական Համալսարան

Պաշտպանությունը կայանալու է 2019 թ. հունվարի 24-ին ժամը 11:00-ին ՔԵՆԴԼ ՍԽնքրոտրոնային Հետազոտությունների Ինստիտուտում գործող «Լիցքավորված մասնիկների փնջերի ֆիզիկա և արագացուցչային տեխնիկա» ԲՈԿ-ի 021 մասնագիտական խորհրդի նիստում (0040, Երևան, Աճառյան 31):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՔԵՆԴԼ ՍՀԲ-ի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2018 թ. դեկտեմբերի 12-ին:

021 մասնագիտական խորհրդի գիտական  
քարտուղար, ֆիզ. մաթ. գիտ. թեկնածու

Գ. Ա. Ամատունի

---

---

Тема диссертации утверждена в ННЛА (ЕрФИ)

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук  
С. Г. Арутюнян (ННЛА (Ер. ФИ))

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, профессор  
Э. М. Лазиев (КЕНДЛ ИСИ)  
канд техн. наук  
А. А. Шагинян (ННЛА (Ер. ФИ))

Ведущая организация:

Ереванский Государственный Университет

Защита диссертации состоится 24 января 2019 г. в 11:00 часов на заседании специализированного совета ВАК 021 действующего при КЕНДЛ ИСИ (0040, Ереван, ул. Ачаряна 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КЕНДЛ ИСИ.

Автореферат разослан 12 декабря 2018 г.

Ученый секретарь спец. совета 021, к. ф.- м. н.

Г. А. Аматауни

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность работы**

В связи с развитием ускорительной физики и техники, внедрением новых ускорительных технологий для фундаментальных научных исследований и прикладных целей растет потребность в качественной диагностике параметров пучков ускорителей. Качественное диагностическое оборудование необходимо с момента проектирования, первичного запуска, исследования предельных возможностей ускорителей заряженных частиц, и на протяжении всего режима их эксплуатации и модернизации. Настройки требуемого режима пучков заряженных частиц и управление параметрами пучков значительно зависят от систем и приборов, определяющих эти параметры. Большинство современных ускорителей имеют круглосуточный режим работы и требуют непрерывного контроля параметров пучка.

Таким образом к устройствам измерения параметров пучка частиц - датчикам, детекторам, мониторам - предъявляются все возрастающие требования. Соответственно разрабатываются новые методы диагностики параметров пучков и усовершенствуются имеющиеся. Особое место в таких разработках занимают приборы для неразрушающей диагностики, позволяющие проводить измерения исследуемого пучка без возмущений, либо с минимальными возмущениями.

Разработанные в Ереванском физическом институте (группа ускорительной диагностики) датчики/мониторы/сканеры/резонаторы на базе вибрирующей струны расширяют диапазон использования обычных проволочных сканеров, являются универсальными, поскольку используют тепловой метод регистрации частиц, способны работать как вне вакуумной камеры, так и внутри нее и могут использоваться для профилирования различных пучков заряженных частиц, а также для мониторинга пучков нейтронов и фотонов широкого энергетического спектра. В последнее время здесь же предложен дополнительный метод, основанный на использовании вибрирующей струны в качестве резонансной мишени. Данный метод существенно ускоряет процесс снятия одномерного профиля пучка и открывает возможности восстановления двумерного профиля пучка с использованием томографических методов. Разработанные датчики уже опробованы в многочисленных ускорителях, подготавливаются новые проекты их использования. Датчики можно отнести к слабовозмущающей измеряемый пучок диагностике.

### **Цель данной работы**

Настоящая работа посвящена исследованию диагностики поперечного сечения пучков при помощи датчиков/мониторов/сканеров/резонаторов на основе вибрирующей

струны, в частности, измерению одномерных профилей различных пучков данными устройствами, восстановлению двумерных профилей по полученным результатам. Особое внимание уделено свойствам и специфическим параметрам новых модификаций мониторов вибрирующей струны для исследования различных пучков. Универсальность примененных решений позволяет их использовать как для пучков заряженных частиц (электроны, протоны, ионы), так и для фотонных пучков. На базе развиваемых методов предложено оригинальное решение по измерению пространственных характеристик нейтронных пучков. Использование вибрирующей струны в качестве сканера предоставила возможность измерения тонких пучков.

### **Основные задачи работы**

1. Исследование специфических параметров мониторов вибрирующей струны, таких как:

- зависимость начальной частоты монитора от первоначального натяжения струны, материала, размеров датчика; динамический диапазон, разрешение и точность монитора;
- зависимость частоты монитора от депонируемой мощности, с учетом всех возможных механизмов теплоотвода;
- количество потерь энергии пучка, трансформируемое в тепло и нагревающее материал струны, в зависимости от типа и энергии частиц пучка;
- время отклика монитора.

2. Исследование двух разных методов сканирования пучков и измерения профиля:

- теплового метода, измеряющего сдвиг частоты, обусловленный нагревом струны;
- резонансного метода, существенно сокращающего время измерений.

3. Исследование влияния инерционности измерительных систем, электромагнитных помех и нестабильности используемых приборов, на процесс измерения профиля пучка.

4. Усовершенствование механической конструкции датчиков (повышение качества магнитной системы, механизмов крепления струны).

5. Возможности использования различных модификаций мониторов вибрирующей струны в зависимости от размеров измеряемого пучка, его энергии и типа измеряемых частиц:

- использование самой вибрирующей струны в качестве сканера (в случае тонких пучков);
- сканирование области гало (в случае профилирования высокоэнергетических пучков);
- сканирование всего пучка (в случае слаботочных, низкоэнергетических пучков).

6. Разработка мониторов с композитными вибрирующими струнами, в том числе с гадолиниевым покрытием струны, для измерения мониторами вибрирующей струны нейтронных пучков.

### **Научная новизна**

Новизна мониторов вибрирующей струны, в сравнении с традиционными проволочными сканерами, заключается в использовании вибрирующей струны в совокупности со специально разработанными электронными платами и программным обеспечением с целью получения информации о распределении частиц. Разработанные два метода использования вибрирующей струны взаимодополняют друг друга. Первый основан на тепловой зависимости натяжения/частоты колебания струны, второй на возможности выделения резонансного с частотой колебания струны сигнала из измеряемых вторичных/рассеянных частиц. Эти методы дают широкий диапазон выбора методов сканирования в зависимости от вида детектируемых частиц, параметров пучков, а также от условий проведения эксперимента.

В настоящей диссертации:

Впервые исследована зависимость процесса профилирования от скорости сканирования, обоснованы рекомендации по выбору предельных скоростей сканирования, предложен алгоритм корректировки реконструируемого профиля пучка по двум сканированиям в противоположных направлениях. Предложенная методика определяет также степень достоверности динамических измерений датчика.

Впервые метод использования вибрирующей струны применен для измерения профиля протонного пучка ускорителя Корейского ускорительного комплекса КОМАС.

Впервые предложен алгоритм синхронных измерений, рассеянных на вибрирующей струне вторичных частиц с предельными положениями струны в процессе ее колебаний с инверсией знака дифференциального сигнала. Метод позволил отсекающую фонную составляющую от сигнала, генерируемого непосредственно пучком. Интегрирование дифференциального сигнала такого типа убирает также быстрые компоненты фона (на уровне периода колебаний струны). Метод позволил существенно сократить время сканирования пучка. Метод экспериментально опробован на фотонных пучках.

Ускоренный процесс профилирования на базе резонансного метода диагностики с помощью вибрирующей струны позволил впервые применить томографические методы восстановления двумерного профиля. Был применен, в частности, метод обратных фильтрованных проекций, который позволил произвести томографическое восстановление двумерного профиля пучка по набору одномерных профилей, соответствующих разным углам сканирования. Впервые такой алгоритм был разработан и применен для восстановления сложного профиля лазерного пучка.

Впервые разработана методика профилирования тонких пучков, в которых вибрирующая струна является естественным сканером. Тестовые эксперименты проведены на сфокусированных лазерных пучках. Разработан математический алгоритм восстановления профиля пучка с учетом запаздывания измерительной системы.

Впервые предложено использование композитных вибрирующих струн с активным слоем из изотопа гадолиний 157. Показано, что датчики на базе таких струн могут служить мониторами нейтронных пучков со сложным профилем поперечного сечения. Предложены две модификации таких мониторов: на базе теплового метода зависимости частоты колебаний от измеряемого потока нейтронов и резонансного типа, в которых композитная вибрирующая струна служит резонансной мишенью.

### **Практическая ценность**

Практическая ценность проведенных работ обусловлена тем, что изученные в диссертационной работе свойства и специфические параметры новых модификаций мониторов вибрирующей струны позволяют расширить область применения МВС как с точки зрения номенклатуры (например, возможность измерения нейтронных пучков) и размеров пучков (например, возможность измерения тонких пучков), так и с точки зрения качества проводимых измерений (зависимость от скорости сканирования для тепловых модификации МВС) и ускорения процесса измерения (резонансные модификации МВС). Особый интерес представляет переход от измерения одномерных профилей пучка к сложным двумерным профилям, который в работе обоснован теоретически (метод фильтрованных обратных проекций) и экспериментально осуществлен на лазерном пучке. Предполагается, что восстановление сложных двумерных профилей будет представлять большой интерес также для пучков заряженных частиц (например, протонных пучков большого сечения в исследованиях различных объектов) и нейтронных пучков. Весьма интересным представляется предложение использования вибрирующих струн в качестве естественного сканера для измерения тонких пучков. Метод успешно отработан на лазерных пучках и составлен план усовершенствования измерительной части установки и использования метода для измерения пучков заряженных частиц. Эти результаты могут найти применение в международных ускорительных центрах, например, КОМАС (Корея), DESY (Германия), APS ANL (США), FNAL (США) и т. д.

### **Положения, выносимые на защиту.**

- Результаты измерений профиля протонного пучка ускорителя Корейского ускорительного комплекса КОМАС с помощью МВС тепловым методом.
- Зависимость процесса профилирования пучка от скорости сканирования. Методика корректировки профиля пучка по двум сканированиям в противоположных направлениях.

- Алгоритм синхронных с фазой колебаний струны измерений с инверсией знака дифференциального сигнала (резонансный метод вибрирующей струны). Протестировано на лазерном пучке.
- Томографическая реконструкция профиля пучка на базе фильтрованных обратных проекций (ФОП). Реконструкция двумерного профиля по набору одномерных проекций при разных углах. Протестировано на лазерном пучке со сложной структурой с использованием резонансного метода вибрирующей струны.
- Методика профилирования тонких пучков на базе вибрирующей струны, алгоритм учета запаздывания измерительной системы. Протестировано на лазерном пучке.
- Предложение об использовании в датчиках вибрирующей струны композитных струн с гадолиниевым покрытием для диагностики нейтронных пучков.

### **Апробация работы и публикации**

Результаты диссертационной работы докладывались на семинарах ЕрФИ, Candle, а также на следующих международных конференциях по ускорительной и лазерной физике:

- Particle Accel. Conf. IPAC 2016 (Busan, Korea, 2016),
- Proc. of 25th Annual Int. Laser Phys. Workshop (Yerevan, July 11-15, 2016).

Всего по теме диссертации опубликовано 7 работ, в следующих журналах:

- Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A,
- Review of Scientific Instruments,
- Известия НАН Армении, Физика,
- Journal of Physics: Conference Series,

а также в трудах международных конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5-и глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации 141 страниц, включая 63 рисунков и 5 таблиц. Список цитируемой литературы включает 128 наименований.

### **Краткое содержание работы**

Во введении излагаются актуальность, цель, основные задачи, научная новизна и практическая ценность работы, перечисляются положения, выносимые на защиту, и указываются данные об апробации и публикациях по теме диссертационной работы.

В первой главе диссертационной работы приводится обзор существующих методов диагностики профилей пучков в ускорительной физике. Описываются характеристики мониторов профилей, принципы их действия, приводится анализ и сравнение параметров, оцениваются преимущества и недостатки их практического применения.

В центральной части главы вводится описание и принцип действия датчиков/мониторов/сканеров/резонаторов на базе вибрирующей струны, предназначенных для измерения поперечного профиля пучков, приводится сравнение характеристик и параметров предлагаемых приборов с хорошо известными проволочными сканерами, аналогами которых являются мониторы вибрирующей струны (МВС).

В финальной части главы описываются конфигурации и специфические особенности мониторов вибрирующей струны (однострунные, двухструнные, многострунные,

В начале **второй главы** приводится подробное описание одного из методов измерения профилей пучков с помощью МВС – теплового метода. Представлен алгоритм вычисления времени отклика  $\tau$  и частотного сдвига  $\Delta F / F_0$ , обусловленного нагревом струны частицами пучка с учетом теплоотвода по всем возможным механизмам (теплопроводности, излучения и конвекции).

$$\tau = \frac{c\rho}{8(\lambda/L^2 + 2\varepsilon\sigma_{st,b}T_0^3/d + \alpha_{conv}/2d)} ; \frac{\Delta F}{F_0} = \frac{E}{2\sigma_0} \frac{\alpha\varepsilon_{heat}(\delta_p I_p/e)}{[8\lambda S/L + 4\varepsilon\sigma_{st,b}T_0^3\pi dL + \eta\alpha_{conv}\pi dL]}$$

где  $c$  - удельная теплоемкость,  $\rho$  - плотность материала струны,  $S$  и  $L$  – поперечное сечение и длина струны,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала струны,  $\alpha_{conv}$  - коэффициент конвективных потерь,  $\alpha$  - коэффициент теплового расширения материала струны,  $E$  - модуль упругости материала струны,  $\varepsilon$  - излучательная способность струны,  $F_0=(1/L)\sqrt{\sigma_0/\rho}$  - начальная частота струны, вибрирующей на второй гармонике,  $\sigma_0$  - начальное натяжение струны.

Произведены расчеты ионизационных потерь (формула Бете-Блоха), в частности, для протона в струне из вольфрама в диапазоне энергий 10–10000 МэВ, с учетом доли от количества потерь энергии протона, которое трансформируется в тепло и нагревает материал струны.

Приводится общее описание МВС с основными параметрами и схема автогенерации колебаний струны. На рис.1 изображена схема типичного датчика вибрирующей струны.

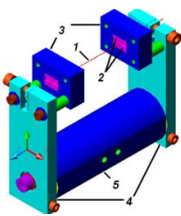


Рис.1. Общий вид датчика: 1 - вибрирующая струна, 2 - магниты, 3 - магнитные полюса, 4 -зажимы, 5 - основание.

Вибрирующая струна подключена к цепи положительной обратной связи электронной схемы, выбирающей резонансную частоту, при которой частота переменного тока равна собственной частоте струны. Основным параметром МВС является текущая частота струны, начальное значение которой



зависит от первоначального натяжения струны, материала, размеров датчика и лежит в пределах 1 - 10 кГц. Диапазон выходного сигнала - смещения частоты - менее 0.005 (нижний предел) и свыше 1000 Гц (верхний предел), т.е. динамический диапазон около  $10^6$ . Разрешение МВС - несколько единиц на 0.001 Гц, точность измерения - лучше 0.01 Гц, что, в зависимости от материала и геометрических размеров струны, соответствует точности измерения смещения температуры струны менее 1 мК, добротность МВС до  $10^4$ .

Во второй части главы представлены результаты профилирования протонного пучка Корейского ускорительного комплекса (КОМАС) с помощью МВС тепловым методом. Эксперименты проводились в условиях низких токов пучка (до 100 нА). Профиль пучка измерен при количестве частиц в одном цуге  $\approx 10^{11}$  и частоте повторения цугов 0.1 Гц с использованием нескольких положений сканирования. Измерения проводились в воздухе на расстоянии  $\approx 1$  м от выходного фланца вакуумной камеры, где энергия пучка составляла 14.5 МэВ. На рис. 2.a представлен результат 13-ти измерений в различных положениях датчика, на рис. 2.b – усредненный (5 или 4 цугов из каждой серии) профиль пучка в течение времени эксперимента.

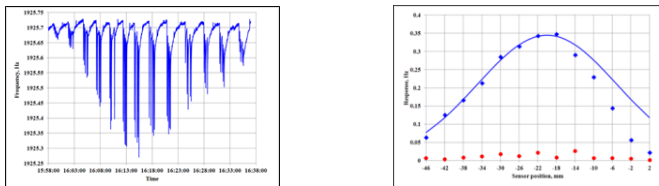


Рис.2. Слева: полное сканирование протонного пучка (13 позиций МВС), справа: профиль пучка, восстановленный с помощью процедуры измерения падения частоты от каждого цуга. Ромбики - средние значения серии измерений в фиксированных положениях монитора, кружочки соответствуют среднеквадратичным отклонениям по серии, сплошная кривая - фитирование экспериментальных точек гауссовой кривой  $g(x) = G \exp(-(x - x_0)^2 / 2\sigma^2)$  с параметрами:  $\sigma = 15$  мм,  $x_0 = -20$  мм,  $G = 0.345$  Гц.

В центральной части главы представлены эксперименты по определению эффектов скорости сканирования при измерениях профиля лазерного пучка вибрирующей струной. Для определения предельных скоростей, используемых мониторами вибрирующей струны, было предложено сравнение прямого и обратного сканирований пучка при разных скоростях. С целью оценки меры достоверности частотного отклика МВС используется алгоритм корректировки реконструируемого профиля пучка по двум сканированиям в противоположных направлениях. Метод позволяет оценить точность соответствия частотного сигнала монитора реальному профилю пучка.

На рис.3 приведены сканирования с минимальной (рис.3а и 3б) и максимальной (рис.3с и 3д) скоростями.

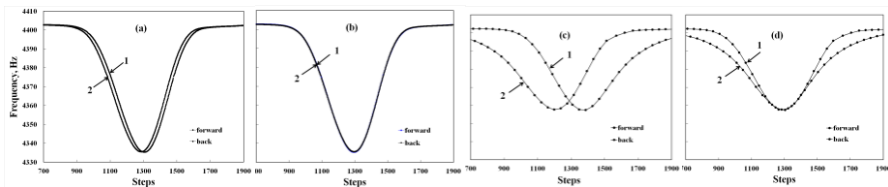


Рис. 3. (а), (с) первичные данные прямого и обратного сканирований с минимальной (10 шагов/с (0.0166 мм/с)) и максимальной (200 шагов/с (0.3322 мм/с)) скоростями. (b), (d) графики сдвинуты друг к другу на 10 шагов для минимальной скорости и на 84 шага - для максимальной скорости.

Как видно из рис.3б, при минимальной скорости сканирования сдвинутые профили практически совпадают и представляют истинный профиль лазерного пучка, а при максимальной - совпадают только вблизи центральной части, а хвостовые части представляются существенно разными. Зазор между кривыми обусловлен тепловой инерцией процесса нагрева струны. При увеличении скорости сканирования уменьшается количество экспериментальных точек на графиках и искажение кривых относительно симметричного профиля лазерного пучка растет.

В таб.1 приведены результаты сканирований при разных скоростях.

Таб. 1. Сравнительные характеристики прямого и обратного сканирования пучка.

$V$ , mm/s	$fwhm$ ,mm	$t$ , $fwhm$ ,s	poins	$F$ drop,Hz	diverg.Hz	accuracy,%
0.0166	0.556	33.5	987	68	0.11	0.16
0.0332	0.553	16.6	492	63	0.20	0.32
0.0830	0.566	6.8	194	60	0.42	0.70
0.1661	0.602	3.6	97	51	1.03	2.01
0.2491	0.622	2.6	63	50	2.45	4.89
0.3322	0.715	2.1	48	45	3.22	7.15

Приведенные результаты представляют интерес при использовании МВС в широком диапазоне применений (заряженные частицы, излучение), поскольку позволяют по прямому и обратному сканированию при той же скорости определять точность сканирования и производить коррекцию профиля пучка.

**Третья глава** диссертационной работы посвящена резонансному методу профилирования пучка с помощью вибрирующей струны, датчик назван *резонансная мишень - монитор вибрирующей струны* (РМ-МВС). Как известно достижение теплового баланса в каждой позиции струны увеличивает время измерения профиля пучка до нескольких секунд. Предложено использовать вибрирующую струну в качестве мишени. Основная идея метода заключается в измерении сигнала вторичных частиц, поступающего от рассеяния пучка на вибрирующей струне, синхронно (резонансно) с измерением частоты колебаний струны. Метод дает возможность извлечь сигнал от рассеяния пучка на струне в присутствии фона. С целью образования динамического сигнала, определяющего плотность сканируемого пучка, был разработан новый математический алгоритм, состоящий в формировании дифференциального сигнала от пары последовательных измерений на полупериодах частоты вибрирующей струны с инверсией знака дифференциального сигнала на каждом полупериоде. Схема процесса представлена на рис. 4. Принцип метода РМ основан на измерении рассеянных/отраженных частиц/фотонов в крайних положениях струны в процессе колебаний.

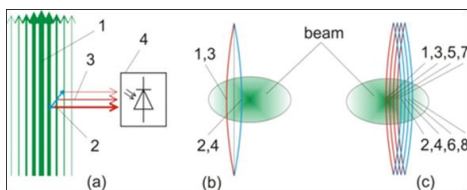
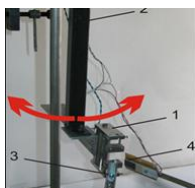
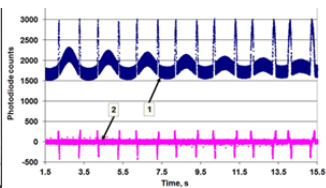


Рис. 4.(а). Неоднородный пучок (1), вибрирующая струна (2), (3) рассеянные/отраженные частицы/фотоны регистрируются фотодиодом (4) в такт с частотой колебаний струны. (b) Плоскость неподвижной вибрирующей струны, (1), (3) положения струны при «левых» измерениях и (2), (4) - при «правых». (с) - Плоскость подвижной вибрирующей струны - (1), (3), (5), (7) - положения струны при «левых» измерениях, (2), (4), (6), (8) - при «правых».

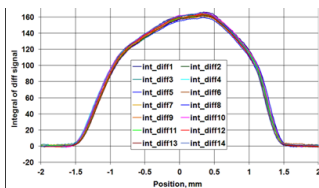
Для сканирования лазерного пучка с помощью РМ-СВС использовалась маятниковая система с смонтированным МВС (рис. 5а). Основные результаты измерений в процессе колебания маятника и восстановленный профиль лазерного пучка с использованием результатов всех 14-и сканирований представлены на рис. 5b и 5с



(а)



(b)



(с)

Рис. 5. (а) - фотография экспериментальной установки, (b) - 7 полных колебаний маятника (14 полных сканирований лазерного пучка), (с) - восстановленный профиль лазерного пучка с использованием результатов всех 14-и сканирований.

На рис. 6 представлен результат сканирования лазерного пучка, где фотодиод регистрирует два очень похожих пика различного происхождения - один вызван отражениями от вибрирующей струны, а другой от держателя монитора.

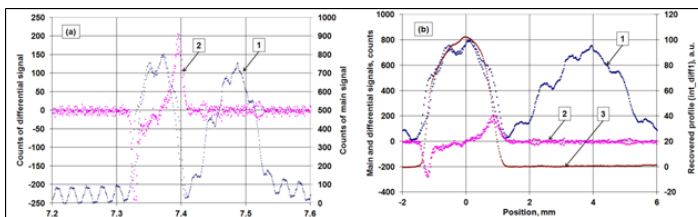


Рис.6. (а) - фотодиод измеряет отражения от вибрирующей струны и других частей конструкции монитора (1) - синяя кривая. Только первый пик вносит вклад в дифференциальный сигнал (2) - маджента кривая. (b) Лазерный пучок 1D-профилирования, выполненный методом РМ, разделяет отражения фотона на вибрирующей струне от отражений на держателе монитора и от фона 50 Гц. (b) (1) - измерения АЦП с помощью быстрых фотодиодов, левый пик - отражения от струны, правый - от держателя монитора; (2) - дифференциальный сигнал полупериода измерений струны, (3) - восстановленный профиль обусловлен только пучком.

Как можно видеть из рис. 6а дифференциальный сигнал захватывает только первый пик (отражения от вибрирующей струны) и полностью отфильтровывает второй пик (отражения от механической части), что позволяет легко восстановить профиль лазерного пучка (рис. 6b).

Преимуществом предложенного РМ-МВС является значительное уменьшение времени сканирования по сравнению с предыдущими моделями МВС.

Во второй части этой главы представлено восстановление сложного пучка лазера по множеству его одномерных проекций с использованием вибрирующей струны в качестве резонансной мишени, что позволило существенно ускорить выполнение одномерного сканирования и решить задачу томографии практически. Использован алгоритм восстановления профиля на базе метода ФОП со специально разработанным программным обеспечением, алгоритмами реконструкции и вращения.

На рис. 7а представлены процесс и схема обратного проецирования. Равномерное распределение интенсивности проекции среди всех пикселей вдоль пучка приводит к концепции обратной проекции. Подход, основан на алгоритме функции преобразования,

где конкретная ячейка в столбце проекций распространяется в области восстановления не только на соответствующую строку, но также, с некоторым весовым коэффициентом, и в соседних строках (рис.7б).

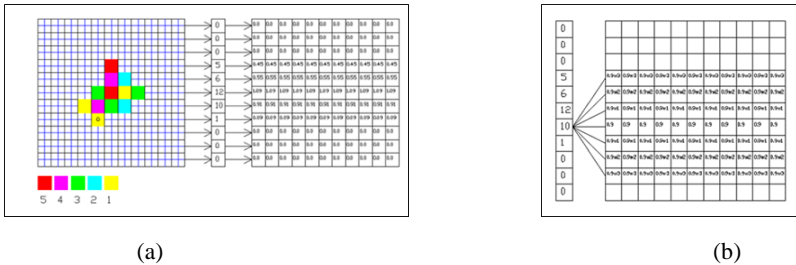


Рис.7. (а). Слева - моделированный в области дискретной реконструкции пучок, средний столбец - проекция для угла  $\varphi = 0$ , справа - равномерно распределенное значение проекции вдоль соответствующих горизонтальных рядов, (б) - обратное проецирование с фильтрацией по трем строкам из определенной ячейки проекционного столбца с весовыми коэффициентами  $w_1, w_2, w_3$ .

Было предложено заменить обычное вращение (1) тремя сдвигами (2).

$$\begin{pmatrix} x^* \\ y^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (1), \quad \begin{pmatrix} x^* \\ y^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -tg(\varphi/2) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \sin \varphi \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -tg(\varphi/2) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (2).$$

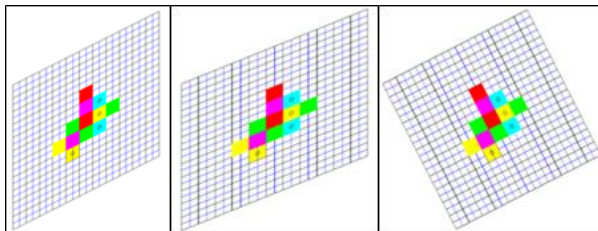


Рис. 8. Вращение тремя сдвигами (для отображения алгоритма использованы инструменты Paint Image / Stretch / Skew).

Численное моделирование осуществлялось специально разработанной цифровой программой, оперирующей как модельными пучками, так и экспериментальными данными. Разработаны специальные инструменты для профилирования пробных пучков. Пример двумерного профиля модельного пучка представлен на рис. 9.

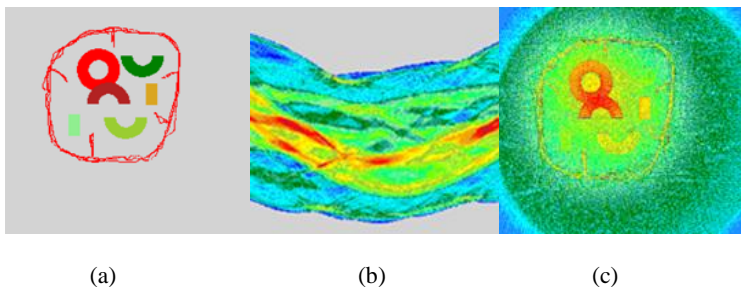


Рис. 9. (a) - Профиль тестового пучка, созданный графическими программными инструментами, (b) - соответствующее множество проекций, (c) - картина восстановленного профиля.

На рис.10 изображены экспериментальные данные восстановления сложного лазерного пучка методом РМ-МВС, с применением алгоритма ФОП.

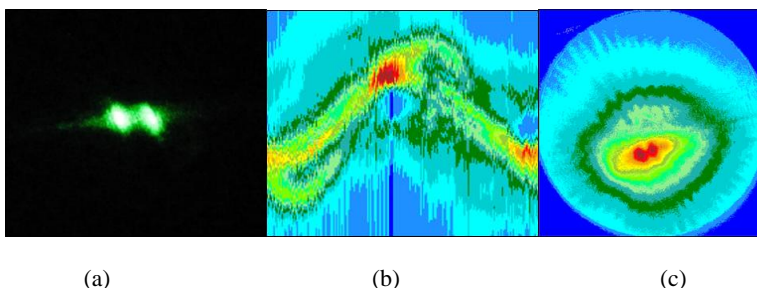


Рис. 10 (a). Основной вид поперечного сечения лазерного пучка, (b) - экспериментальные проекционные данные, (c) - окончательная реконструкция 2D-профиля лазерного пучка, сделанная с экспериментальными данными (b).

**Четвертая глава** диссертационной работы посвящена измерению профиля тонких пучков мониторами вибрирующей струны. Измерен профиль сфокусированного лазерного пучка (размер пятна в фокусе  $\sim 0.1$  мм). В данном случае поперечные размеры пучка сравнимы с амплитудой колебаний струны, поэтому струна представляется естественным сканером и на каждом полупериоде частоты колебаний происходит полное сканирование пучка.

Проведен ряд экспериментов для выявления эффектов, которые могут дать вклад в процесс измерения профиля пучка, в частности, была проверена стабильность частоты

монитора, проведены эксперименты по выявлению электромагнитных помех измерительной системы и нестабильности используемых приборов.

Важную роль в предлагаемом методе измерения играет быстродействие измерительной системы. На рис. 11 представлена зависимость сигнала измерительной системы от времени. Интерполяция измерений производилась функцией вида  $g(t) = g_0(1 - \exp(-(t - t_0) / \tau))$ , где  $g_0 = 2329$  мВ – значение функции при выходе на установившийся режим и  $t_0 = -15.5$  – постоянная времени измерительной системы в безразмерных единицах номеров измерений. Параметр  $\tau = 4.33$ , что соответствует выходу измерительной системы на 60% устанавливающегося значения за 55 мкс

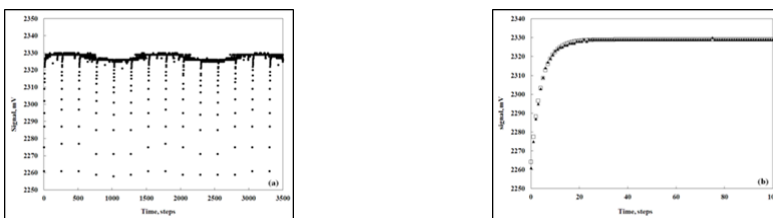


Рис. 11. Зависимость сигнала измерительной системы от времени: (а) - общий вид сигнала, содержащий несколько пачек измерений, (б) - фрагмент в увеличенном масштабе: треугольники - экспериментальная кривая, полые квадраты - интерполяция.

На рис. 12 показаны экспериментальные данные зависимости сигналов с фотодиода для двух положений РМ-МВС в позиции 8 и 32. струны. Проводились измерения отраженных фотонов от неподвижной струны в том же положении РМ-МВС.

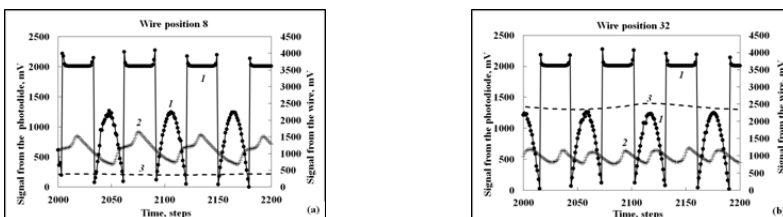


Рис. 12. Зависимости от времени электрического сигнала с вибрирующей струны (1), с фотодиода от вибрирующей (2) и невибрирующей (3) струны.

Алгоритм восстановления профиля по экспериментальным результатам измерения отраженных от вибрирующей струны фотонов должен учитывать ограниченное быстродействие измерительной схемы. Приняв, что измерительная схема является датчиком первого порядка, измеряемая величина определяется из уравнения

$\tau dg(t)/dt + g(t) = f(t)$ , где  $\tau$  - отклик измерительной системы,  $g(t)$  - результаты экспериментальных измерений. Численное решение этого уравнения определяет отклик измерительной системы  $g(t)$  по функции физического процесса  $f(t)$ .

На рис. 13а представлены экспериментальные данные с фотодиода, положение центра вибрирующей струны в процессе ее колебаний и реконструированная по измеренным значениям функция процесса  $f_{\text{rec}}(t)$ , то есть рассеяние лазерного излучения на струне. По полученным результатам восстановлен усредненный профиль пучка по 1000 точкам, изображенный на рис. 13б.

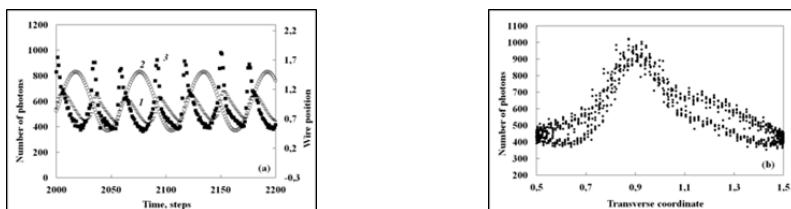


Рис. 13. сигнал с фотодиода (запаздывающий отклик  $g(t)$ ), 2 - положение центра струны в процессе колебаний, 3 - рассеяние лазерного излучения на струне (восстановленный по запаздывающему отклику сигнал  $f_{\text{rec}}(t)$ ). (b) Зависимость кол-ва фотонов от координаты - профиль сфокусированного лазерного пучка.

Пятая глава диссертационной работы посвящена разработанным нейтронным мониторам вибрирующей струны, их модификациям. В начале главы приведено краткое введение в теорию, методы и применения рассеяния нейтронов. Большинство методов обнаружения нейтронов основаны на измерениях различных продуктов ядерных реакций. Кратко описан принцип действия нейтронных детекторов, газовых, полупроводниковых.

Во второй части главы представлены нейтронные детекторы на базе композитных вибрирующих струн, разработанные группой ускорительной диагностики ЕрФИ.

Учитывая большое сечение захвата нейтронов некоторых изотопов гадолиния, разработан нейтронный монитор вибрирующей струны (НМВС) с композитной струной, содержащей слой изотопа гадолиний 157. При проникновении нейтронов в струну часть их энергии передается слою из гадолиния и увеличивает температуру струны. В силу малого диаметра струны этот метод позволяет измерять локальную плотность нейтронного пучка в месте положения струны. Предлагаемый нейтронный монитор обладает широким динамическим диапазоном и может быть использован для профилирования нейтронных пучков из специализированных источников (исследовательские реакторы и источники расщепления). Аналогично предложению об



использовании вибрирующих струн в качестве резонансной мишени, вибрирующая струна с гадолиниевым слоем также может служить резонансной мишенью. Монитор на базе такой струны назван *резонансная мишень - нейтронный монитор вибрирующей струны* (PM-НМВС). Синхронные измерения гамма лучей, возникающих в результате рассеяния нейтронов на атомах слоя гадолиния вибрирующей струны с колебаниями частоты струны обеспечивают быстрый отклик процесса рассеяния. Дифференциальный сигнал в положениях максимальных отклонениях струны в процессе колебаний может обеспечить информацию о градиенте профиля пучка.

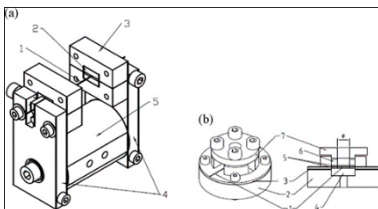
PM-НМВС может использоваться как точный монитор с отличным пространственным разрешением для высокоточных нейтронных пучков специализированных источников нейтронов с мультибанчевой инфраструктурой многочисленных инструментов для исследования материалов. Специализированный многострунный НМВС с возможностью вращения вдоль оси пучка может быть использован для восстановления сложных 2D-профилей нейтронных пучков больших поперечных сечений в нейтронной томографии, получении изображений и радиографии.

*Реакция захвата нейтронов Gd и депонирование энергии нейтронов в струне*



После захвата тепловых нейтронов *Gd* возбужденный атом *Gd* возвращается в основное состояние, высвобождая энергию связи ( $\sim 7937\text{кэВ}$  для  ${}^{157}\text{Gd}$ ) в виде гамма-лучей, рентгеновских лучей внутреннего перехода и оже-электронов.

Разработано два типа мониторов (рис. 14): малогабаритные НМВС с вольфрамовой струной диаметром 10 мкм и слоем *Gd* толщиной 2 мкм и средние - 100 мкм и слоем *Gd* 10 мкм. Для первого типа предлагается использовать  ${}^{157}\text{Gd}$ , захватывающий все тепловые нейтроны, падающие на струну, для второго типа можно использовать естественный *Gd*.



Оба механизма теплового вклада приводят к отложению тепла в вибрирующую струну из вольфрама  $\varepsilon_n = 138.2 \text{ кэВ} = 2.21 \times 10^{-14} \text{ Дж}$  для средних размеров НМВС и  $77 \text{ keV}$  - для малых.

Рис. 14. Схематическое изображение (а) - НМВС среднего размера: 1 - вибрирующая струна, 2 - магниты, 3 - магнитные полюса, 4 - клипсы, 5 - основа, (б) - НМВС малого размера: 1 - вибрирующая струна, 2 - поддерживающая опора, 3 - контактная шайба струны, 4 - магниты, 5 - магнитные полюса.

магнит, 5 - две тонкие шайбы из керамики, шайба с отверстием или без, 6 - эластическая шайба, 7 - зажимная шайба из магнитного материала.

В финальной части главы приведены детальные расчеты параметров для нейтронных мониторов вибрирующей струны с тепловым и резонансным принципом оперирования, а также сделан расчет времени деградации слоя гадолиния для обоих размеров мониторов.

В **Заключении** приводятся основные результаты и выводы диссертационной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследован процесс профилирования лазерного пучка при разных скоростях сканирования. Показано, что при увеличении скорости сканирования происходит существенное искажение профиля. Обоснованы рекомендации по выбору предельных скоростей сканирования, предложен алгоритм корректировки реконструируемого профиля пучка по двум сканированиям в противоположных направлениях. Показано, что предложенная методика определяет также степень достоверности динамических измерений монитора. Данное исследование существенно для других применений МВС, в частности, для профилирования пучков заряженных частиц в ускорителях.

2. Тепловой метод вибрирующей струны применен для измерения профиля протонного пучка ускорителя Корейского ускорительного комплекса КОМАС.

3. Проведены исследования по разработке синхронных измерений вторичных частиц/излучения на вибрирующей струне в предельных положениях струны в процессе ее колебаний. Показано, что алгоритм формирования дифференциального с инверсией знака сигнала позволяет отсекаать фоновую составляющую от сигнала, генерируемого непосредственно пучком. Интегрирование дифференциального сигнала такого типа убирает также быстрые компоненты фона (на уровне периода колебаний струны). Метод позволил существенно сократить время сканирования пучка. Метод опробован экспериментально на фотонных пучках, в настоящее время проводятся эксперименты по сканированию таким методом электронных пучков. Метод представляется очень перспективным для измерения профилей пучков в ускорителях с учетом существенного увеличения скорости процесса сканирования.

4. Ускоренный процесс профилирования на базе резонансного метода диагностики с помощью вибрирующей струны позволил применить томографические методы восстановления двумерного профиля по набору одномерных профилей, соответствующих различным углам сканирования. Для восстановления двумерного профиля был применен метод обратных фильтрованных проекций. На основании данного алгоритма было разработано программное обеспечение для восстановления сложного двумерного профиля по набору одномерных профилей. Метод был

экспериментально опробован на лазерных пучках. Предполагается продолжить исследования применения метода для заряженных частиц. Представляется, что резонансный метод для диагностики вторичных частиц даст возможность использовать низкоэнергетические фотоны с применением быстрых фотодиодов вместо традиционных фотоумножителей, требующих дополнительных сцинтилляторов и блоков высокого напряжения.

5. С учетом перспективного направления в ускорительной физике по генерации ультратонких микронных пучков была разработана методика профилирования тонких пучков, в которых вибрирующая струна является естественным сканером. Первые эксперименты проведены на сфокусированных лазерных пучках. Разработан математический алгоритм восстановления профиля пучка с учетом запаздывания измерительной схемы.

6. Учитывая высокую чувствительность мониторов вибрирующей струны предложено использование композитных вибрирующих струн с активным слоем из изотопа гадолиний 157. Показано, что датчики на базе таких струн могут служить мониторами нейтронных пучков со сложным профилем поперечного сечения. Предложены две модификации таких мониторов, на базе теплового метода зависимости частоты колебаний от измеряемого потока нейтронов и резонансного типа, в которых композитная вибрирующая струна служит резонансной мишенью.

#### СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. S. G. Arutunian, J. Bergoz, M. Chung, G. S. Harutyunyan, E. G. Lazareva, Thermal neutron flux monitors based on vibrating wire, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 797, (2015), pp. 37-43.
2. S. G. Arutunian, M. Chung, G. S. Harutyunyan, A. V. Margaryan, E. G. Lazareva, L. M. Lazarev, and L. A. Shahinyan, Fast resonant target vibrating wire scanner for photon beam, *Review of Scientific Instruments* 87, (2016), pp. 023108-1-(9).
3. D. Choe, M. Chung, S.Y. Kim, S.G. Arutunian, A.V. Margaryan, E. G. Lazareva, Beam Halo Measurements using Vibrating Wire at the KOMAC, *Proc. of Int. Particle Accel. Conf. IPAC2016 (Busan, Korea)*, 2016, pp. 680-682.
4. M.A. Aginian, J. Alonso, S.G. Arutunian, M. Chung, A.V. Margaryan, E.G. Lazareva, L.M. Lazarev, L.A. Shahinyan, New method in medical tomography based on vibrating wire: bench-test experiment on laser beam, *IOP Journal of Physics: Conf. Series* 826 (2017) pp. 012016-1-(11).
5. M.A. Агинян, С.Г. Арутюнян, D. Choe, M. Chung, Г.С. Арутюнян, S.–Y. Kim, Э.Г. Лазарева, А.В. Маргарян, Прецизионная вневакуумная система мониторинга протонного

пучка на базе вибрирующей струны. Изв. НАН Армении, Физика, 52, № 2 (2017), стр. 151-165.

6. С.Г. Арутюнян, Г.С. Арутюнян, D. Choe, M. Chung, Э.Г. Лазарева, А.В. Маргарян, Эффекты скорости сканировании при измерениях профиля лазерного пучка вибрирующей струной, Известия НАН Армении, Физика, т.52, № 4, (2017), стр. 495-506.

7. Э.Г. Лазарева, Вибрирующая струна для измерения профиля тонких пучков в ускорителях: предварительные тесты на лазерном пучке, Известия НАН Армении, Физика, т.53, № 2, (2018), стр. 181–192.

### ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

1. Հետազոտվել է լազերային փնջերի տարբեր սքանավորման արագություններով պրոֆիլավորման պրոցեսը: Ցույց է տրվել, որ սքանավորման արագության բարձրացման արդյունքում տեղի է ունենում պրոֆիլի զգալի աղավաղում: Հիմնավորվում են սահմանային սքանավորման արագությունների ընտրության վերաբերյալ առաջարկությունները, առաջարկվում է փնջի վերականգնված պրոֆիլի ուղղման ալգորիթմ օգտագործելով հակառակ ուղղություններով երկու սքանավորումներ: Ցույց է տրվում, որ առաջարկվող մեթոդը որոշում է նաև մոնիտորի դինամիկ չափումների հուսալիության աստիճանը: Այս ուսումնասիրությունը կարևոր է տատանվող լարի մոնիտորների այլ կիրառումների համար, մասնավորապես, արագացուցիչներում լիցքավորված մասնիկների փնջերի պրոֆիլավորման համար:

2. Տատանվող լարի ջերմային մեթոդը կիրառվել է Կորեյայի KOMAC արագացուցչային համալիրի պրոտոնային փնջի պրոֆիլը չափելու համար:

3. Կատարվել են հետազոտություններ լարի տատանման ընթացքում ընդունած սահմանային դիրքերում երկրորդական մասնիկների/ճառագայթման սինքրոն չափումների մշակման վերաբերյալ: Ցույց է տրված, որ նշանի ինվերսիայով դիֆերենցիալ ազդանշանի ձևավորման ալգորիթմը հնարավորություն է տալիս տարանջատել ֆոնային բաղադրիչը անմիջականորեն փնջից եկոխ ազդանշանից: Այս տեսակի դիֆերենցիալ ազդանշանների ինտեգրումը նաև վերացնում է ֆոնի բաղադրիչները (լարի տատանման պարբերության մակարդակի): Մեթոդը թույլ է տալիս զգալիորեն նվազեցնել փնջի սքանավորման ժամանակը: Մեթոդը փորձարկվել է ֆոտոնային փնջերի վրա, ներկայումս էլեկտրոնային փնջերի սքանավորման փորձեր են կատարվում: Մեթոդը հեռանկարային է

արագացուցիչներում փնջերի պրոֆիլների չափման համար, հաշվի առնելով սքանավորման արագության զգալի աճը:

4. Տատանվող լարի օգտագործմամբ ռեզոնանսային մեթոդի դիագնոստիկայի վրա հիմնված արագացված պրոցեսը հնարավորություն տվեց կիրառել տոմոգրաֆիկ մեթոդներ, երկրաչափանի պրոֆիլը տարբեր սքանավորման անկյուններին համապատասխանող մի շարք միաչափ պրոֆիլներով: Երկրաչափանի պրոֆիլը վերականգնելու համար կիրառվեց ֆիլտրացված հակառակ պրոեկցիաների մեթոդը: Այս ալգորիթմի հիման վրա մշակվել է ծրագրային ապահովում բարդ երկրաչափանի պրոֆիլը մի շարք միաչափ պրոֆիլներով վերականգնելու համար: Մեթոդը փորձարկվել է լազերային փնջերի վրա: Ակնկալվում է, որ երկրորդական մասնիկների դիագնոստիկայի համար ռեզոնանսային մեթոդը հնարավորություն կտա օգտագործել ցածր էներգիայի ֆոտոններ արագ ֆոտոդիոդների կիրառմամբ ավանդական ֆոտոբազմապատկիչների փոխարեն, որոնք պահանջում են լրացուցիչ սցինտիլյատորներ և բարձր լարման բլոկեր:

5. Հաշվի առնելով արագացուցիչային ֆիզիկայում ուլտրաբարակ միկրոնային փնջերի գեներացիայի հեռանկարային ուղղությունը, մշակվել է բարակ փնջերի պրոֆիլավորման մեթոդիկա, որտեղ տատանվող լարը հանդիսանում է բնական թիրախ: Առաջին փորձերը իրականացվել են ֆոկուսացված լազերային փնջերի վրա: Մշակվել է փնջի պրոֆիլի վերականգնման մաթեմատիկական ալգորիթմ, որը ներառում է չափման սխեմայի ուշացումը:

6. Հաշվի առնելով տատանվող լարի մոնիտորների բարձր զգայունությունը, առաջարկվել է կոմպոզիտ տատանվող լարերի օգտագործումը գադոլինիումի 157 իզոտոպի ակտիվ շերտով: Ցույց է տրվել, որ նման լարերերով մոնիտորները կարող են ծառայել որպես բարդ լայնական կտրվացքով պրոֆիլով նեյտրոնային փնջերի մոնիտորներ: Առաջարկված է այդպիսի մոնիտորների երկու մոդիֆիկացիա՝ ջերմային սկզբունքով գործող (տատանման հաճախության կախվածության չափվող նեյտրոնային հոսքից) և ռեզոնանսային, որոնցում կոմպոզիտ տատանվող լարը ծառայում է որպես ռեզոնանսային թիրախ:

## SUMMARY

1. The process of profiling a laser beam at different scanning speeds was investigated. It is shown that with an increase in scanning speed, a significant deformation of the profile occurs. Recommendations on the choice of limiting scanning speeds are substantiated, an algorithm is proposed for correcting the reconstructed beam profile using two scans in opposite directions.

It is shown that the proposed method also determines the reliability of dynamic measurements of the monitor. This study is essential for other applications of VWM, in particular, for profiling accelerators charged particle beams.

2. The thermal method of operating of a vibrating wire was applied to measure the proton beam profile of the accelerator of the Korean Multi-purpose Accelerator Complex KOMAC.
3. The research on the development of synchronous measurements of secondary particles/radiation on a vibrating wire in the maximal deviating from the fixed stable position of the wire during its oscillation was realized. It is shown that the differential signal-forming algorithm with an inversion of the sign allows remove the background component from the signal generated directly from the beam. Integrating this type of differential signal also removes the fast components of the background (at the oscillation period of the wire). The method allowed appreciably reduces the beam scanning time. The method was tested on photon beams; the experiments to scan electron beams by this method are underway. The method seems very perspective for measuring the beam profiles in accelerators, taking into account the significant increase in the scanning process speed.
4. The accelerated process of profiling based on the resonant method of diagnostic using a vibrating wire made it possible to apply tomographic methods to reconstruction, a two-dimensional profile by a set of one-dimensional profiles corresponding to different scan angles. To reconstruct the two-dimensional profile, the method of filtered back projections was applied. Based on this algorithm, software was developed to reconstruct a complex 2-dimension profile by a set of one-dimensional profiles. The method was experimentally tested on laser beams. It is supposed to continue research on the application of the method for charged particles. It seems that the resonance method for the diagnostics of secondary particles will make it possible to use low-energy photons using fast photodiodes instead of traditional photomultipliers that require additional scintillators and high voltage blocks.
5. Taking into account the perspective direction in accelerator physics for the generation of ultrathin micron beams, a technique has been developed for profiling thin beams in which a vibrating wire is a natural scanner. The first experiments were carried out on focused laser beams. A mathematical algorithm has been developed for reconstructing the beam profile, taking into account the retardation of the measuring scheme.

Considering the high sensitivity of vibrating wire monitors, the use of composite vibrating wire with an active layer of the gadolinium isotope  $^{157}\text{Gd}$  has been proposed. It is shown that sensors based on such of wires can serve as monitors of neutron beams with a complex cross-section profile. Two modifications of such monitors are proposed, based on the thermal method of dependence of the oscillation frequency on the measured neutron flux and the resonant type, in which the composite vibrating wire serves as a resonant target.

