Национальная Научная Лаборатория им. А.И.Алиханяна (Ереванский Физический Институт)



Свойства и специфические параметры новых модификаций мониторов вибрирующей струны для исследования различных пучков

Лазарева Элеонора Генриховна Диссертация на соискание ученой степени кандидата тех. наук

Научный руководитель: д-р физ.-мат. наук, Сурен Гургенович Арутюнян

оглавление

> Введение

Глава 1. Обзор методов диагностики профилей пучков в ускорительной физике и введение в метод вибрирующей струны

- **>Глава 2.** Измерения профилей пучков с помощью вибрирующих струн, тепловой метод
- Глава 3. Измерения профилей пучков с помощью вибрирующих струн, резонансный метод
- Глава 4. Методика РМ-МВС для измерения тонких пучков
- Глава 5. Нейтронные мониторы вибрирующей струны
 Заключение

>Приложение



§2. Датчики вибрирующей струны, их модификации



Начальная частота MBC зависит от первоначального натяжения струны, материала, размеров датчика и лежит в пределах 1-10 кГц.

- Измерен электронный пучок инжектора синхротрона Ер.ФИ с энергией 50
 МэВ и средним током 10 нА .
- Серия экспериментов была проведена на ускорителе PETRA в DESY, было измерено гало протонного пучка со средним током ~ 15 мА и энергией 15 ГэВ.
- МВС был установлен на транспортной линии между линейным ускорителем и 3-х ГэВ-ным синхротроном комплекса J-PARC в Японии
- > MBC был протестирован на установке Fermilab High Intensity Neutrino Source (HINS) с протонным пучком 50 кэВ.
- На APS ANL (Advanced Photon Source of Argon National Laboratory) были проведены эксперименты по измерению профиля рентгеновского излучения от ондулятора с энергетическим диапазоном излучения 6.5-19.5 кэВ и размерами несфокусированного пучка 3×1.5мм.
- На синхротроне APS ANL был проведен эксперимент по измерению параметров электронного пучка по СИ мощностью 99.1 Вт при токе 100 мА.

Глава 2. Измерения профилей пучков MBC, тепловой метод. §1. Принцип измерений

Уравнение теплового баланса:

Время отклика с учетом

$$W_{\rm beam} = W_{\lambda} + W_{\rm rad} + W_{\rm conv}$$

$$\tau_{\lambda} = \frac{c\rho L^2}{8\lambda}$$

Отвод мощности механизмами

> теплопроводности 🕨 конвекции

> излучения

$$W_{\lambda} = 4(T - T_0) \frac{\lambda S}{L}$$

 $W_{\text{CONV}} = \frac{T - T_0}{2} \alpha_{\text{CONV}} \pi dL$
 $M_{\text{CONV}} = \frac{T - T_0}{2} \alpha_{\text{CONV}} \pi dL$

$$\tau_{\rm CONV} = \frac{c\rho d}{4\alpha_{\rm CONV}}$$
$$\tau_{\rm RAD} = \frac{c\rho d}{16\varepsilon\sigma_{\rm ST_B}T_0^3}$$

Время отклика с учетом 3-х механизмов стока

Пример: Для MBC
$$d = 0.1$$
 мм, $L = 40$ мм,
 $\alpha_{conv} = 20$ Вт/(м²×К),
 $\tau \approx 3.9$ с, $\tau_{\lambda} \approx 48.5$ с, $\tau_{RAD} \approx 24.7$ с и $\tau_{conv} \approx 4.9$ с

 $W_{\rm RAD} = 2\varepsilon\sigma_{\rm ST B}T_0^3(T - T_0)\pi dL$

$$\tau = \frac{c\rho}{8(\lambda / L^2 + 2\varepsilon\sigma_{\text{ST}_B}T_0^3 / d + \alpha_{\text{CONV}} / 2d)}$$

Расчеты нагрева струны. Ионизационные потери для протонов

У

Ер, МэВ	<i>dEp/dx</i> ,МэВ/см	Ер, МэВ	<i>dEp/dx</i> ,МэВ/см
10	384.63	1000	23.87
11	359.92	2000	22.63
12	338.57	3000	23.04
13	319.92	4000	23.66
14	303.46	5000	24.29
15	288.83	6000	24.88
16	275.73	7000	25.43
17	263.91	8000	25.92
18	253.20	9000	26.37
19	243.44	10000	26.79

Таблица	ионизационных	потерь		
для прот	она в вольфраме		$\left(dE \right)$	
	потери в струне дл	$\delta_{\rm p} =$	\underline{aL}_{p}	$\times (\pi d/4)$
	одного протона	p	dx	

равнение,		Г	$(\delta I/a)$
прщее	ΔF	<u> </u>	$\alpha \epsilon_{heat} (O_p I_p / e)$
цвиг астоты	F_0	$2\sigma_0$	$\left[8\lambda S / L + 4\varepsilon \sigma_{\rm ST-B} T_0^3 \pi dL + \eta \alpha_{\rm conv} \pi dL\right]$
<u>имер:</u> L=	80 мм	, <i>d</i> = 10	00 мкм ,Е = 15 МэВ, δ_p = 2.27 МэВ.
я протонн	юго пу	учка с	гауссовым профилем(σ =15 мм и I

Пример: L=80 мм, d=100 мкм , E=15 МэВ, $\delta_p=2.27$ МэВ. Для протонного пучка с гауссовым профилем($\sigma=15$ мм и I=100 нА, падающим на помещенную в центре тока пучка струну: $I_{total} = 2.175 \times 10^{-10}$ А. При $\varepsilon_{heat}=0.9$, $\alpha_{conv}=17$ Вт/(м²К) повышение температуры струны составляет 0.8 К и депонированная в струне мощность – 0.44 мВт (предельные значения мощности (диапазон датчика)) с используемыми параметрами составляет 1.5×10⁻⁶ – 0.15 Вт). При $F_0 \approx 2000$ Гц, $\Delta F/F_0 \approx 2.9$ Гц.

§2. Общее описание MBC и схема автогенерации колебаний струны



- Зазор между магнитами -1мм
- Напряженность в зазорах-0.7-0.8 Т
- Добротность-10⁴

Чувствительный элемент МВС струна (1), натянута между двумя зажимами (4). Материал струны прошедшая специальную обработку термическую нержавеющая сталь, бериллиевая бронза, вольфрам. Струна проходит через два участка магнитного поля, образованных парой постоянных магнитов (2) -сплавы SmCo или **NdFeB** с полюсами из мягкого железа (3). Система закреплена жесткой металлической на основе (5).



Блок со схемой автогенерации и микроконтроллером PIC18F252

Параметры МВС



Температурные диапазоны МВС:

Диапазон перегрева:

≻ вольфрам 0-600 К, чувствительность - 4,25 Гц / К
 ≻ нерж. сталь 0-100 К, чувствительность -30,7 Гц / К

Разрешение по частоте

для обоих материалов-0.005 Гц <u>Разрешение по температуре</u>: ≻ вольфрам -1 мК ≻ нерж. сталь - 0,25 мК

Программа выбора параметров МВС

Wire material C Image: Constraint of the second secon	$\Delta F / \Delta T = \frac{E\alpha}{2\sigma}$
Wire diameter, mm 0.125 Aperture, mm 5 Init. frequency, Hz 7500 Assembly weight, g 8.488E+02	$F_0 = \frac{1}{I} \sqrt{\sigma_0 / \rho}$
Wire F dependence on T, Hz/K 9.948E+00 VWM response time, s 1.131E+00 Wire T dependence on deposited power, K/W 1.472E+03	L
Proceed 1 min max Wire T shifts limits, K 1.005E-03 2.010E+02 Wire deposited power limits, W 6.829E-07 1.366E-01	$\Delta T = \frac{1}{8\lambda S / L + 4\varepsilon\sigma_{s}}$
VWM response on fixed scan postion Position/Sigma 0.1 Wire temperature increase, K 1.847E+03	Пределы сдви
Wire deposited power, W 1.255E+00 Wire deposited current, A 4.905E-05	определяются сдвигами часто
Frequency shift, Hz 1.837E+04	$\Delta F_{MN} = 0$

Рабочее окно программы

$$F / \Delta T = \frac{E \alpha F_0}{2\sigma_0}$$
 > Зависимость частоты струны
 F от температуры T
> Начальная частота струны
(вторая гармоника
собственных колебаний), σ_0 -
0.7 от предела прочности.

 $\Delta T = \frac{W_{beam}}{8\lambda S / L + 4\epsilon\sigma_{ST-B}T_0^3\pi dL + \eta\alpha_{conv}\pi dL}$ Пределы сдвига T MBC определяются предельными сдвигами частоты

 Зависимость температуры струны *Т* от депонированной в струну мощности W_{beam}

 $\Delta F_{MIN} = 0.005 Hz$ - разрешение датчика

 $\Delta F_{MAX} = 1000 Hz$ -максимальный сдвиг частоты

Динамический диапазон – около 10⁶, точность измерения – лучше 0.01 Гц.

Программа выбора параметров МВС



Position/Sigma представляет положение струны в единицах сигмы пучка $\sigma_{\rm scan}$ вдоль направления сканирования

$$\sigma_{SCAN} = \sigma_X, \sigma_{TRAN} = \sigma_Y$$
 - гориз. напр.

 $\sigma_{\scriptscriptstyle SCAN} = \sigma_{\scriptscriptstyle Y}, \sigma_{\scriptscriptstyle TRAN} = \sigma_{\scriptscriptstyle X}$ - верт. напр., где

 σ_{TRAN} - распределение пучка вдоль направления струны

 $I_W = I_0 * K_A * \frac{d}{\sqrt{2\pi\sigma_{SCAN}}} * \exp(-x^2/2)$

$$K_{A} = \int_{-A/2}^{+A/2} dz * \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{TRAN}} * \exp(-z^{2} / 2 / \sigma_{TRAN}^{2})$$

- ≻ ток частиц, проникающих в струну, где I₀суммарный ток, x - позиция струны в единицах 𝒯_{TRAN}
 - ограничение кол-ва частиц, пересекших струну, вызванное апертурой MBC,

§3. Результаты эксперимента на протонном пучке КОМАС

Энергия пучка-14.5 МэВ, ток ≈ 100 нА, кол-во частиц цуге ≈ 10¹¹, частота повторения цугов 0.1 Гц.



- 13 измерений в разных положениях датчика $\sigma = 15$ мм, $x_0 = -20$ мм, G = 0.345 Гц $g(x) = G \exp(-(x - x_0)^2 / 2\sigma^2)$
- Усредненный профиль (измерения падения частоты от каждого цуга) пучка в течение времени эксперимента. 12

Transversal coordinate, mm

§ 4. Эффекты скорости сканирования при измерениях профиля лазерного пучка MBC



Min (0.0166 мм/с (10 шагов)и тах скорости (0.3322 мм/с (200 шагов)) сканирования.

V, mm/s	fwhm,mm	t, fwhm,s	poins	F shif,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

- Зазор между кривыми
 обусловлен тепловой
 инерцией процесса нагрева
 струны.
- Мера соответствия измерений MBC реальному профилю пучка заключается в сравнении частотных откликов MBC при прямом и обратном сканировании 13

§5. Томографический метод восстановления двумерного профиля пучка









Геометрическое. распределение неоднородного пучка. Тестовый 2-D пучок, осипространственные координаты x,y

 Конструкция с массивом вибрирующих струн MBC – арфа верт.ось-смещение линии про-ния относительно центра координат ξ . гориз. ось – угл проецирования

(0-π**)**.

Восстановленое распределение неоднородного пучка.Алг. ОП.

Восстановленое распределение неодн. пучка. Алг. ФОП.

> Измерение поперечного двумерного профиля высокоточного протонного пучка в ЛУ в Университете Цинхуа 14





Глава 3. §§1, 2. Измерения профилей пучков, резонансный метод MBC



Схематическое представление метода

Разность измеряемых сигналов в положениях 1 и 2 пропорциональна разнице в интенсивности пучка

Смещением вибрирующей струны в новые положения, оцениается градиент профиля пучка.

Сдвиг между последовательными левыми крайними положениями струны при движении датчика (1 и 3), пропорционален скорости сканирования

Алгоритм устранения фоновых сигналов

$$g_{i} = k_{1} * \begin{cases} [S_{i+1} - S_{i}], i = 1, 3, 5, \dots \\ -[S_{i+1} - S_{i}], i = 2, 4, 6, \dots \end{cases}$$

 S_i-набор измерений сигнала с фотодиода с последовательных полупериодов колебаний вибрирующей струны, Нечетный/четный индексы i соот.-вуют измерению в макс. левом/правом положениях струны (b). Изменение знака градиента g позволяет учитывать только пространственные градиенты, соответствующие рассеянию пучка фотонов на вибрирующей струне и полностью исключает фоновую компоненту

§3. Эксперимент РМ-СВС





РМ-МВС (1), маятник (L=890 мм) (2), (3) - лазер, (4) - схема фотодиода сканирований с РМ-СВС в течение одного набора экспериментов (7 полных колебаний маятника, 14 скан.).

L = 40 мм, F = 2500 Гц, T = 400мкс, Vmax = 150 мм/с, ts = 20 мс, a = 0.15 мм, A = 3мм, d = 0.1 мм L=80 мм, F = 1250 Гц, T = 800мкс, Vmax = 75 мм/с, ts = 40 мс, a = 0.3 мм, A = 3мм, d = 0.1 мм ₁₆

Восстановление профиля лазерного пучка с учетом затухания колебаний маятника



граничные условия $x(t) = (A / 2 - (A + c(t_2 - t_1)^2)(t - t_1) / (t_2 - t_1) + c(t - t_1)^2)$ c = 8.3 мм/c²

 $x(t_1)=A/2$ ($t_1=15.109$ с - время входа струны в пучок и $x(t_2)=A/2$ ($t_2=15.360$ с - время выхода Слева: Восстановление профиля лазерного пучка (14-ое сканирование): (а) – с использованием приближения равномерного движения, (b) – с включением поправок ускоренного движения, (с) – желтая узкая линия показывает, что члены высшего порядка в разложении траектории движения центра струны не влияют на конечный результат.

Справа: Результаты всех 14-и сканирований

Резонансное извлечение рассеяния на вибрирующей струне



Дифференциальный сигнал захватывает только первый пик (отражения от вибрирующей струны) и полностью отфильтровывает второй пик (отражения от механической части датчика), что позволяет восстановить профиль лазерного пучка

§4. Применение резонансного метода в томографии. Программное обеспечение (ФОП).



Численное моделирование на тестовом пучке. Реконструкция 2D-профиля лазерного пучка

Профиль тестового пучка, созданный графическими программными инструментами.



Программное обеспечение (ФОП).

 $\operatorname{Rec}_{\varphi}(i_x, i_y) = \operatorname{Pro}_{y}(i_{\varphi}, i_y) / N_{scr}$ $\operatorname{Rec}_{0}(N_{scr}, N_{scr}) = \operatorname{Rotate}(\operatorname{Rec}_{\varphi}(N_{scr}, N_{scr}), -\varphi)$ $\operatorname{Rez}_{Beam}(i_x, i_y) => \operatorname{Rez}_{Beam}(i_x, i_y) + \operatorname{Rec}_{0}(i_x, i_y),$ $\operatorname{Rez}_{Beam}(i_x, i_y) => \operatorname{Rez}_{Beam}(i_x, i_y) + w_1 \operatorname{Rec}_{0}(i_x, i_y \pm 1)$ $\operatorname{Rez}_{Beam}(i_x, i_y) => \operatorname{Rez}_{Beam}(i_x, i_y) + w_2 \operatorname{Rec}_{0}(i_x, i_y \pm 2)$

$$\operatorname{Rez}_{\operatorname{Beam}(i _ x, i _ y)} \Longrightarrow \operatorname{Rez}_{\operatorname{Beam}(i _ x, i _ y)} + w_3 \operatorname{Rec}_{0}(i _ x, i _ y \pm 3)$$



Основной вид
 поперечного сечения
 лазерного пучка
 Проекции от пучка
 Реконструкция 2D профиля лазерного
 нучка методом ФОП

Схема и фотография эксперимента по восстановлению профиля лазерного пучка.



(1) - MBC, (2) - лазер, установленный на вращающемся вале шагового двигателя (3), (4)- двигатель постоянного тока с фиксированной угловой скоростью вращает MBC, (5) - контактный диск, (6), (7) – оптопрерыватель, (8) - быстрый фотодиод с Front_End электроникой.

Глава 4. §1. Применение методики РМ для профилирования тонких пучков

Схема и фотография эксперимента.





1 – лазер, 2 – коллиматор, 3 – короткофокусная линза, 4 – фотодиод, 5 – вибрирующая струна, 6 – поворотный столик с микровинтом.

Характерные геометрические параметры – диаметр струны - 100 мкм, амплитуда колебаний струны ~ 200 мкм, размеры лазерного пучка в фокусе ~ 100 мкм. Шаг измерений фотодиода -12.45 мкс. Скорость сканирования –несколько м/с.

§ 2. Предварительные эксперименты



Измерение стабильного источника излучения (солнечного света) На фоне 50 Гц обнаружились колебания измерений лазерного пучка с частотой ~ 480 Гц.



Интерполяция измерений функцией вида

 $g(t) = 2329(1 - 0.028\exp(-(t / \tau)))$

g₀= 2329 мВ значение функции при выходе на установившийся режим

Время приведено в шагах измерений -12.45 мкс

 $\tau = 4.33$ ~ выходу измерительной системы на 60% устанавливающегося значения за 55 мкс ²³

§3. Результаты основного эксперимента, алгоритм восстановления профиля



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

$$N(x) = \begin{cases} 100 \times (x+2)(x_{\rm p}+2), -2 < x < x_{\rm p} \\ 100 \times (2-x) / (2-x_{\rm p}), x_{\rm p} < x < 2 \end{cases}$$

х_р - максимум распределения фотонов в пучке.

τ - постоянная времени датчика -мера инерционности измерительной системы

Числ.реш. определяет отклик измерительной системы g(t) по функции физического процесса f(t)

f(t) = N(x(t))

 $\tau \frac{dg(t)}{dt} + g(t) = f(t)$

 $g^{i+1} = g^{i} + (f^{i+1} - g^{i}) / \tau$

 $f_{\rm rec}^{i+1} = g^{i+1} + \tau(g^{i+1} - g^i)$ 24



модель: 1- ф-я процесса, f(t) 2-запаздывающий отклик g(t), 3- восстановленная по запаздывающему отклику g(t) ф-я процесса $f_{rec}(t)$. Профиль, восстановленный по $f_{rec}(t)$. 4 - модельный профиль, 5 - профиль, восстановленный по реконструированной ф-и процесса $f_{rec}(t)$. Зависимость количества фотонов от времени: 1 - сигнал с фотодиода, 2 - положение центра струны в процессе ее колебаний, $3 - f_{rec}(t)$, т.е - рассеяние лазерного излучения на струне. (b). Зависимость количества фотонов от координаты - профиль сфокусированного лазерного пучка.

Глава 5. §§ 1, 2. Нейтронные мониторы на базе композитных вибрирующих струн

Реакция захвата нейтронов Gd и депонирование энергии нейтронов в струне Сечения захата для изотопов гадолиния, (E=0.025 эВ)

_	% в Gd	а.барн	Значения сечения захвата для <i>Gd</i> и ¹⁵⁷ <i>Gd</i> с при разных энерги					
Cd	100	/18800		λ, ΑΟ	Е _n , эВ	V, м/с	<i>ज</i> (барн) ,Gd	σ(барн) ¹⁵⁷ 0
152C d	100	1100		1	0,081894	3955	13563.56	75323.4
154C J	0.2	1100		1.8	0,025276	2197,2	48149.41	253778
¹⁵ G0	2.2	90		3	0.009099	1318.3	70597.77	367842
¹³⁵ Gd	14.7	61000		4	0.005118	988.76	89066.84	464373
¹⁵⁶ Gd	20.6	2			0,000110	200,70		101070
¹⁵⁷ Gd	15.68	255000	$n+^{157}$	$Gd \rightarrow 158$	$\mathrm{Gd}^* \rightarrow {}^{158}\mathrm{Gd}$	$+ \gamma + conve$	ersion electro	ns+7.9M
¹⁵⁸ Gd	24.9	2.4	64	64	64 Ou			
¹⁶⁰ Gd	21.9	0.8	$n + \frac{155}{64}$	G_{4} Gd $\rightarrow \frac{156}{64}$	$Gd^* \rightarrow {}^{156}_{64}Gd$	$+\gamma+conv$	ersion elect	rons+8.5N

Для вкладов электронов и *X*-излучения ~70 кэВ.

Для вклада ү-излучения с энергией 7.9 МэВ учитываются свойства материала струны.

Для вольфрамовой струны d = 100 мкм, покрытую слоем Gd h = 10 мкм. Коэф. поглощения $\mu = 8.63 \times 10^{-1}$ см⁻¹ ($\mu/\rho = 4.47 \times 10-2$ см²/г). 68.2 кэВ будет преобразовано в тепло в вольфрамовой струне d=100 мкм, для d=10 мкм ~ 7 кэВ. Оба механизма приводят к отложению тепла в вибрирующую струну из вольфрама $\epsilon = 138.2$ кэВ для средних размеров HMBC и 77 keV - для малых.

Композитная струна со слоем Gd, частотная и температурная зависимости

 $n\sigma L = 1 > n$ -плотность атомов Gd.

L-длина пробега нейтронов в Gd

$$n = \frac{\rho \times N_A}{A} = 3.03 \times 10^{22} c M^{-3}$$

≻ для Gd L= 6.7 мкм,
 > для ¹⁵⁷Gd L= 1.3 мкм
 → нейтроны, пересекающие струну, будут захвачены

$$\frac{\Delta F}{\Delta T} \approx -\frac{(\alpha_W E_W S_W + \alpha_{Gd} E_{Gd} S_{Gd})}{2\sigma_0 (S_W + S_{Gd})} F_0$$

роны, пересекающие струну, оудут чены

частотно - температурная зависимость для композитной вольфрамовой струны

$$\frac{\Delta F}{I_n} = \frac{(\lambda_W E_W S_W + \lambda_{Gd} E_{Gd} S_{Gd}) F_0 \varepsilon_n l_A (d+2h)}{2\sigma_0 (S_W + S_{Gd}) [8(\lambda_W S_W + \lambda_{Gd} S_{Gd}) / l_W + 4\varepsilon \sigma_{ST_B} T_0^3 \pi dl_W + \eta \lambda_{CONV} \pi dl_W / 2]}$$

Соотношение между сдвигом частоты струны и значением измеренного потока нейтронов

$$\tau = \frac{(S_W \rho_W c_W + S_{Gd} \rho_{Gd} c_{Gd})}{8(\lambda_W S_W + \lambda_{Gd} S_{Gd}) / l_W + 4\varepsilon \sigma_{ST_B} T_0^3 \pi dl_W + \eta \lambda_{CONV} \pi dl_W / 2}$$

время отклика для нейтронных мониторов
 (в воздухе и в вакууме) 27

Нейтронные мониторы средних и малых размеров



HMBC. (a) - среднего и (b) – малого размера

Характеристики нейтронных мониторов средних и малых размеров

размер	d _{w,} µm	h _{Gd,} μm	L, mm	a,mm	Динам. диапазон интенсивности детектируемых потоков <i>п</i> в воздухе n/cm ² /s	Динам. диапазон интенсивности детектируемых потоков <i>П</i> в вакууме n/cm ² /s	τ _a , s	τ _v , s
средний	100	10	40	20	$2 \times 10^{10} - 2 \times 10^{15}$	109-1014	0.3	3
малый	10	2	5	5	3×10 ⁸ -3×10 ¹³	8×10 ⁷ -8×10 ¹²	10-3	70×10 ⁻³

Деградация гадолиния

Участотное разрешение 0.01 Гц ~ точности в температуре ≈ 1.8 мК (средний) и ≈ 0.03 мК (малый)

Каждый захват нейтронов изотопами гадолиния с большими поперечными сечениями (155 Gd и 157 Gd) превращает их в практически «мертвые» для измерения изотопы (соответственно 156 Gd и 158 Gd). Число всех атомов *Gd* в объеме апертуры струны N=2×10¹⁸ для HMBC средних размеров (поток (н/с) * τ =1/2N). Время жизни около 60 дней.

Для HMBC малого размера срок службы более одного года из-за более низкого разрешения потока ²⁹

1. Исследован процесс профилирования лазерного пучка при разных скоростях сканирования. Обоснованы рекомендации по выбору предельных скоростей сканирования.

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

3. Разработан метод 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 отсекать фоновую составляющую от сигнала, генерируемого непосредственно пучком. Метод позволил существенно сократить время сканирования пучка. (полное сканирование ~ 20 мс, сравнивая с тепловым методом (измерение одной точки профиля требует времени от долей с до 1с).

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.

5. Разработана методика профилирования тонких пучков, в которых вибрирующая струна является естественным сканером. Предложен алгоритм восстановления профиля с учетом запаздывания измерительной схемы.

6. Для измерения нейтронных пучков разработаны датчики вибрирующей струны с композитными струнами, содержащими изотопы гадолиния 157 и 155 с большими сечениями захвата тепловых нейтронов.

- Результаты измерений профиля протонного пучка ускорителя (КОМАС) с помощью MBC 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.

Публикации, личный вклад автора

1. S. G. Arutunian, J. Bergoz, M. Chung, G. S. Harutyunyan, <u>E. G. Lazareva</u>, Thermal neutron flux monitors based on vibrating wire, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A** 797, 37-43, (**2015**).

Обзор и сравнение методов измерения нейтронов, расчет времени отклика монитора для двухслойных струн, сравнение известных методов с предлагаемым, в частности расчет времени деградации слоя гадолиния.

2. S. G. Arutunian, M. Chung, G. S. Harutyunyan, A. V. Margaryan, <u>E. G. Lazareva</u>, L. M. Lazarev, and L. A. Shahinyan, Fast resonant target vibrating wire scanner for photon beam, **Review of Scientific Instruments** 87, 023108 (**2016**).

Эксперимент по детальному сканированию на одном периоде колебаний для определения временных привязок положения струны по электрическому сигналу. Расчет коррекции выходного сигнала с учетом затухания колебаний маятника, на котором был закреплен монитор.

3. D. Choe, M. Chung, S.Y. Kim, S.G. Arutunian, A.V. Margaryan, <u>E. G. Lazareva</u>, 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, <u>E.G. Lazareva</u>, 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**) 012016, pp. 1-11 (25th Annual International Laser Physics Workshop), doi:10.1088/1742-6596/755/1/011001.

В методе фильтрации обратным проецированием предложение использование алгоритма вращения тремя сдвигами.

5. М.А. Агинян, С.Г. Арутюнян, D. Choe, M. Chung, Г.С. Арутюнян, S.–Y. Kim, <u>Э.Г. Лазарева</u>, А.В. Маргарян, Прецизионная вневакуумная система мониторинга протонного пучка на базе вибрирующей струны. **Изв. НАН Армении, Физика**, 52, 151 (**2017**). Расчет параметров монитора вибирующей струны для протонного пучка ускорителя ..КОМАС.

Обработка результатов эксперимента.

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

Обработка данных экспериментов по на разных скоростях сканирования, расчет параметров.

<u>7. Э.Г. Лазарева</u>, Вибрирующая струна для измерения профиля тонких пучков в ускорителях: предварительные тесты на лазерном пучке **Известия НАН Армении, Физика,** т.53, No2, c.181–192 (**2018**).

Алгоритм реконструкции профиля пучка с учетом запаздывания измерительной системы. Эксперимент. Обработка данных