

УДК 53.083.62; 621.384.6

ВИБРИРУЮЩАЯ СТРУНА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ТОНКИХ ПУЧКОВ В УСКОРИТЕЛЯХ: ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ТЕСТЫ НА ЛАЗЕРНОМ ПУЧКЕ

Э.Г. ЛАЗАРЕВА

Национальная научная лаборатория им. А.И. Алиханяна, Ереван, Армения

e-mail: ella.lazareva@yerphi.am

(Поступила в редакцию 7 февраля 2018 г.)

Изучена возможность использования вибрирующей струны в качестве мишени в методе сканирования поперечных профилей тонких пучков в ускорителях. В случае, когда поперечные размеры пучка сравнимы с амплитудой колебаний струны, вибрирующая струна может использоваться для быстрого измерения поперечного профиля пучка без перемещения датчика. Процедура сканирования заменяется использованием движения струны в процессе ее механических колебаний. Метод опробован на сфокусированном пучке полупроводникового лазера с размером пятна в фокусе ~ 0.1 мм. Восстановление поперечного профиля производится на основе измерений фотонов, отраженных от вибрирующей струны датчика, с помощью быстрых фотодиодов.

1. Введение

Датчики на основе вибрирующей струны широко используются во многих областях физики. Свойство изменения частоты колебаний струны в зависимости от ее натяжения положено в основу ряда датчиков, измеряющих давление газов, напряжения конструкций, вязкости газов, прецизионной термометрии [1].

Для измерения поперечных профилей пучков широко используются струнные датчики, в которых производится измерение потока вторичных частиц или фотонов, образующихся в процессе рассеяния пучка на материале струны. Такой метод измерения требует наличия движущейся мишени в виде струны и системы измерения вторичных частиц/фотонов. Кроме того, в поле зрения системы измерения помимо потока вторичных частиц или фотонов, образующихся в процессе рассеяния пучка на струне, попадает большое количество фоновых сигналов, искажающих результаты измерений и уменьшающих их точность.

Разработанные в Ереванском физическом институте датчики вибрирующей струны (ДВС) обладают беспрецедентной точностью и большим динамическим диапазоном измерений (почти шесть порядков) [2–4]. В их числе и

многострунные датчики, позволяющие оценивать профиль пучка по нескольким точкам без применения сложных сканирующих механизмов [5, 6]. Разработаны специальные датчики для измерения нейтронных пучков, в которых вибрирующая струна покрывается слоем гадолиния [7]. Создана модификация датчика – сканера, в котором в качестве мишени предложено использовать вибрирующую струну и синхронно с измерениями частоты колебаний струны измерять образующиеся при взаимодействии пучка со струной вторичные частицы/фотоны. Тестовые эксперименты такой установки были проведены на фотонных пучках [8].

Задача измерения и управления размерами малого пучка ($\ll 1$ мм) актуальна в линейных ускорителях, в том числе основных линейных ускорителей линейных коллайдеров и линиях передач [9]. Для обеспечения наибольшей светимости необходимо добиться максимальной плотности пучков в месте их встречи. Поэтому одной из главных задач при проектировании коллайдеров является фокусировка пучков в месте их встречи в пятно порядка нескольких микрометров в диаметре [10]. С учетом достижений в разработке новых методов фокусировки пучков (мульти-поворотные ахроматические ячейки магнитной структуры, поворотные магниты с продольным градиентом [11]) появилась возможность проектирования источников излучения четвертого поколения синхротронного типа, конкурирующих с проектами лазеров на свободных электронах [12]. Предполагается оперирование пучками с размерами в несколько микрометров. Высокое качество электронных пучков, в том числе малые поперечные размеры пучков (<100 мкм), требуются для дифракционных экспериментов с временным разрешением. В качестве примера такой установки приведем REGAE (The Relativistic Electron Gun for Atomic Exploration) [13, 14]. Получение, а следовательно, и измерение пучков с малыми эмиттантами и малыми поперечными размерами с помощью диагностических средств с большим динамическим диапазоном весьма актуальны.

Целью настоящей работы является исследование процесса измерения профиля тонких пучков на примере сфокусированного лазерного пучка. Предполагается, что для профилирования пучков заряженных частиц будут измеряться фотоны или другие вторичные частицы, возникающие при рассеянии пучка на струне.

2. Методика эксперимента

В настоящей работе для измерения профиля лазерного пучка предложено использовать непрерывное измерение отраженных от вибрирующей струны фотонов с помощью быстрого фотодиода. В случае, когда поперечные размеры пучка сравнимы с амплитудой колебаний струны, метод может использоваться

для быстрого измерения поперечного профиля пучка без движения самого датчика. Сканирование осуществляется движением струны в процессе ее колебаний. Предлагаемый метод может быть использован для измерения профилей тонких пучков заряженных частиц.

Принцип действия ДВС основан на измерении изменения частоты вибрирующей струны с закрепленными концами при взаимодействии с пучком (подробное описание см. в работах [8, 15]). Колебания струны генерируются на первой гармонике. Средняя область струны при этом остается свободной для сканирования пучка. В правильно собранном ДВС колебания струны происходят в одной плоскости, ортогональной магнитному полю. В электронной схеме предусмотрен блок прецизионной стабилизации амплитуды колебаний струны. Стабилизация механических колебаний особенно важна в нашем случае, когда струна используется как естественный сканер. В качестве источника информации о локальной плотности пучка используются возникающие от взаимодействия пучка со струной фотоны, измеряемые быстрым фотодиодом. Скорость сканирования определяется амплитудой и частотой колебаний струны и может достигать величин порядка нескольких м/с. Частота поперечных колебаний струны F определяется зависимостью [7]

$$F = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}, \quad (1)$$

где L – длина струны, σ – механическое напряжение в струне и ρ – плотность материала струны.

Следует отметить, что из-за неидеальности магнитного поля датчика реальные колебания струны происходят не в одной плоскости, причем, собственные колебания частоты в направлении, поперечном к данной плоскости, не совпадают. Фактически струна совершает сложные колебания, определяющиеся наложением двух частот, соответствующих двум поперечным степеням свободы колебаний струны. Поэтому измерение движения вибрирующей струны «на лету» полезно для изучения ее реальной траектории, в частности, для проверки качества ДВС, в котором выходным сигналом струны является изменение ее частоты. Точность таких датчиков достигает значений 0.001 Гц и соответствует изменению температуры струны < 1 мК.

На рис.1 представлена схема эксперимента. ДВС расположен таким образом, чтобы сфокусированный короткофокусной линзой лазерный пучок попадал в центр струны. В эксперименте использовался непрерывный полупроводниковый лазер (Laser Pointer JD-850) с длиной волны 532 нм и мощностью 100 мВт.

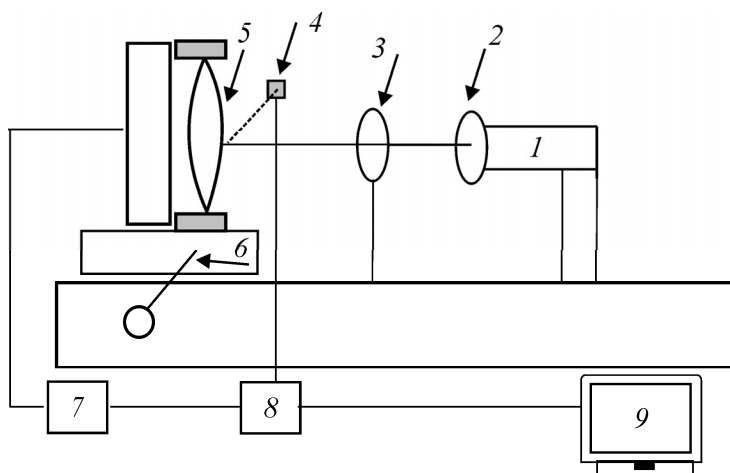


Рис.1. Схема эксперимента: 1 – лазер, 2 – коллиматор, 3 – короткофокусная линза, 4 – быстрый фотодиод, 5 – вибрирующая струна, 6 – поворотный столик с микровинтом, 7 – система генерации колебаний струны, 8 – система измерения фотонов, попадающих на фотодиод и 9 – компьютер.

Лазер прикрыт коллиматором для уменьшения мощности. ДВС и быстрый фотодиод, измеряющий отраженные от струны фотоны, расположены на поворотном столике с микровинтом. Вибрирующая струна датчика ортогональна плоскости столика. Вращение поворотного столика приводило к перемещению вибрирующей струны в пятне сфокусированного лазерного пучка и в результате менялся угол между направлением фотодиода и оптической осью системы.

Для измерения отраженного от струны лазерного излучения использовалась электронная схема, разработанная для резонансного метода с использованием вибрирующей струны в качестве мишени (подробное описание см. в работах [4, 8]). Процесс измерения синхронизируется с частотой колебаний струны или с внутренним генератором частоты измерительной системы и запускается положительным или отрицательным фронтами частотного сигнала. В случае использования сигнала с вибрирующей струны форма сигнала трансформировалась из синусоидальной в прямоугольную специальным конвертором. После старта процесса производилось N_m измерений (пачка). Число N_m могло задаваться в пределах от 1 до 254 (короткие пачки) либо 255×32 (длинная пачка). После окончания данной пачки измерений (короткой или длинной) процесс повторяется с новым фронтом частотного сигнала. Количество пачек задается отдельным параметром и определяется емкостью памяти измерительного канала. Время одного измерения фотодиодом составляло 12.45 мкс.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Предварительные эксперименты

До основного эксперимента, целью которого является измерение профиля сфокусированного лазерного пучка при помощи ДВС, был осуществлен ряд экспериментов для выявления эффектов, которые могут дать вклад в процесс измерения профиля пучка.

Как отмечалось, вибрирующую струну предполагается использовать в качестве естественного сканера. Важно при этом, чтобы колебания струны были по возможности стабильными, в том числе в случае падения на струну лазерного излучения. С этой целью предварительно был проведен эксперимент по проверке стабильности частоты используемого в эксперименте ДВС, облучаемого сфокусированным лазерным излучением с различной мощностью.

На рис.2 представлена зависимость частоты ДВС от выходной мощности лазера, регулируемой изменением напряжения блока питания лазера в диапазоне 2.53–2.68 В.

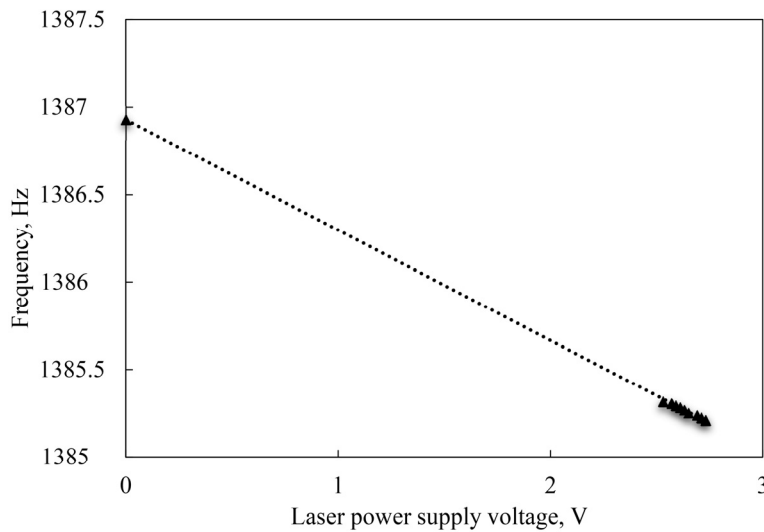


Рис.2. Зависимость частоты ДВС от напряжения блока питания лазера. Эксперимент и линейная интерполяция (пунктирная линия).

При попадании на струну фотонов струна нагревается, что приводит к уменьшению ее натяжения и падению частоты. Эксперимент показал, что стабильность частоты оставалась на уровне 0.01 Гц как без облучения струны лазером, так и при облучении струны лазером с различной мощностью. Формула (1) позволяет оценить, что 0.1 мВт мощности лазера, преобразованной в нагрев струны, приводит к падению частоты на 1.5 Гц [15].

Измерения по проверке сигнала измерительной системы проводились моделированием сигнала от фотодиода эквивалентной сборкой делителя из резисторов при двух вариантах питания измерительной системы – сетевом и аккумуляторном. Результаты измерения показали наличие в сигнале шумов с частотой 50 Гц при питании схемы от сети, а также по каналу передачи информации.

Проводились также измерения стабильного источника излучения (солнечного освещения) фотодиодом. При этом эффект шумов с частотой 50 Гц усиливался из-за дополнительных проводов от электронной платы к фотодиоду.

Следующий предварительный эксперимент был проведен с целью проверки стабильности лазера путем измерения фотонов, отраженных от невибрирующей струны. Результат эксперимента, который показывает нестабильность лазера, представлен на рис.3. В сигнале на фоне шумов с частотой 50 Гц обнаружилось колебание измерений лазерного пучка с частотой ~ 480 Гц.

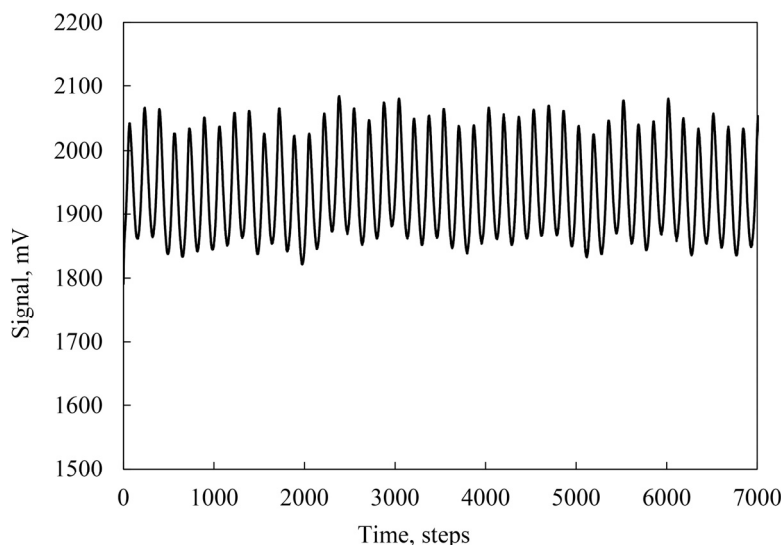


Рис.3. Зависимость интенсивности лазерного пучка от времени.

Важную роль в предлагаемом методе измерения играет быстродействие измерительной системы. Для определения этого параметра был задействован алгоритм измерения коротких пачек сигнала ($N_m = 254$). Постоянный сигнал с фотодиода моделировался эквивалентной сборкой делителя из резисторов и аккумуляторным питанием измерительной системы. На рис.4 представлена зависимость сигнала измерительной системы от времени в режиме коротких пачек. Из рисунка видно, что каждая пачка измерений, после паузы в несколько сот микросекунд, начинается с нарастания сигнала, характеризующего быстродействие

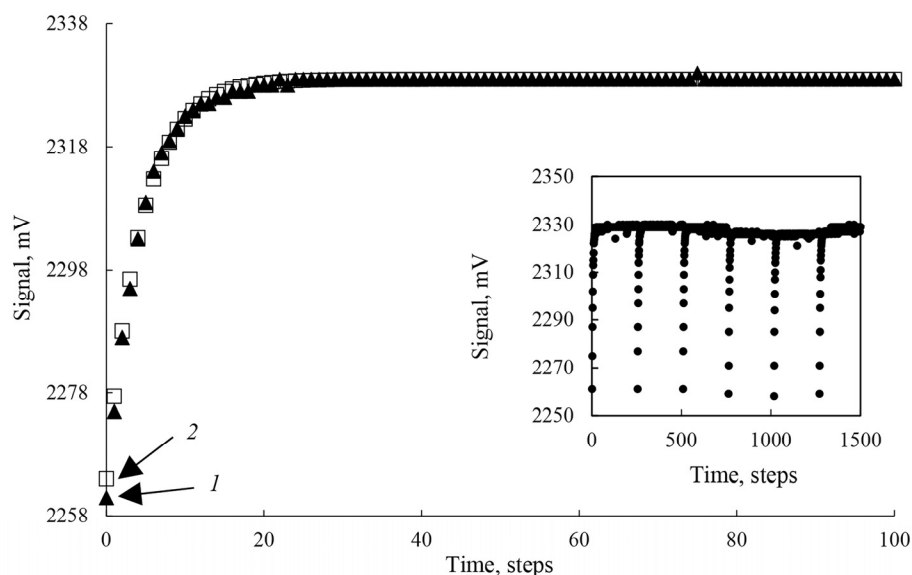


Рис.4. Зависимость сигнала измерительной системы от времени: 1 – эксперимент и 2 – интерполяция. На вставке представлен общий вид сигнала, содержащий несколько пачек измерений.

измерительной системы. 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.

3.2. Основной эксперимент

На рис.5 показаны зависимости сигналов с фотодиода для двух положений ДВС – в позициях 8 и 32. Номера позиций струны отсчитаны от условного нулевого значения, соответствующего положению струны за пределами пучка. По первому каналу измерительной системы измерялись показания фотодиода, по второму каналу – усиленный сигнал частоты колебаний вибрирующей струны. Кроме того, проводились измерения отраженных фотонов от неподвижной струны в том же положении ДВС. Как видно из рис.5а частота сигнала с фотодиода совпадает с частотой колебаний струны. На положительном фронте сигнала видно появление характерного плеча, указывающего на попадание центра измеряемого пучка в область заметания вибрирующей струны. Как будет показано

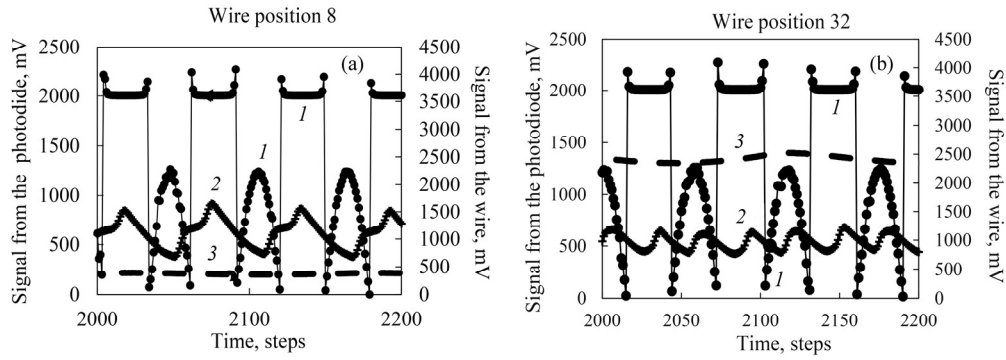


Рис.5. Зависимости от времени электрического сигнала с вибрирующей струны (1), с фотодиода от вибрирующей (2) и невибрирующей (3) струны в двух положениях ДВС: в (а) 8 и (b) 32 позициях.

ниже, образование плеча только на одном склоне сигнала связано с ограниченным быстродействием системы измерений. При приближении центра измеряемого пучка к центру области замещения вибрирующей струны наблюдается характерное удвоение частоты. Окончательная симметризация пиков двойной частоты (рис.5b) показывает, что центр измеряемого пучка практически совпадает с равновесным положением вибрирующей струны (подробнее см. ниже).

3.3. Обработка экспериментальных результатов и восстановление профиля

Алгоритм восстановления профиля по экспериментальным результатам измерения отраженных от вибрирующей струны фотонов должен учитывать ограниченное быстродействие измерительной схемы. Такой алгоритм описывается на примере модельного профиля пучка, сосредоточенного на отрезке $[-2, 2]$ по оси x :

$$N(x) = \begin{cases} 100 \times (x + 2)(x_p + 2), & -2 < x < x_p \\ 100 \times (2 - x) / (2 - x_p), & x_p < x < 2, \end{cases} \quad (2)$$

где параметр x_p определяет положение максимума распределения фотонов в пучке. Асимметричность модельного профиля введена как для описания возможной асимметрии профиля измеряемого пучка, так и для описания искажения профиля в процессе измерения, обусловленного зависимостью количества отраженных фотонов от геометрии расположения фотодиода по отношению к пучку в процессе колебания струны. Все величины здесь и далее для простоты приняты безразмерными.

Движение центра вибрирующей струны описывается синусоидальной функцией с амплитудой 0.5:

$$x(t) = x_c - 0.5 \times \cos(2\pi t / P), \quad (3)$$

где x_c – положение центра вибрирующей струны и P – период колебаний струны.

Количество фотонов, падающих на струну в определенном положении и достигающих фотодиода, описывается функцией

$$f(t) = N(x(t)). \quad (4)$$

Приняв, что измерительная схема является датчиком первого порядка [16] (по причине отсутствия в структуре свето- и фотодиодов колеблющихся частей), измеряемая величина $g(t)$ определяется из уравнения

$$\tau \frac{dg(t)}{dt} + g(t) = f(t), \quad (5)$$

где τ – характерный параметр отклика измерительной системы. Значения функции $g(t)$ являются экспериментальными результатами измерений. Отметим, что для периодического процесса $f(t)$ функция $g(t)$ через время $\sim \tau$ выходит на колебательный режим с той же частотой, но со сдвигом по фазе и искажением формы сигнала. Параметр τ называется постоянной времени датчика и является мерой инерционности измерительной системы [16].

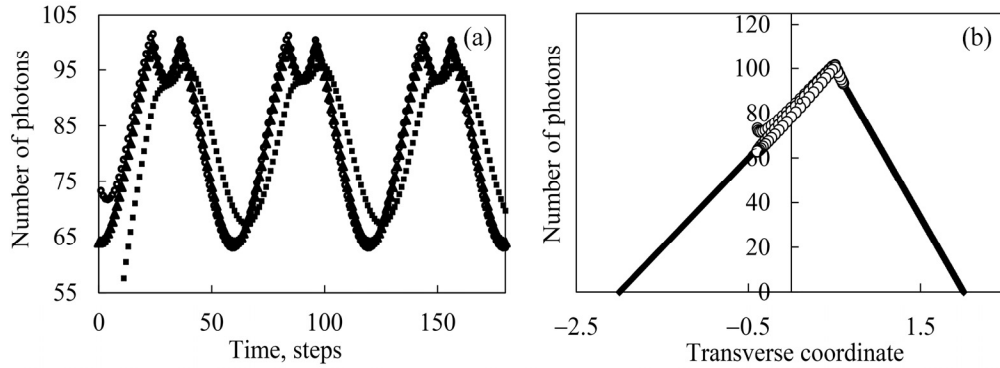


Рис.6. (а) Зависимость количества фотонов от времени: 1 – исходная функция процесса $f(t)$, 2 – отклик измерительной системы $g(t)$ и 3 – реконструированная по функции $g(t)$ функция процесса $f_{\text{rec}}(t)$. (б) Зависимость количества фотонов от координаты: 4 – модельный профиль и 5 – профиль, восстановленный по реконструированной функции процесса $f_{\text{rec}}(t)$ при положении центра вибрирующей струны $x_c = 0.1$.

Для восстановления измеряемого профиля следует по измерительной системе восстановить функцию процесса $f(t)$ и по ней, с учетом уравнения движения струны, восстановить искомый профиль. Описанный численный процесс моделировался следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} g^{i+1} &= g^i + (f^{i+1} - g^i) / \tau, \\ f_{\text{rec}}^{i+1} &= g^{i+1} + \tau(g^{i+1} - g^i). \end{aligned} \quad (6)$$

На рис.6а и 7а приведены результаты моделирования для параметров: $x_p = 100$, $x_c = 0.1$ и 0.5 , $\tau = 7$, где $g(t)$ – отклик измерительной системы, $f(t)$ – исходная функция процесса и $f_{\text{rec}}(t)$ – функция процесса, реконструированная по функции $g(t)$. Результат восстановления модельного профиля по реконструированной функции процесса $f_{\text{rec}}(t)$ представлен на рис.6б и 7б. Как видно из рис.6а и 7а функция $g(t)$ выходит на периодический режим с некоторым запаздыванием (порядка одного периода колебаний струны). Характерный «хвостик» (рис.6б и 7б), не соприкасающийся с модельным профилем, определяется именно этим начальным процессом измерений.

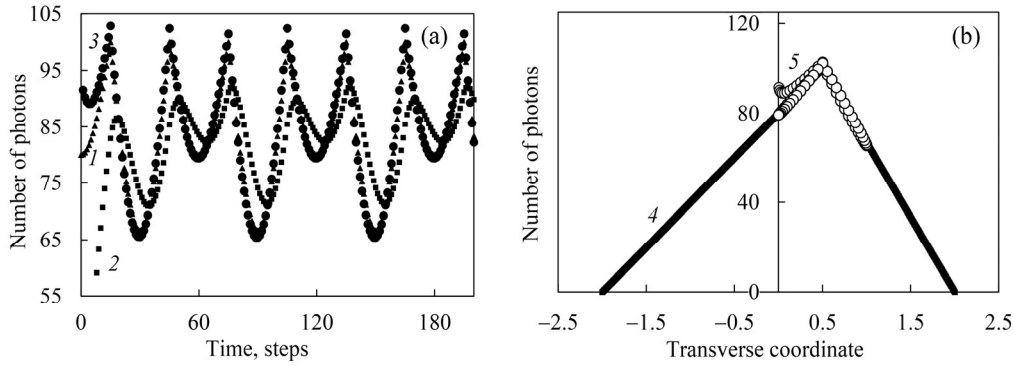


Рис.7. (а) Зависимость количества фотонов от времени: 1 – исходная функция процесса $f(t)$, 2 – отклик измерительной системы $g(t)$ и 3 – реконструированная по функции $g(t)$ функция процесса $f_{\text{rec}}(t)$. (б) Зависимость количества фотонов от координаты: 4 – модельный профиль и 5 – профиль, восстановленный по реконструированной функции процесса $f_{\text{rec}}(t)$ при положении центра вибрирующей струны $x_c = 0.5$.

В качестве примера восстановления профиля по измеренным данным фотодиода приведем эту процедуру для позиции ДВС, равной 32 (рис.5б), когда центр сфокусированного пятна лазерного излучения попадает в центр пучности колебаний струны. В сигнале фотодиода при этом появляется двойная частота колебаний вибрирующей струны, указывающая на то, что при каждом полупериоде колебаний происходит сканирование пучка, проходящее через его центр.

На рис.8а представлены экспериментальные данные с фотодиода, положение центра вибрирующей струны в процессе ее колебаний и реконструированная по измеренным значениям функция процесса, то есть рассеяние лазерного излучения на струне. По полученным результатам восстановлен усредненный профиль пучка по 1000 точкам измерений с шагом 12.45 мкс, изображенный на

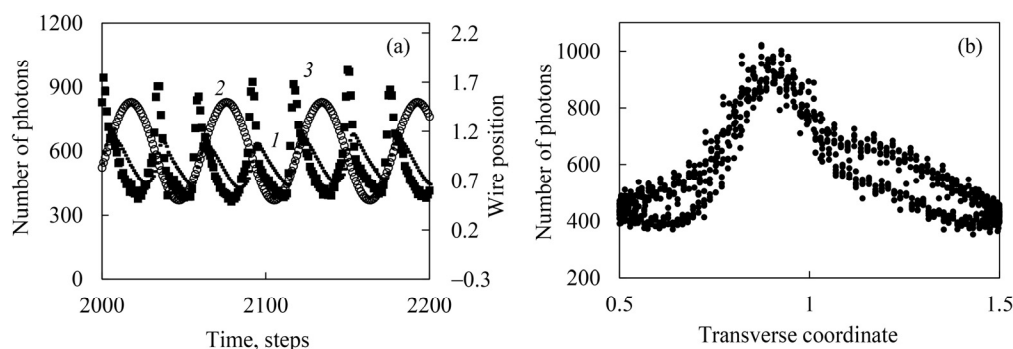


Рис.8. (а) Зависимость количества фотонов от времени: 1 – сигнал с фотодиода, 2 – положение центра струны в процессе ее колебаний и 3 – рассеяние лазерного излучения на струне. (б) Зависимость количества фотонов от координаты – профиль сфокусированного лазерного пучка.

рис.8б. В восстановленном по экспериментальным данным профиле присутствуют неточности, обусловленные шумами с частотой 50 Гц, а также нестабильностью лазерного излучения.

4. Заключение

Продемонстрирована возможность быстрого измерения профиля сфокусированного лазерного пучка без перемещения датчика с использованием механического движения вибрирующей струны. Разработан математический алгоритм для восстановления профиля пучка по многократным измерениям с помощью измерительной системы с ограниченным быстродействием.

Для усовершенствования метода предполагается улучшить измерительную систему для исключения воздействия помех, уменьшить инерционность измерительной системы и использовать более быстрые фотодиоды. Это даст возможность измерять профиль пучка практически за один период колебаний вибрирующей струны и наблюдать динамику изменения профиля с временем разрешения мс и меньше.

Метод можно использовать также для изучения поперечных колебаний струны с учетом двух поперечных степеней свободы.

На базе предлагаемого метода, с учетом наработок на лазерных пучках, проектируется разработка диагностических инструментов для ускорителей с ультратонкими пучками.

Автор выражает благодарность С.Г. Арутюняну за постановку задачи и А.В. Маргаряну за помощь в проведении эксперимента. Автор благодарен также М. Chung за постоянную поддержку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ж. Аш, П. Андре, Ж. Бофрон, П. Дегут, К. Жувено, У. Зельбштейн, Б. Кретинон, П. Ливрозе, А. Мазеран, Ж. Меригу, П. Пейро, А. Пике, Ж.-К. Прижан, М. Сюньяш, Ж. Такюсель, Ж. Фулетье, Ж. Шарне, Ж.-П. Шон. Датчики измерительных систем. Москва, Мир, 1992.
2. **S.G. Arutunian.** Vibrating Wires Scanner for Beam Profile Monitoring. Proc. Part. Acc. Conf., 1991, New York, pp. 2105–2107.
3. **S.G. Arutunian, N.M. Dobrovolski, M.R. Mailian, I.G. Sinenko, I.E. Vasiniuk.** Phys. Rev. Special Topics – Accelerators and Beams, **2** 122801 (1999).
4. **С.Г. Арутюнян, Г.С. Арутюнян, D. Чое, M. Chung, Э.Г. Лазарева, А.В. Маргарян.** Изв. НАН Армении, Физика, **52**, 496 (2017).
5. **G. Decker, S. Arutunian, M. Mailian, I. Vasiniuk.** Hard X-ray Synchrotron Measurements at the APS with Vibrating Wire Monitor, Beam Instrumentation Workshop, BIW08, May 4–8, 2008, Lake Tahoe, USA, pp. 36–40.
6. **S.G. Arutunian.** Vibrating Wire Sensors for Beam Instrumentation. Beam Instrumentation Workshop, BIW08, May 4–8, 2008, Lake Tahoe, USA, pp. 1–7.
7. **S.G. Arutunian, J. Bergoz, M. Chung, G.S. Harutyunyan, E.G. Lazareva.** NIM A, **797**, 37 (2015).
8. **S.G. Arutunian, M. Chung, G.S. Harutyunyan, A.V. Margaryan, E.G. Lazareva, L.M. Lazarev, L.A. Shahinyan.** RSI, **87**, 023108 (2016).
9. <http://www-linac.kek.jp/seminar/chehab-lecturenot-transparencies/BeamDiagnostics.pdf>
10. **В.Н. Забаев.** Применение ускорителей в науке и промышленности. Томск, ТПУ, 2008.
11. **D. Einfeld.** SRN, **27**, 6 (2014).
12. **E. Levitchev.** Beam Dynamics Newsletter, **71**, 16 (2017).
13. **D. Hashemi.** Diagnostics at REGAE Facility, Ultrafast Beams and Applications Workshop, July 4–7, 2017, Yerevan, RA, pp. 19–22.
14. **K. Floettmann.** The Relativistic Electron Gun for Atomic Exploration, Ultrafast Beams and Applications Workshop, July 4–7, 2017, Yerevan, RA, pp. 8–9.
15. **М.А. Агинян, С.Г. Арутюнян, D. Чое, M. Chung, Г.С. Арутюнян, S.-Y. Kim, Э.Г. Лазарева, А.В. Маргарян.** Изв. НАН Армении, Физика, **52**, 151 (2017).
16. **В.М. Кашин, В.Г. Новиков.** Основы теории и практики моделирования динамических систем. Коломна, КИ (ф) МГОУ, 2011.

VIBRATING WIRE FOR PROFILE MEASURING OF THIN BEAMS IN ACCELERATORS: PRELIMINARY TESTS ON A LASER BEAM

E.G. LAZAREVA

The possibility to use a vibrating wire as a target in the method of scanning of transverse profiles of thin beams in accelerators has been studied. In the case where the transverse dimensions of the beam are comparable to the amplitude of oscillations of the wire, the vibrating wire can be used for a fast measurement of the transverse beam profile without moving the sensor. The scanning procedure is replaced by the use of the wire movement during its mechanical oscillations. The method is tested on a focused beam of a semiconductor laser with a spot size at the focus of ~0.1 mm. The reconstruction of the transverse profile is performed on the basis of the measurements of the photons reflected from the vibrating wire by using fast photodiodes.