

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 537.533.7

ПРИМЕНЕНИЕ КАМЕРЫ НАНОГЕЙТ-38 ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКА В КОЛЛАЙДЕРЕ ВЭПП–2000

© 2024 г. М. В. Тимошенко^{a, *}, В. Е. Бояркина^{a, b}, В. Л. Дорохов^{a, c},
М. И. Крутик^d, О. И. Мешков^{a, b, **}, И. А. Терентьев^{a, e}

^aИнститут ядерной физики имени Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^bНовосибирский государственный университет,
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

^cЦентр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов”
Института катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630559, Новосибирская обл., р. п. Кольцово, пр. Никольский, 1

^dООО “НПП НАНОСКАН”
Россия, 107076, Москва, ул. Стромынка, 18

^eНовосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

*e-mail: M.V.Timoshenko@inp.nsk.su

**e-mail: O.I.Meshkov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 25.12.2023 г.

После доработки 06.05.2024 г.

Принята к публикации 17.06.2024 г.

Стробируемая камера Наногейт-38 использована для измерения поперечных размеров пучка в бустере БЭП электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-2000. Камера применена для измерения вертикального размера пучка с помощью двухщелевого интерферометра и для построения поперечного профиля пучка в однооборотном режиме с проекционной оптикой. Целью экспериментов являлось определение возможности использования камеры для измерений поперечных размеров пучка, его эмиттанса и экспериментов по физике ускорителей в источнике синхротронного излучения СКИФ.

DOI: 10.31857/S0032816224050022 EDN: EUGCFP

1. ВВЕДЕНИЕ

Крупнейшим научным проектом, осуществляемым ИЯФ СО РАН в последние годы, является строительство источника синхротронного излучения поколения 4+ Сибирский кольцевой источник фотонов (СКИФ) [1]. Расчетный эмиттанс электронного пучка СКИФ равен $\varepsilon_x = 75$ нм·рад. Одной из важных задач диагностики пучка в накопителе и является измерение этого рекордно малого эмиттанса. Следует заметить, что приведенная величина относится к условному “нулевому” току в ускорителе. Для

определения эмиттанса предполагается использовать традиционный способ измерения поперечного размера пучка σ_x , связанного с эмиттансом хорошо известным выражением [2]:

$$\sigma_x = \sqrt{\beta_x \varepsilon_x + \eta_x^2 \sigma_E^2}, \quad (1)$$

где — структурные функции в точке наблюдения, β_x, η_x — энергетический разброс пучка. Значение бета-функции β_x определяется из модели магнитной структуры ускорителя, а точка измерения поперечного размера выбрана таким образом, что $\eta_x \approx 0$ и вклад второго слагаемого в (1) пренебрежимо мал.

Для измерения поперечного размера пучка планируется использовать двухщелевой интерферометр [3, 4], регистрирующий синхротронное излучение (СИ) из дипольного магнита в ультрафиолетовой (УФ) области спектра. Это наиболее простой метод диагностики, который можно применить для этой цели в период запуска установки. Размер пучка с гауссовым распределением плотности определяется по видимости интерференционной картины γ [4]:

$$\sigma_x = \frac{\lambda L}{\pi D} \sqrt{\frac{1}{2} \ln \left(\frac{1}{|\gamma|} \right)},$$

λ — длина волны света, L — расстояние от источника излучения до диафрагмы с щелями интерферометра, D — расстояние между щелями.

Поперечные колебания пучка с частотой в десятки герц, причины которых многообразны, могут приводить к ухудшению видимости интерференционной картины, т. е. завышению реального размера пучка. Это может стать проблемой при измерении эмиттанса пучка на СКИФ, поскольку сравнение расчета с экспериментом естественно проводить при минимальном числе частиц в сгустке для пренебрежения коллективными эффектами. Связанное с этим пропорциональное уменьшение числа фотонов, излучаемых пучком, заставляет увеличивать время регистрации интерферограммы вплоть до нескольких секунд, т. е. избавляясь от одной проблемы, есть шанс столкнуться с другой. Вклад в ухудшение видимости γ могут давать также механические вибрации оптических элементов диагностики. Как показали недавние эксперименты на накопителе КИСИ [4], желательно, чтобы время экспозиции при регистрации интерференционной картины не превышало 1 мс.

Не менее важной задачей является настройка инжекции пучка в главный накопитель СКИФ. В проект СКИФ заложена инжекция в режиме “top-up” (или режим инжекции на полной энергии), позволяющей иметь формально бесконечное время жизни пучка. При этом способе инжекции пучок в главный накопитель с током до 400 мА периодически пополняется на 1–2 мА сгустками частиц из бустера, поэтому важное значение имеет минимизация потерь при инжекции, чтобы пользователи синхротронного излучения могли не прерывать работу на экспериментальных станциях.

В связи с этим проведены попытки оценки возможности детектирования поперечного профиля электронного пучка стробируемой электронно-оптической камерой Наногейт-38 с усилителем яркости изображения вместо традиционно используемых цифровых CMOS-камер.

Эксперименты по диагностике поперечного профиля пучка проводились на бустере БЭП [5] электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-2000 [6] на энергии пучка 430 МэВ. Бустер работает в односгустковом режиме. Ток пучка в БЭП, равный 1 мА, соответствует $3 \cdot 10^8$ частиц в сгустке. Расчетная интенсивность СИ в диапазоне 400–700 нм составляет $1.9 \cdot 10^{14}$ фотонов/с/мА/мрад [7] или $1.27 \cdot 10^7$ фотонов за один оборот. Интенсивность СИ при токе пучка в БЭП, равном 25 мА, с удовлетворительной точностью соответствует интенсивности СИ при токе пучка в главном накопителе СКИФ, равном 1 мА. Вертикальный размер пучка в БЭП, измеренный при нескольких значениях коэффициента бетатронной связи [8], имеет выраженную зависимость от тока и близок к расчетному дифракционному пределу $\sigma_y^d \approx 0.08$ мм на длине волны = 550 нм при токах $I_b = 10$ мА и выше. Двухщелевой интерферометр позволяет измерять размеры пучка ниже значения этого предела [3, 4]. Оптическая схема эксперимента показана на рис. 1.

2. СТРОБИРУЕМАЯ КАМЕРА НАНОГЕЙТ-38

Импульсные (затворные) электронно-оптические камеры (ЭОК) нового поколения Наногейт-38 выпускаются научно-производственным предприятием НПП НАНОСКАН [9]. Их основное назначение — детальное прецизионное исследование пространственно-временных и энергетических характеристик быстропротекающих процессов в нано- и микросекундной области времени.

Электронно-оптические камеры обладают возможностью регистрировать изображение с длительностью экспозиции от 60 нс до 1200 мкс, в котором присутствуют как области с предельно малыми уровнями энергетической экспозиции, так и уровнями в тысячу раз большими. Нелинейность преобразования свет—сигнал в динамическом диапазоне 1 : 1000 составляет не более 1%.

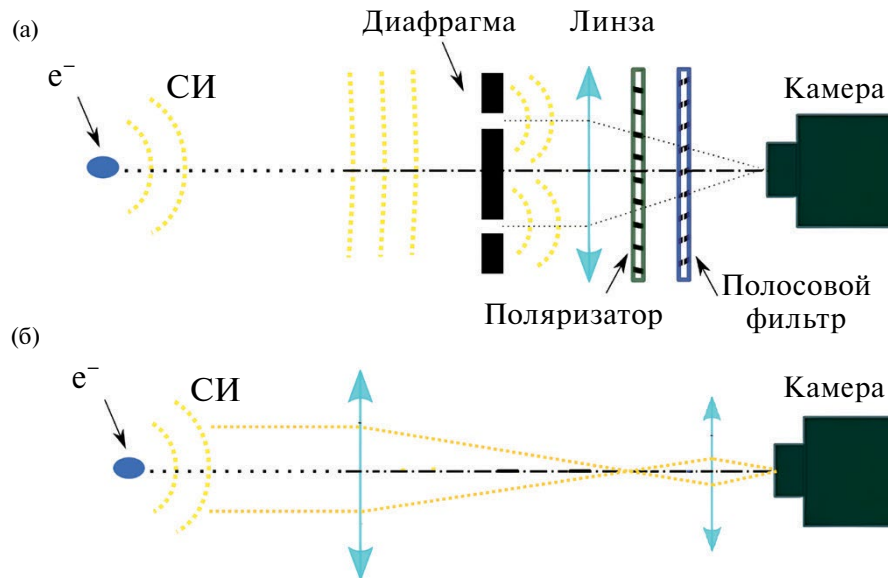


Рис. 1. Схема экспериментов по измерению поперечных размеров пучка на бустере БЭП: **а** — двухщелевой интерферометр по схеме Юнга, **б** — проекционная оптика.

Структурная схема и внешний вид Наногейт-38 показаны на рис. 2 и 3.

В состав камеры входят:

- бипланарный (диодный) электронно-оптический преобразователь (ЭОП) с рабочим диаметром фотокатода 25 мм;
- малогабаритный высоковольтный (6–9 кВ) формирователь, импульс с выхода которого подается между фотокатодом и экраном ЭОП.

Длительность включения (длительность экспозиции) ЭОП определяется длительностью высоковольтного импульса;

— цифровая малошумящая система считывания (ЦСС) и передачи в компьютер зарегистрированного изображения с экрана ЭОП;

— проекционный объектив с масштабом переноса 1:1 и угловой апертурой 18° , передающий изображение с экрана ЭОП на ЦСС;

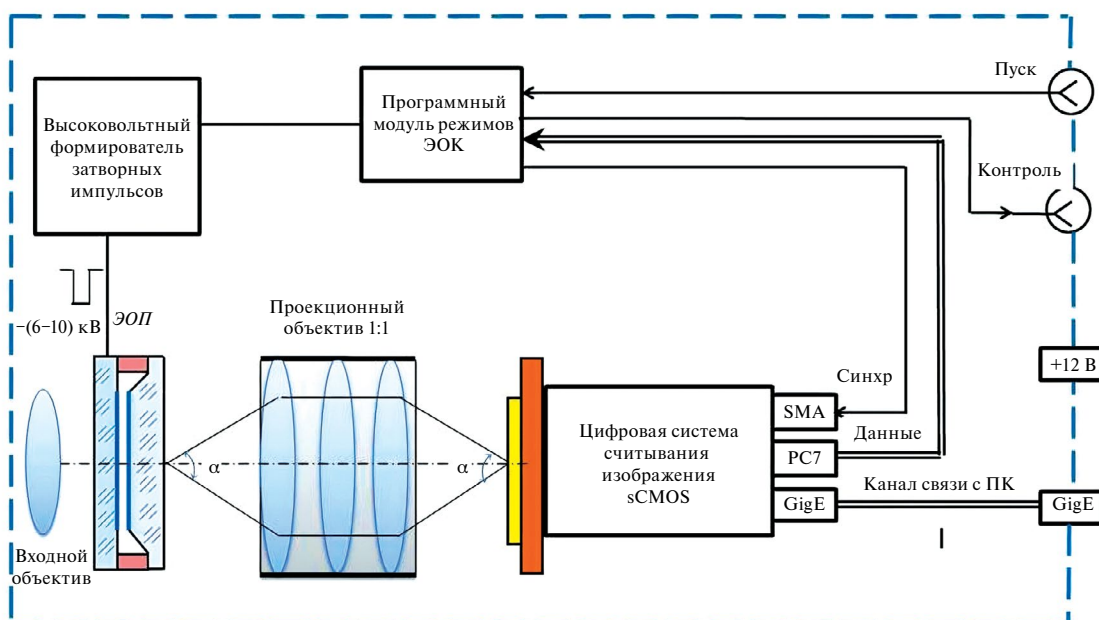


Рис. 2. Структурная схема Наногейт-38.

– интерфейс связи ЭОК с управляющим компьютером.

Изображение исследуемого быстропротекающего процесса фокусируется на фотокатоде ЭОП. Наша камера имела фотокатод типа S20, но возможна и версия камеры с солнечно-слепым фотокатодом. При поступлении на вход ЭОК сигнала запуска в соответствии с установленными параметрами задержки и длительности экспозиции высоковольтный формирователь затворных импульсов подает на фотокатод импульс с амплитудой 6–9 кВ, который открывает его на установленное время в диапазоне от 60 нс до 1200 мкс.

Изображение с экрана ЭОП через проекционный объектив передается с масштабом 1:1 на крупноформатный сенсор sCMOS ЦСС:

- размер сенсора $22.5 \times 22.5 \text{ мм}^2$;
- число пикселей 2048×2048 ;
- размер пикселя $11 \times 11 \text{ мкм}^2$;
- полный заряд пикселя 91 000 е-;
- шум чтения 1.5 е-.

Сенсор термостабилизирован при температуре +5 С. Совокупность параметров Наногейт-38 выглядит следующим образом:

– чувствительность одноквантовая, в том смысле, что каждый выбитый из фотокатода ЭОП фотоэлектрон обязательно примет участие в формировании конечного изображения;

– динамический диапазон – не менее 1400;

– нелинейность передаточной характеристики – не более 1%;

– пространственное разрешение по 5-процентному критерию контраста стандарта Государственного оптического института РФ составляет не менее 980 линий на горизонтальный (вертикальный) габарит изображения;

– время открытия затвора равно от 60 нс до 1200 мкс;

– нестабильность запуска ЭОК (джиттер) составляет не более 20 нс;

– минимальное время задержки пуска равно 100 нс.

На рис. 3 представлена ЭОК в составе оптической диагностики пучка во время экспериментов на бустере БЭП.



Рис. 3. Внешний вид камеры Наногейт-38 в составе оптической диагностики для измерения поперечного профиля пучка в бустере БЭП.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАЗМЕРА ПУЧКА

Измерения вертикального размера пучка в БЭП с помощью двухщелевого интерферометра проводились в режиме с минимизированным коэффициентом связи бетатронных колебаний, в котором ранее определялась зависимость поперечных размеров пучка от тока [8]. В первой серии измерений была проверена зависимость показаний диагностики при токе пучка <<TEqn011.eps>> мА от времени экспозиции Наногейт-38. Следует заметить, что медное зеркало, расположенное внутри вакуумной камеры БЭП и отражающее наружу оптическую часть спектра СИ, сильно пострадало за годы эксплуатации установки, поэтому для интерференционных измерений использовалась его краевая часть, где мощность СИ ослаблена как минимум на порядок. Центральная часть зеркала, принимающая на себя основную мощность излучения, практически не отражала в видимом диапазоне длин волн. На рис. 4 представлена типичная, регистрируемая с помощью камеры Наногейт, интерференционная картина и ее горизонтальное сечение. Амплитуда сигнала ячеек камеры представлена в шкале искусственных цветов, показанной справа от рисунка.

Для проверки линейности камеры и корректности измерений видности варьировалось время экспозиции камеры при фиксированном токе пучка $I_b \approx 100$ мА (рис. 5).

Зарегистрированная величина видности соответствует размеру пучка $\sigma_y = 0.055 \pm 0.05$ мм. Для оценки чувствительности Наногейт-38 эти же измерения проводились с заменой ее на обычную цифровую камеру MER-131–75GM [10]. Сравнение двух детекторов показало, что цифровая камера в несколько раз превосходит Наногейт по чувствительности. При одинаковых токах пучка время экспозиции, требуемое для получения интерферограммы высокого качества, у MER-131–75GM было в 4–5 раз меньше.

Световой поток, пропускаемый интерферометром, существенно ограничен апертурами щелей и полосовым фильтром. Представляло интерес определить возможности Наногейт-38 при регистрации изображения пучка с помощью стандартной проекционной оптики (рис. 1). С этой целью нами было поставлено еще несколько экспериментов.

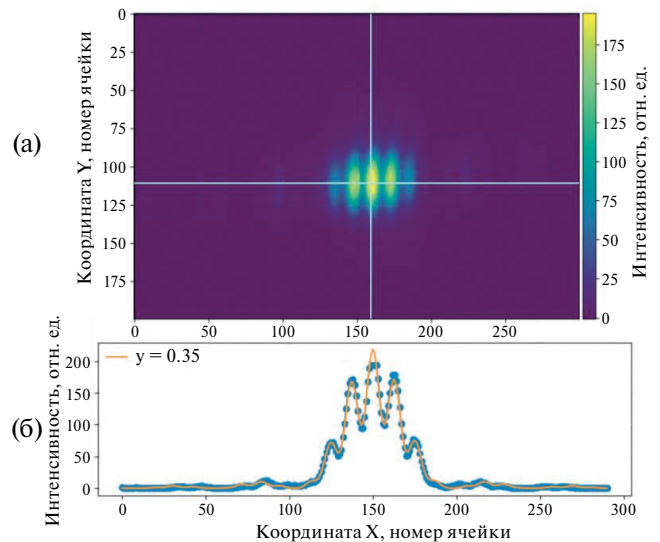


Рис. 4. а – Снимок интерференционной картины, полученный камерой Наногейт-38. Амплитуда сигнала ячеек дана в шкале искусственных цветов, которая показана справа от рисунка; б – сечение интерференционной картины, где точки – интенсивность сигнала в соответствующей ячейке матрицы камеры, а кривая – регрессия, соответствующая этим точкам. Видность $V = 0.35$.

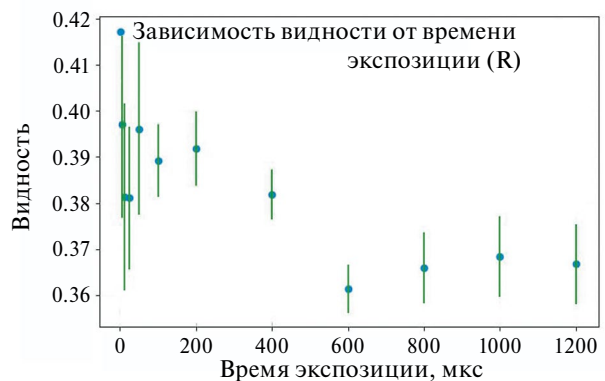


Рис. 5. Зависимость видности g интерференционной картины от времени экспозиции при токе пучка $I_b \approx 100$ мА.

4. РЕГИСТРАЦИЯ ПОПЕРЕЧНОГО ПРОФИЛЯ ПУЧКА С ОДНОБОРОТНЫМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Несмотря на то, что на современных источниках СИ поперечные размеры пучка электронов столь малы, что не могут быть измерены с помощью обычной проекционной оптики в оптическом диапазоне длин волн, тем не менее, эти средства наблюдения за пучком не потеряли своей актуальности и по-прежнему

позволяют качественно отслеживать динамику пучка в ускорителе и проводить исследования по физике ускорителей. Кроме того, в мире все еще действует достаточно много ускорителей электронов и позитронов, на которых дифракционный предел, ограничивающий возможности использования проекционной оптики, не достигается. Это утверждение относится и к стандартному режиму работы бустера БЭП, и ко всем работающим в России циклическим ускорителям электронов (КИСИ [11], ВЭПП-3, ВЭПП-4М [12]).

В бустере и главном накопителе СКИФ регистрация поперечного профиля пучка с помощью проекционной оптики может быть полезна при настройке инжекции, когда пучок совершает колебания с большой амплитудой относительно равновесной орбиты и важна качественная информация о движении пучка.

Чувствительность и временное разрешение Наногейт-38 позволяют получать поперечные профили пучка в БЭП с высоким пространственным разрешением и однооборотным временным разрешением при построении изображения пучка с помощью объектива на фотокатоде камеры. На рис. 6 показана динамика пучка в БЭП: в момент перепуска пучка из инжекционного комплекса ИЯФ [13] в БЭП (а), при возникновении фазовых колебаний пучка (б) и при возбуждении вертикальных бетатронных колебаний пучка при близости частот к бетатронному резонансу (в).

Каждая отдельная яркая точка на рис. 6а и 6б в действительности состоит из нескольких сот пикселей и отображает поперечное распределение частиц в пучке на данном обороте. На рис. 6б и 6в время экспозиции камеры соответствует нескольким сотням оборотов пучка при токе пучка $I_b \approx 20$ мА. Кадр на рис. 6а получен со временем экспозиции 700 нс (~10 оборотов), на нем в центре видно яркое пятно от накопленного в БЭП пучка, находящегося на равновесной орбите. Слева и справа от накопленного видны несколько оборотов инжектируемого в БЭП пучка, совершающего затухающие горизонтальные колебания относительно равновесной орбиты.

Такие же измерения были выполнены с обычной цифровой камерой. Минимальное время экспозиции цифровой камеры MER-131–75GM составляет 5 мкс, т. е. приблизительно 65 оборотов пучка в БЭП. Тем не менее получить отчетливое поперечное распределение оборотов пучка, совершающего бетатронные колебания с большой амплитудой, нам с этой камерой не удалось (рис. 7). Колебания пучка вызывались ударом дефлектора вблизи одного из бетатронных резонансов.

Можно предположить, что отсутствие однооборотных поперечных профилей пучка, подобных тем, что представлены на рис. 6а, б, связано с особенностями записи и считывания изображения CMOS-матрицей камеры.

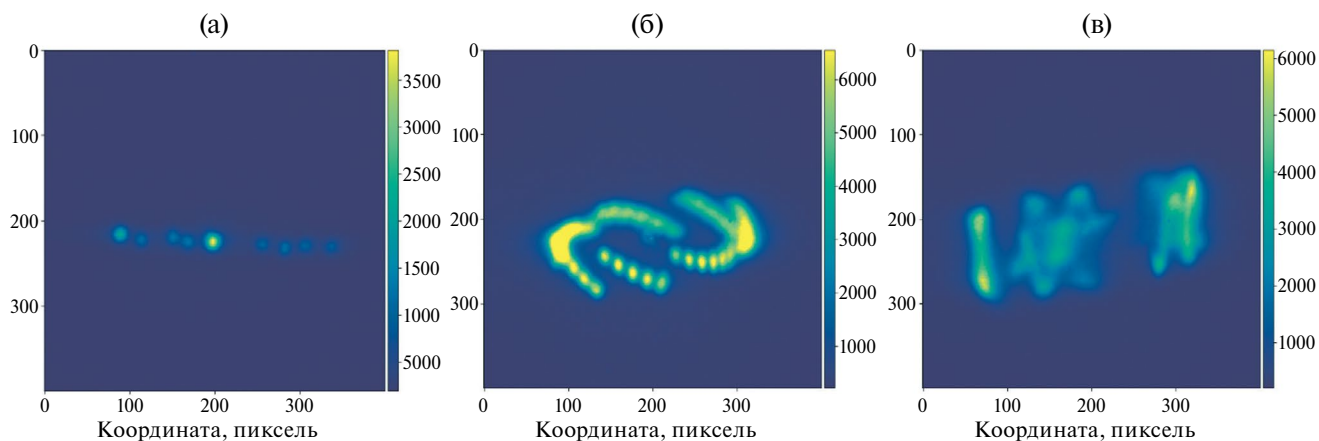


Рис. 6. а — Первые 10 оборотов пучка в БЭП после инжекции, б — поперечное движение пучка при наличии фазовых колебаний в режиме сильной бетатронной связи, в — поперечное движение пучка вблизи бетатронного резонанса.

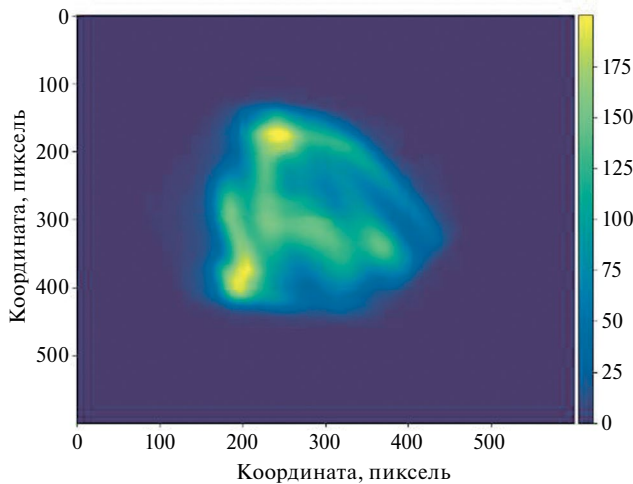


Рис. 7. Поперечное распределение пучка, совершающего бетатронные колебания с большой амплитудой, зарегистрированное цифровой камерой MER-131-75GM, при токе $I_b = 22$ мА. Время экспозиции камеры 5 мкс, т. е. 65 оборотов пучка в БЭП.

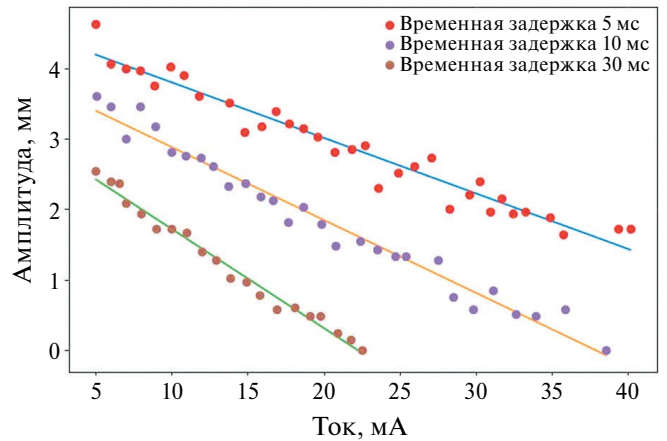


Рис. 8. Амплитуда возбуждаемых дефлектором радиальных бетатронных колебаний в зависимости от тока пучка при различных задержках относительно момента удара.

5. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЗАТУХАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ БЕТАТРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Мы применили камеру Наногейт-38 для измерений времени затухания радиальных бетатронных колебаний. Известно, что этот процесс зависит от тока пучка благодаря эффекту так называемого быстрого затухания, связанного с взаимодействием пучка с различного рода диссипативными системами, присутствующими в вакуумной камере ускорителя [14].

Радиальные колебания пучка возбуждались ударом дефлектора, и их амплитуда

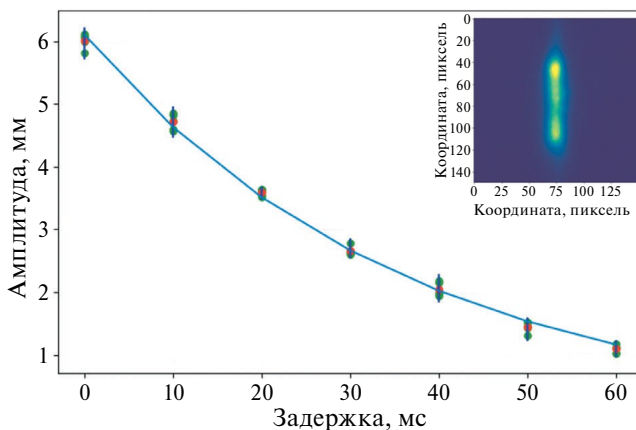


Рис. 9. Зависимость амплитуды возбуждаемых ударом дефлектора радиальных бетатронных колебаний от времени при токе пучка БЭП $I_b = 0.7$ мА.

фиксировалась камерой. На рис. 8 показана зависимость амплитуды колебаний от тока пучка при различных задержках относительно момента удара дефлектором. Как видно, по мере увеличения времени задержки от момента удара дефлектором по пучку скорость затухания колебаний по-разному зависит от тока пучка. При этом амплитуда удара дефлектора во всех случаях была одинаковой.

На рис. 9 показана зависимость амплитуды колебаний от времени задержки при токе пучка $I_b = 0.7$ мА.

На врезке в верхнем правом углу рисунка показано одно из зарегистрированных в этих измерениях изображений пучка. При этом время экспозиции камеры составляло 17 мкс, т. е. изображение состоит из примерно трехсот просуммированных поперечных профилей пучка.

Декременты затухания вертикальных и горизонтальных бетатронных колебаний вследствие радиационного трения определяются формулами [15]:

$$\zeta_z = \frac{W_0}{2T_0 E_0}, \quad \zeta_x = \zeta_z (1 - D),$$

$$D = \frac{\oint \left(\frac{1}{r_0^2} + \frac{2G}{H_0 r_0} \right) \frac{D}{r_0} ds_0}{\oint \frac{1}{r_0^2} ds_0}.$$

Для изомагнитного кольца с разделенными функциями

$$D = \frac{\alpha_p R}{r_0},$$

W – потери пучка на СИ за один оборот, T – период обращения пучка, E – энергия пучка, α_p – коэффициент уплотнения орбиты, r_0 и R – локальный и средний радиусы кривизны орбиты соответственно, D – дисперсионная функция. Индекс “0” означает использование равновесных значений.

Расчетное время затухания радиальных бетатронных колебаний в БЭП при энергии пучка

$E = 430$ МэВ составляет $f_x \approx 32$ мс, что хорошо соотносится с измеренной величиной 36 мс.

Подробное описание и анализ полученных результатов по динамике пучка в БЭП выходят за рамки этой статьи.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стробируемая электронно-оптическая камера Наногейт-38 была использована для измерения вертикального размера пучка в бустере БЭП электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-2000 в оптической схеме двухщелевого интерферометра и для регистрации поперечного профиля пучка с помощью обычной проекционной оптики. Эксперименты показали, что чувствительность Наногейт-38 в несколько раз ниже по сравнению с CMOS-камерой MER-131–75GM. Однако CMOS-камера не позволяет получать однооборотные профили пучка, совершающего бетатронные колебания с большой амплитудой, что удастся сделать, используя Наногейт-38.

Можно заключить, что возможности камеры Наногейт-38 в экспериментах по физике ускорителей для исследования динамики электронного пучка выглядят многообещающими.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-22-00-177).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gurov S.M., Volkov V.N., Zolotarev K.V., Levichev A.E.. *Surf J.* // Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2020. V. 14. № 4. P. 651.
2. Handbook of Accelerator Physics and Engineering/ Ed. by Chao A.W., Tigner M., Wiese H., Zimmerman F. World Scientific Publishing Company, 2023. <https://doi.org/10.1142/13229>
3. Mitsuhashi T. // Proc. of the Joint US–CERN–Japan–Russia School on Part. Accel. Montreux, CERN, Switzerland. May 11–20, 1998. World Sci., 1999. P. 399. https://doi.org/10.1142/9789812818003_0018
4. Дорохов В.Л., Мешкова О.И., Стурин А.И., Смыгачева А.С. // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20. № 5(250). С. 1181.
5. Shwartz D.B., Berkaev D.E., Bochek D.V., Koop I., Korenev I.E., Krasnov A.A., Sedlyarov I.K., Shatunov P.Yu., Shatunov Y.M., Zemlyansky I.M. // Proc. 5th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'14). Dresden, Germany, 2018. P. 102. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2014-MOPRO018>
6. Shatunov P.Yu., Belikov O.V., Berkaev D.E. et al. // Proc. of 8th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC-2017). Denmark, Copenhagen, 2017. P. 2989. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2017-WEPIK029>
7. <https://physics.nist.gov/MajResFac/SURF/SURF/schwinger.html>
8. Тимошенко М.В., Борин В.М., Дорохов В.Л., Мешков О.И., Яковин М.Д. // Материалы конференции XXVIII Российская конференция по ускорителям заряженных частиц (RuPAC'23), Новосибирск, 2023. С. 78.
9. <http://nanoscan.su/catalog/active/nanogate24/>
10. <https://www.get-cameras.com/Industrial-Camera-OnSemi-PYTHON1300-MER-131-75GM>
11. Meshkov O., Stirin A., Kovachev G. et al. // J. Instrum. 2016. V. 11. № 12. P. 12015. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/12/P12015>
12. Meshkov O.I., Gurko V.F., Zhuravlev A.N. et al. // Proc. European Particle Accelerator Physics (EPAC-2004), Switzerland, Lucerne. P. 2739.
13. Logatchev P., Levichev A., Starostenko A. et al. // Proc. 27th Linear Accelerator Conference (LINAC-2014). Switzerland, Geneva. P. 702.
14. Диканский Н.С., Карлинер М.М., Скринский А.Н., Шапиро В.Е., Шехтман И.А. // Атомная энергия. 1967. Т. 22. № 3. С. 188.
15. Переведенцев Е.А. Радиационные эффекты в циклических ускорителях. Учебное пособие по спецкурсу “Циклические ускорители”. Новосибирск: НГУ, 2013.