

# Регистрация синхротронного излучения пикосекундной стрик-камерой для диагностики пучков в циклических ускорителях

А.К.Верещагин, Н.С.Воробьев, П.Б.Горностаев, В.Л.Дорохов, С.С.Крюков, В.И.Лозовой, О.И.Мешков, Д.А.Никифоров, А.В.Смирнов, Е.В.Шашков, М.Я.Щелев

*С помощью пикосекундной электронно-оптической камеры с линейной разверткой (стрик-камера) модели PS-I/S1 измерены временные параметры импульсов синхротронного излучения на накопителе-охладителе (НО) в Институте ядерной физики (ИЯФ) СО РАН (Новосибирск). Полученные данные позволяют судить о процессах формирования электронных сгустков и их «качестве» в НО после инжекции из линейного ускорителя. Показана целесообразность применения стрик-камер в составе оптического диагностического комплекса ускорителя для настройки инжекции из линейного ускорителя. Обсуждается вопрос о создании диссектора нового поколения с временным разрешением до единиц пикосекунд, с помощью которого будет осуществляться непрерывный мониторинг сгустков в НО при совместной работе с электрон-позитронными коллайдерами ИЯФ.*

**Ключевые слова:** стрик-камера, диссектор, синхротронное излучение, оптическая диагностика.

## 1. Введение

Традиционные области применения электронно-оптических камер (ЭОК) в физических экспериментах – это физика лазеров, диагностика лазерной плазмы, лазерная спектроскопия и т. п. [1]. В настоящее время с развитием циклических ускорителей, позволяющих существенно увеличить яркость синхротронного излучения (СИ) за счет уменьшения эмиттанса пучков, появилась необходимость в усовершенствовании оптического диагностического комплекса для регистрации СИ. Это связано как с измерением пространственных и временных характеристик сгустков частиц в циклических ускорителях, так и с использованием СИ в различных задачах науки и техники [2]. Решение этой задачи потребовало повышения до единиц пикосекунд временного разрешения диссекторов, используемых в системах оптической диагностики ускорителей [3]. Применение ЭОК с линейной разверткой для оптической диагностики пучков оказалось весьма перспективным на этапе формирования электронных и позитронных сгустков в бустерах коллайдеров, накопительных кольцах и иных циклических ускорителях. Это позволило, в частности, оптимизировать работу накопителя-охладителя (НО) инжекционного комплекса ИЯФ СО РАН [4] и улучшить режим инжекции в него частиц из ли-

нейного ускорителя (ЛУ). Такой вывод был сделан в процессе проведения предварительных экспериментов на НО, которые осуществлялись в рамках программы создания диссектора нового поколения с временным разрешением в единицы пикосекунд.

Для измерений параметров пучка в кольцевых ускорителях электронов и позитронов широко применяется регистрация СИ в оптическом диапазоне. Оптическая диагностика в ускорительной технике бесконтактна и использует собственное излучение исследуемого объекта или рассеянное на нем зондирующее излучение [5]. При этом не искажаются характеристики исследуемых объектов, а диагностические стенды для измерения параметров СИ содержат ряд традиционных элементов, например ТВ- и ПЗС-камеры, фотодиоды и фотоэлектронные умножители, интерферометры и т. п. [3].

В физике ускорителей всегда был интерес к изучению пространственного распределения частиц в пучке, в частности к измерению параметров продольного профиля сгустка. Для этих целей в ИЯФ СО РАН был создан диссектор ЛИ-602 [6], который является штатным, надежным и постоянно действующим прибором для контроля продольного профиля сгустка в составе оптического диагностического комплекса разнообразных циклических ускорителей. Этот прибор имеет временное разрешение около 20 пс, которого уже недостаточно для измерения внутренней структуры электронных сгустков на современных циклических ускорителях. Улучшение временного разрешения диссекторов позволяет исследовать разного рода быстрые неустойчивости, такие как эффекты встречи, нелинейная динамика пучков, неустойчивости, связанные с большим количеством электронных сгустков, и т. п. [7]. Для этого необходимо контролировать временные параметры СИ с разрешением порядка пикосекунды, что соответствует продольному изменению распределения частиц в сгустке. Следует отметить, что в настоящее время в мире нет ускорителей, на которых контроль продольного профиля пучка являлся бы штатной, постоянно действующей диагностикой. Исключением являются те установ-

А.К.Верещагин, Н.С.Воробьев, П.Б.Горностаев, С.С.Крюков, В.И.Лозовой, А.В.Смирнов, Е.В.Шашков, М.Я.Щелев. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: vor@kapella.gpi.ru, m.schelev@ran.gpi.ru  
В.Л.Дорохов, Д.А.Никифоров. Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 11  
О.И.Мешков. Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 11; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: o.i.meshkov@ngs.ru

Поступила в редакцию 10 июля 2015 г., после доработки – 13 ноября 2015 г.

ки, где используются диссекторы, разработанные в ИЯФ СО РАН, с временным разрешением ~20 пс.

### 2. Описание эксперимента

Целью работ на накопителе-охладителе инжекционного комплекса в ИЯФ СО РАН было уточнение параметров разрабатываемого диссектора на базе стрик-камеры модели PS-1/S1. В ходе этих работ определялись режимы синхронизации внешнего запуска диссектора от сигналов СИ или электронных устройств ускорителя. Кроме того, проводились измерения реальной длительности электронных сгустков по сигналам СИ с целью последующего их сравнения с результатами измерений, которые будут получены на разрабатываемом диссекторе. Ранее в экспериментах по регистрации СИ в России использовалась лишь ЭОК со спиральной разверткой [8]. За рубежом стрик-камеры входили в состав оптического диагностического комплекса циклических ускорителей [9], но не нашли регулярного применения из-за сложности эксплуатации и дороговизны. Поэтому использование ЭОК PS-1/S1 в экспериментах на НО представляет несомненный интерес для дальнейших исследований СИ.

ЭОК PS-1/S1 работает в режиме линейной развертки в широком диапазоне длительностей развертки (от сотен пикосекунд до сотен наносекунд) и обеспечивает регистрацию быстротекущих процессов в спектральном диапазоне 115–1550 нм. Основные характеристики камеры приведены в работе [10]. ЭОК в ускорительном комплексе НО располагалась на оптическом стенде, схема которого показана на рис.1. С помощью камеры регистрировалось СИ в спектральном диапазоне 400–900 нм на этапе формирования электронных сгустков, происходившего в процессе затухания пучка в НО после инъекции из линейного ускорителя. СИ фокусировалось объективом непосредственно на фотокатод камеры, поскольку целью экспериментов являлось измерение лишь продольного (временного) профиля пучка.

Накопитель-охладитель ВЭПП-5 представляет собой ускоритель электронов и позитронов на энергию до 510 МэВ. Его периметр составляет 27 м, частота обращения пучка – 11 МГц. Радиус траектории пучка в поворотном магните равен 112 см. Длина сгустка в ускорителе составляет 2.5 см при напряжении на ускоряющем резонаторе 200 кВ, что соответствует длительности импульса СИ  $\sigma = 80$  пс. Пучок инжектируется в кольцо ускорителя с частотой 1 Гц.

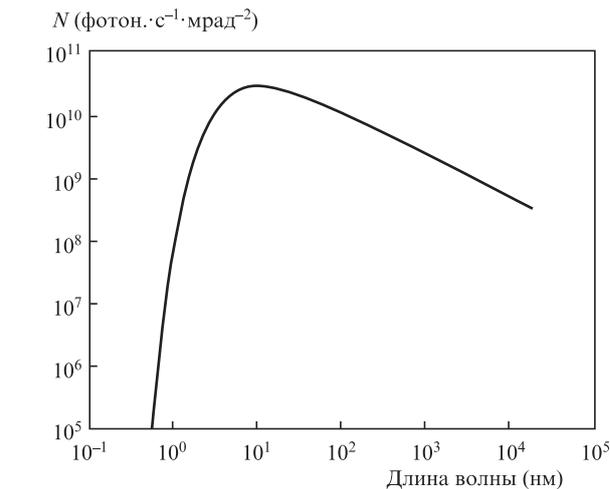


Рис.2. Спектр СИ при энергии электронов  $E = 410$  МэВ и токе пучка 10 мА.

Инжекцию можно остановить, тогда накопленный в кольце пучок будет жить в нем около 1000 с. Из поворотного магнита СИ выводится через окно в вакуумной камере и зеркалами заводится через канал в биозащите в бункер для диагностики. Форма СИ была близка к кругу диаметром ~10 см. Спектр СИ представлен на рис.2. В одном импульсе СИ в диапазоне длин волн 400–900 нм испускается не более  $10^6$  фотонов. Стоит подчеркнуть, что для надежной регистрации столь малого количества фотонов необходимо работать в режиме точечной линейной развертки ЭОК, фокусируя объективом весь пучок СИ на фотокатод камеры.

В бункере синхронизовался момент впуска пучка из ЛУ в кольцо НО с оборотом пучка в этом кольце. В процессе экспериментов на ЭОК PS-1/S1 фиксировалась динамика поведения сгустков электронов в НО за время около 1000 оборотов, пока пучок затухает. Этот процесс хорошо описывается аналитически, и полученные экспериментальные данные можно будет сравнить с расчетными, что послужит основой как для уточнения теории, так и для оптимизации рабочих параметров НО. Кроме того, исследовалась зависимость длины пучка в равновесном состоянии от напряжения на ускоряющем резонаторе, а

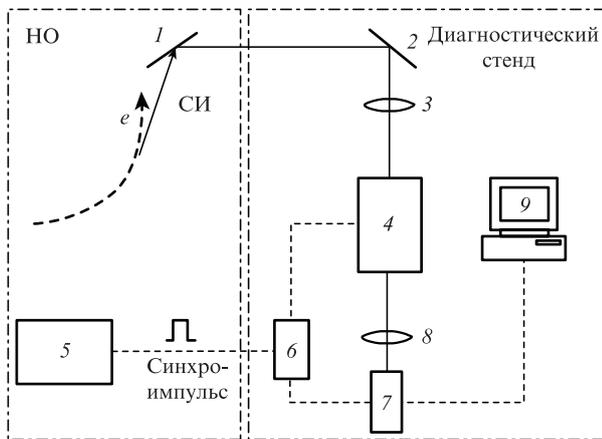


Рис.1. Схема эксперимента: 1, 2 – поворотные зеркала, 3, 8 – объективы; 4 – электронно-оптическая камера; 5 – блок управления; 6 – генератор задержек; 7 – система считывания; 9 – компьютер.

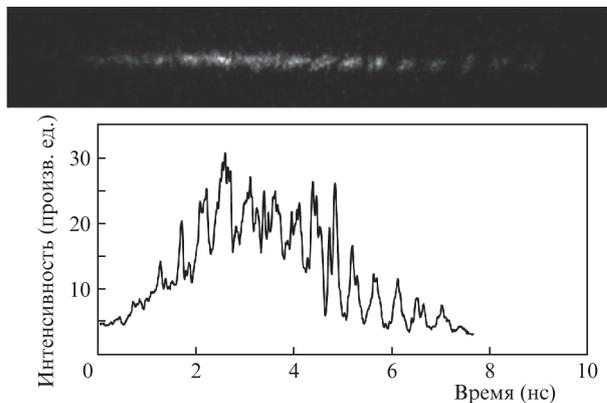


Рис.3. Распределение частиц в пучке из ЛУ, совершившем 5 оборотов в НО после инъекции.

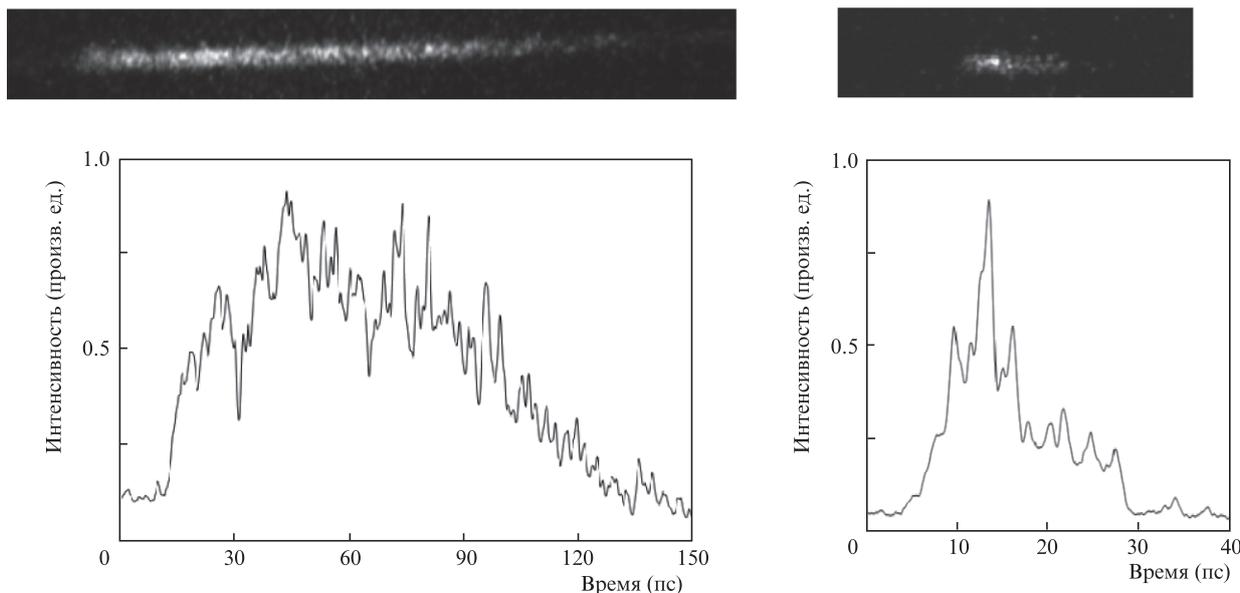


Рис.4. Структуры двух сгустков пучка, генерируемого ЛУ.

также изучались причины разбрасывания пучка по нескольким соседним сепаратрисам НО.

Зарегистрированная структура пучка, инжектируемого из ЛУ в НО (рис.3), показывает, что пучок с общей длительностью около 7 нс состоит из более чем десятка сгустков, расстояние между которыми равно периоду ускоряющей частоты ЛУ ( $v_{LA} = 2.856$  ГГц). Длительность одного сгустка в пучке может меняться в широких пределах (рис.4).

Частота ускоряющего напряжения в НО  $v_{AC} = 700$  МГц, поэтому на устойчивую орбиту будут захвачены лишь те частицы пучка, инжектируемого из ЛУ, которые попадут в сепаратрисы НО. Иными словами, пучок ЛУ будет «прорежен» с частотой 700 МГц и в НО будут захвачены только те частицы из него, расстояние между которыми определяется частотой  $v_{AC}$ .

Спустя 10 оборотов пучка в НО становится хорошо заметной модуляция пучка (рис.5), поскольку «вымирают» частицы, оказавшиеся в области неравновесной фазы при прохождении через ускоряющий резонатор НО.

Процесс «вымирания» приводит к тому, что спустя 15 оборотов в НО пучок разбивается на отдельные сгустки (рис.6) и становится заметной концентрация частиц в пределах сепаратрис НО. Таким образом, весьма вероятно, что временное распределение частиц в пучке (см.

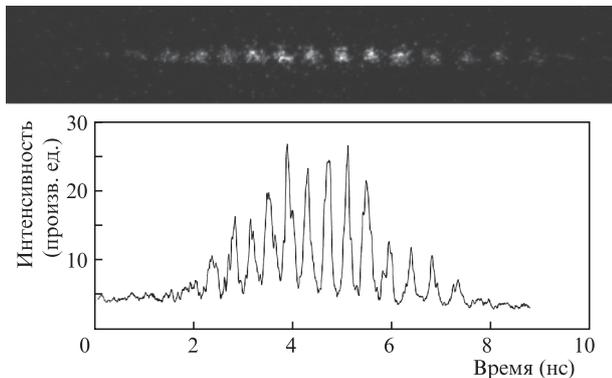


Рис.5. Структура пучка, совершившего в НО 10 оборотов после однократной инжекции.

рис.3) уже искажено потерями на первых пяти оборотах в НО. В конечном итоге выживают частицы, захваченные в сепаратрисы НО (рис.7). Приведенные данные позволяют лишь качественно оценить эффективность инжекции из ЛУ в НО.

Измерение профиля сгустка в НО, захваченного в отдельную сепаратрису, показывает, что его форма близка к гауссовской и соответствует расчетной длительности  $\sigma \approx 80$  пс при заданном напряжении на ускоряющем резонаторе  $U_{RF} = 55$  кВ (рис.8).

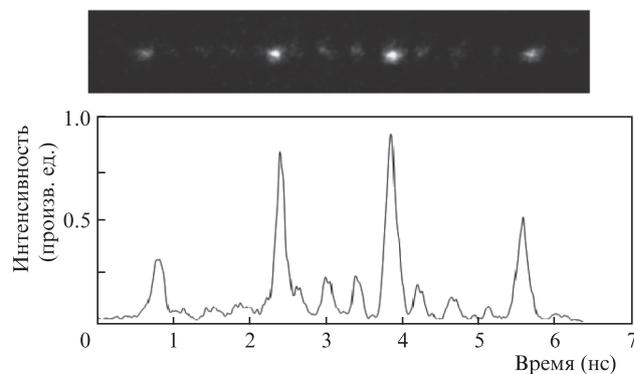


Рис.6. Структура пучка в НО спустя 15 оборотов после инжекции.

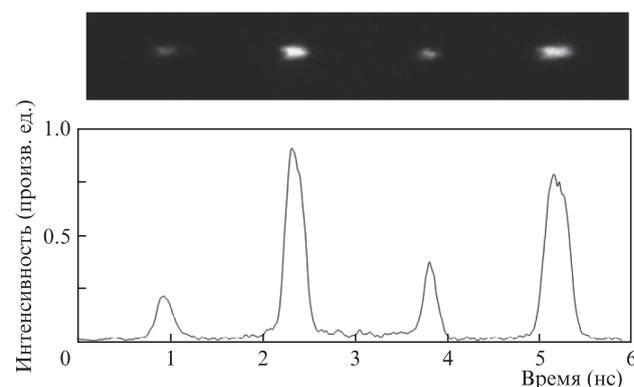


Рис.7. Структура пучка в НО, накопленного в четырех сепаратрисах после нескольких сотен оборотов.

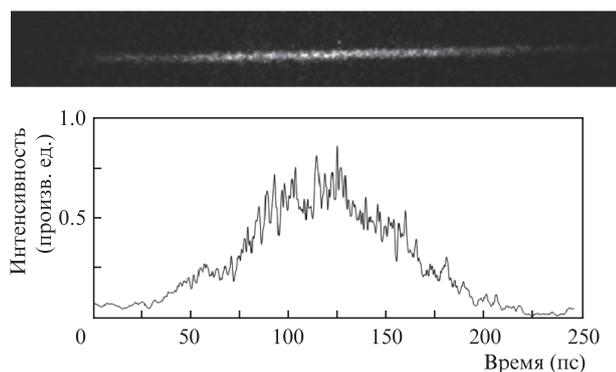


Рис.8. Продольный профиль одного сгустка пучка, накопленного в НО. Напряжение на ускоряющем резонаторе 55 кВ.

### 3. Заключение

Измерения длительности импульсов СИ, соответствующих длине электронных пучков, показали, что ЭОК позволяет регистрировать как цуг электронных сгустков внутри пучка длительностью  $\sim 5$  нс (рис.3, 5), так и структуру сгустков внутри цуга (рис.6, 7). Кроме того, ЭОК регистрирует расстояние между сгустками ( $\sim 1.5$  нс) и их амплитуду, которая связана с количеством частиц в сгустке. Установлено, что длительность одного электронного сгустка может лежать в пределах 20–100 пс. Внутренняя структура одиночного сгустка сильно меняется в зависимости от параметров работы ЛУ.

Использование ЭОК в диагностическом комплексе ускорителя позволяет контролировать процесс формирования электронных (в дальнейшем и позитронных) сгустков, что представляет большой практический интерес, т.к. дает возможность увеличить эффективность захвата частиц из линейного ускорителя в накопитель-охладитель. Повышение эффективности захвата непосред-

ственно связано с увеличением средней светимости электрон-позитронных коллайдеров ВЭПП-2000 и ВЭПП-4М [3, 11], источником частиц для которых должен стать НО.

Малый джиттер импульсов синхронизации ЭОК (до единиц пикосекунд) и их хорошая синхронизация с импульсами СИ позволяют надеяться на достижение высокого временного разрешения в режиме длительного накопления повторяющихся сигналов, что является принципиально важно для нового поколения пикосекундных диссекторов.

Авторы выражают благодарность за помощь и поддержку сотрудникам Отдела фотоэлектроники ИОФ РАН и ИЯФ СО РАН.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-29-00295).

1. Schelev M.Ya., Monastyrskiy M.A., Vorobiev N.S., Garnov S.V., Greenfield D.E. *Aspects of Streak Image Tube Photography* (Amsterdam: Elsevier Publ., 2013, AIEP, Vol. 180).
2. Кулипанов Г.Н., Скринский А.Н. *УФН*, **122**, 369 (1977).
3. Анчугов О.В. и др. *ЖЭТФ*, **136**, 690 (2009).
4. Alexandrov A.V. et al. *Proc. XVIII Int. Linear Accelerator Conf.* (Geneva, 1996, Vol. 2, p. 821).
5. Вячеславов Л.Н. и др. *ЭЧАЯ*, **43**, 451 (2012).
6. Zinin E.I. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **208**, 439 (1983).
7. Смалюк В.В. *ЭЧАЯ*, **43**, 401 (2012).
8. Gurov S.M. et al. *Proc. EPAC-2004* (Lucerne, Switzerland, 2004, p. 259).
9. Ferianis M. *Longitudinal Diagnostics* (Le Normont, Dourdan, France, CERN Accelerator School, 2008, Pt. II).
10. Гаранин С.Г., Бельков С.А., Рогожников Г.С., Рукавишников Н.Н., Романов В.В., Воронич И.Н., Воробьев Н.С., Горностаев П.Б., Лозовой В.И., Щелев М.Я. *Квантовая электроника*, **44**, 798 (2014).
11. Shwartz D., Berkaev D., Koop I., Perevedentsev E., Rogovsky Yu., Shatunov Yu., Kasaev A., Kyrpotin A., Lysenko A., Prosvetov V., Romanov A., Senchenko A., Shatunov P., Zemlyansky I., Zharinov Yu. *Proc. IPAC-2014* (Dresden, 2014).