
ИЗЛУЧЕНИЕ ВАВИЛОВА – ЧЕРЕНКОВА

Регистрация излучения Вавилова–Черенкова в линейном ускорителе с помощью пикосекундной стрик-камеры

Н.С.Воробьев, П.Б.Горностаев, С.М.Гуров, В.Л.Дорохов, А.Е.Зубко, 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, модель PS-1/S1, разработана в ИОФ РАН, Москва) измерены временные параметры импульсов излучения Вавилова–Черенкова. Такое излучение генерировалось релятивистскими электронами при прохождении через кварцевый конус, установленный на оси вакуумной камеры линейного ускорителя инжекционного комплекса ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН (Новосибирск). Полученные данные позволяют судить о процессах формирования электронных сгустков и их «качестве» в линейном ускорителе до инжекции электронов в накопитель-охладитель. Сделан вывод о целесообразности применения стрик-камер при настройке линейных ускорителей для достижения оптимальных параметров электронных сгустков.

Ключевые слова: излучение Вавилова–Черенкова, электронно-оптическая камера, диссектор, оптическая диагностика, циклический ускоритель, линейный ускоритель.

1. Введение

До недавнего времени электронно-оптические камеры (ЭОК) наиболее широко использовались в лазерной физике, диагностике лазерной плазмы, в лазерной спектроскопии и т. п. [1]. Относительно новая область применения ЭОКов с линейной разверткой (стрик-камер) – это оптическая диагностика синхротронного излучения, испускаемого электронами или позитронами в циклических ускорителях [2]. Такое использование камеры позволило, в частности, оптимизировать режимы работы накопителя-охладителя (НО) инжекционного комплекса ВЭПП-5 ИЯФ СО РАН (Новосибирск) и улучшить инжекцию в него частиц из линейного ускорителя – линака (linear accelerator) [3].

Целью настоящей работы было изучение параметров пучка, генерируемого линаком, с помощью стрик-камеры PS-1/S1, разработанной и изготовленной в ИОФ РАН (Москва) [3]. Поскольку частота следования сгустков электронов из этого ускорителя составляет десятки герц, для исследования их продольного профиля невозможно применить диссектор [4], рассчитанный на частоты следования импульсов порядка нескольких мегагерц. В связи с этим применение в такого рода исследованиях стрик-камеры, работающей с частотой внешнего запуска в диа-

пазоне от одиночного до единиц килогерц, является оправданным. В настоящей работе регистрировалось излучение Вавилова–Черенкова (ИВЧ), испускаемое релятивистскими электронами при прохождении через кварцевый конус, устанавливаемый на ось вакуумной камеры ускорителя.

2. Эксперимент

Инжекционный комплекс ВЭПП-5 – это источник интенсивных электронных и позитронных сгустков (энергия 510 МэВ), расчетное число частиц в которых может с запасом обеспечить все потребности работающих в ИЯФ СО РАН установок на встречных электрон-позитронных пучках. Комплекс состоит из линейного ускорителя электронов на энергию 285 МэВ и линейного ускорителя позитронов на 510 МэВ, а также НО с каналами впуска и выпуска пучков [5]. Электронный и позитронный пучки, полученные и ускоренные линаком, поочередно захватываются в накопитель и охлаждаются в нем; при этом вследствие радиационного трения их поперечный и продольный фазовые объемы уменьшаются. Охлажденные пучки выпускаются в электронно-оптические каналы для поочередной инжекции в коллайдеры ВЭПП-2000 и ВЭПП-4М.

Во время работы линака временные параметры сгустков электронов и позитронов необходимо контролировать. В отличие от циклических ускорителей, в которых продольный размер сгустков электронов и позитронов контролируется по синхротронному излучению (неинвазивный метод), в линаке такой возможности нет. Временные параметры пучков частиц в таком ускорителе измеряются инвазивным методом путем введения фольги для генерации переходного излучения или с помощью установки кварцевого конуса для генерации в нем ИВЧ. В настоящем эксперименте мы использовали кварцевый конус (рис.1), который был создан для настройки односгусткового режима работы ускорителя с помощью

Н.С.Воробьев, П.Б.Горностаев, А.Е.Зубко, В.И.Лозовой, А.В.Смирнов, Е.В.Шашков, М.Я.Щелев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: vor@kapella.gpi.ru, shashkov@kapella.gpi.ru, m.schelev@ran.gpi.ru

С.М.Гуров, 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 630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: o.i.meshkov@ngs.ru

Поступила в редакцию 22 марта 2016 г.

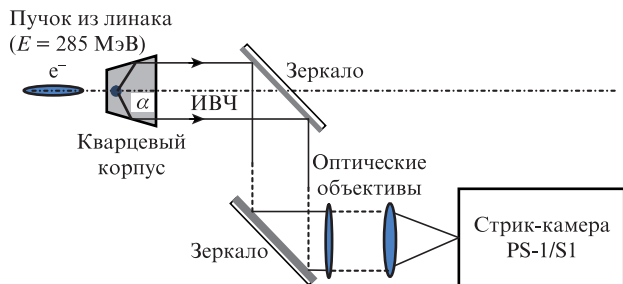


Рис.1. Оптическая схема эксперимента.

разработанной в ИЯФ стрик-камеры с разверткой на основе высокодобротного резонатора на частоте линака 2.856 ГГц [6].

Длительность импульсов ИВЧ при взаимодействии пучков частиц со средой конуса совпадает с временным распределением частиц вдоль оси распространения при их движении в ускорителе, что позволяет определять временной профиль, а следовательно, и продольный размер сгустков электронов и позитронов при их ускорении в линаке.

ИВЧ, выходящее из кварцевого конуса (рис.2), должно коллимироваться при отражении от его стенок в слабо расходящийся световой пучок. Однако из-за несоосности пучка с конусом и разнообразных оптических aberrаций наблюдаемая картина далека от идеальной. Фактически на фотокатод стрик-камеры с помощью объективов строилось уменьшенное изображение светящейся области кварцевого конуса, при этом угол входа пучка в конус подстраивался вертикальным и горизонтальным магнитным корректором по максимуму сигнала.

В нашем эксперименте для измерения длительности ИВЧ была использована стрик-камера модели PS-1/S1, основные характеристики которой приведены в работе [7]. Камера располагалась на оптическом столе, находившемся в помещении линейного ускорителя. Кварцевый конус с углом раствора θ , таким, что $\cos\theta = 1/n$ ($n = 1.51$ – коэффициент преломления света в кварце), находился внутри специализированного диагностического блока и помещался на ось вакуумной камеры с помощью электромагнита. ИВЧ выводилось наружу с помощью пары зеркал и фокусировалось двумя объективами непосредственно на фотокатод стрик-камеры (см. рис.1), поскольку целью экспериментов являлось измерение не пространственного, а продольного (временного) профиля пучка. В статическом режиме работы камеры изображение на выходном экране из-за неидеальности пучка было подобно эллипсу с размерами в координатах время–пространство 1–1.4 мм соответственно. Такой размер (1 мм) разрешаемого элемента изображения ограничивает вре-

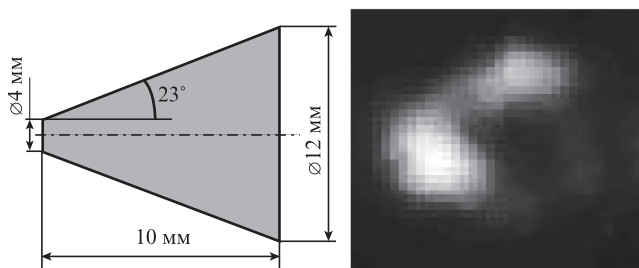


Рис.2. Габариты кварцевого конуса и фотография ИВЧ, испускаемого в нем электронным пучком.

менное разрешение данного метода, которое с учетом предельного разрешения стрик-камеры (~ 1 пс) ухудшилось до ≥ 10 пс. Более того, в таких условиях падает интенсивность исследуемого сигнала, и для его детального исследования при длительности, например, более 100 пс на достаточно быстрых развертках может просто не хватить падающего на фотокатод света.

Анализ изображений, полученных на выходном экране камеры, осуществлялся с помощью системы считывания. Необходимо отметить, что в процессе измерений была показана устойчивая помехозащищенность и надежная работоспособность ЭОКа в условиях повышенного уровня электромагнитного и радиационного излучения, а также высокой (более 40 °С) температуры.

Число фотонов в ИВЧ, испускаемых электроном в оптическом диапазоне при его прохождении через конус, есть [8]

$$N_\gamma = 2\pi\alpha d \left(\frac{1}{\lambda_{\min}} - \frac{1}{\lambda_{\max}} \right) \left(1 - \frac{1}{n^2} \right).$$

Следовательно, для пучка с зарядом 1 пКл число фотонов равно 10^9 . Здесь α – постоянная тонкой структуры; λ_{\min} (400 нм) – λ_{\max} (700 нм) – диапазон длин волн ИВЧ; $d = 1$ см – длина конуса. С учетом квантовой эффективности фотокатода стрик-камеры, которая не хуже 10^{-3} для видимого диапазона, получаем 10^6 электронов, приходящихся на статический разрешаемый элемент размером 1×1.4 мм. Такого количества электронов может быть недостаточно для регистрации ИВЧ большой длительности (свыше 100 пс) на быстрых развертках, что и показали последующие измерения.

Предложенная методика измерения временной структуры пучка имеет еще одно ограничение на временное разрешение, связанное с дисперсией света в конусе. При этом расплывание импульса можно оценить как

$$\tau = \frac{d}{c} \frac{dn}{d\lambda_m} (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) \approx 2 \text{ пс}.$$

Здесь c – скорость света в вакууме; $\lambda_m = 0.5(\lambda_{\max} + \lambda_{\min})$. В нашем случае это ограничение не существенно для определения временного разрешения метода, составляющего, как уже отмечено, ≥ 10 пс. Следует также упомянуть альтернативную методику для диагностики релятивистских пучков заряженных частиц, основанную на применении безынерционного переходного излучения, однако его интенсивность на 2–3 порядка ниже [9, 10].

Регистрация излучения пучка при длительности развертки стрик-камеры 33 нс на экране длиной 25 мм выявила наличие двух сгустков, генерируемых линаком за один импульс (рис.3). Появление второго сгустка объясняется дефектом в формирующей линии электронной пушки линака и является нежелательным обстоятельством, т. к. эти частицы не попадают в НО, а теряются на стенках вакуумной камеры и создают наведенный радиационный фон в защищенном зале ускорителя.

Структура первого сгустка, захватываемого в НО, исследовалась при увеличенной (10 нс/экран) скорости развертки и показана на рис.4. Отчетливо видна модуляция интенсивности, период которой соответствует частоте 500 МГц, используемой в группирующей секции линака. На рис.5 показана временная структура двух соседних импульсов (скорость развертки 3.5 нс/экран), представ-

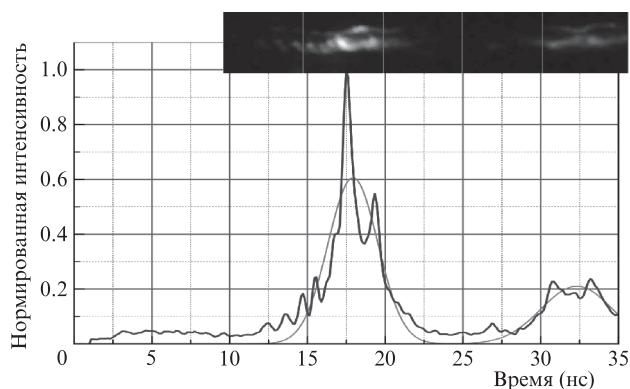


Рис.3. Два сгустка, генерируемых линаком за один импульс (вставка), и их двумерный профиль. Скорость развертки 33 нс/экран. Тонкая кривая – стандартная аппроксимация.

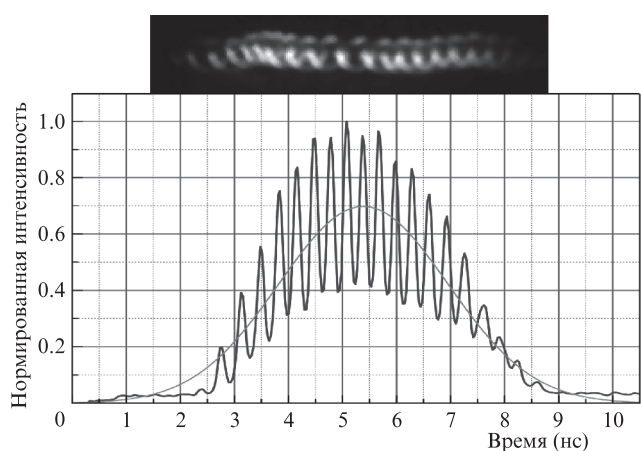


Рис.4. Структура первого сгустка, захватываемого в НО. Скорость развертки 10 нс/экран.

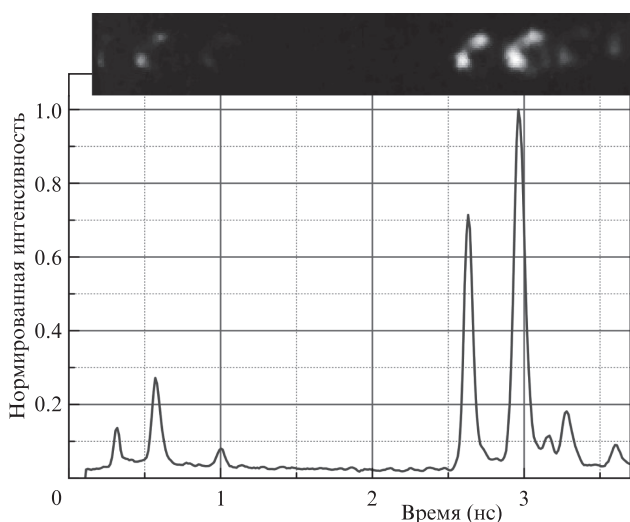


Рис.5. Структура двух соседних импульсов, представленных на рис.4. Скорость развертки 3.5 нс/экран.

ленных на рис.4. И здесь отчетливо наблюдается тонкая временная структура, характер которой говорит о сложных процессах, проходящих в линаке. При дальнейшем увеличении скорости развертки (до 1.4 нс/экран) получить изображение, достаточное для надежной регистрации, нам не удалось.

Для дальнейшего исследования временной структуры отдельного импульса необходимо существенно улучшить качество тракта оптической регистрации ИВЧ, генерируемого кварцевым конусом, с тем, чтобы осуществить острую фокусировку излучения на фотокатод стрик-камеры. Это позволит достичь предельного временного разрешения данной методики, сравнимого с разрешением самой ЭОК, а также повысить плотность интенсивности исследуемого сигнала для его надежной регистрации при работе камеры в режиме быстрых скоростей развертки. Однако даже полученные результаты позволяют судить о режиме работы линейного ускорителя и оптимизировать его параметры.

Итак, при помощи стрик-камеры PS-1/S1 исследована структура пучка электронов, испускаемого линейным ускорителем инжекционного комплекса ВЭПП-5. Зарегистрировано продольное распределение частиц в пучке, инжектируемом линейным ускорителем за один импульс. Полученные данные позволяют оптимизировать режим работы установки. Камера PS-1/S1 продемонстрировала универсальность и высокую надежность при работе в условиях высокого уровня электромагнитных помех и радиационного фона.

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, Adv. Imag. Electron. Phys., Vol. 180).
2. Scheidt K. *Proc. Europ. Particle Accelerator Conf.* (Vienna 2000, p. 182).
3. Верещагин А.К., Воробьев Н.С., Горностаев П.Б., Дорохов В.Л., Крюков С.С., Лозовой В.И., Мешков О.И., Никифоров Д.А., Смирнов А.В., Шашков Е.В., Щелев М.Я. *Квантовая электроника*, **46**, 185 (2016).
4. Zinin E.I. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Research*, **208**, 439 (1983).
5. Старостенко А.А., Логачев П.В., Мешков О.И., Никифоров Д.А., Андрианов А.В., Левичев А.Е., Еманов Ф.А, Астрелина К.В., Блинов М.Ф., Цыганов А.С., Беркаев Д.Е., Кооп И.А., Болховитянов Д.Ю., Дорохов В.Л. *Письма в «Физику элементарных частиц и атомного ядра»*, **7**, (2016) (принято к публикации).
6. Gurov S.M., Bak P.A., Chernousov Y.D., Logatchov P.V., Ryata E.E. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6279**, 62790B (2007).
7. 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).
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Электродинамика сплошных сред* (М.: ГИТТЛ, 1957, с. 450).
9. Гинзбург В.Л., Цытович В.Н. *УФН*, **126**, 553 (1978).
10. Hollack K., Kamps T., Kuske P. *Proc. Europ. Part. Accelerators Conf.* (Lucerne: EPS-AG, 2004, p. 2532).