

УДК 537.872.32

ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА НА СИНХРОТРОНЕ “ПАХРА”

В. А. Карпов, А. В. Серов

Описана экспериментальная установка, позволяющая оперативно измерять поперечные размеры электронного пучка и его положение в камере синхротрона. Приведены результаты экспериментов, позволяющие оценить возможности диагностики параметров электронных сгустков.

Электронный синхротрон “Пахра” на энергию 1.2 ГэВ работает с частотой магнитного поля $f = 50$ Гц. Синхротрон состоит из четырех поворотных магнитов, разделенных прямолинейными промежутками. Радиус равновесной орбиты в магните $R_0 = 400$ см, длина каждого прямолинейного промежутка $L = 190$ см. Инжектором синхротрона является микротрон на энергию 7.4 МэВ, работающий на первом типе ускорения. В настоящее время на синхротроне проводятся физические эксперименты, использующие выведенный электронный пучок и рентгеновское излучение, генерируемое при пересечении электронами мишени.

Для решения новых физических задач на синхротроне проводятся работы, расширяющие его возможности. Микротрон переведен во второй режим ускорения, при котором его энергия увеличилась до 11.5 МэВ. Заканчивается сооружение канала, на котором предполагается провести эксперименты в вакуумном ультрафиолетовом диапазоне синхротронного излучения. Планируется перевести синхротрон в квазинакопительный режим, при котором частота магнитного поля будет равна $f = 2$ Гц, время ускорения электронов до максимальной энергии $T_m \approx 8$ мсек, длительность плато магнитного поля $T_p \approx 500$ мсек. Оптимизация новых режимов работы синхротрона требует исследования динамики пучков в процессе ускорения и накопления.

Ранее исследование динамики поперечного сечения электронного пучка на синхротроне “Пахра” проводилось методом скоростного фотографирования [1]. За цикл ускорения снималось 10–11 кадров. Для пересчета почернений в изображении поперечного

сечения сгустка в интенсивность излучения необходимо знать характеристическую кривую киноплёнки. С этой целью на используемую плёнку фотографировали ступенчатый ослабитель. Знание характеристической кривой позволяло обрабатывать на микрофотометре изображение пучка на киноплёнке.

При исследовании новых режимов работы синхротрона очень важна оперативная информация о положении пучка в камере и его поперечных размерах. Метод скоростного фотографирования не может применяться для оперативной диагностики, поэтому была создана новая установка, использующая для индикации светового потока фотоэлектронный умножитель.

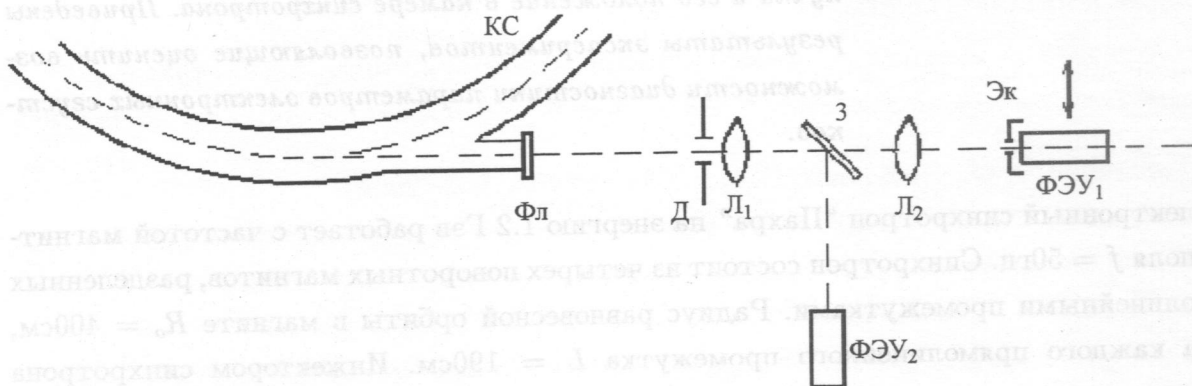


Рис. 1. Схема установки КС – камера синхротрона, Фл – фланец, Д – щелевая диафрагма, L_1, L_2 – линзы, З – полупрозрачное зеркало, Эк – непрозрачный экран, ФЭУ₁, ФЭУ₂ – фотоэлектронные умножители.

Схема установки показана на рис. 1. Синхротронное излучение выводилось из камеры синхротрона КС через фланец Фл. С помощью линз L_1 и L_2 излучение собиралось в некоторой точке оптической оси установки, образуя промежуточное изображение. На линзе L_1 установлена щелевая диафрагма, позволяющая уменьшить азимутальную протяженность участка орбиты, с которой собирается излучение. Оптическая система имела увеличение, равное единице. Поэтому, в нашем случае, в некоторой точке оптической оси практически имелось изображение поперечного сечения пучка с радиальным размером ~ 10 мм и вертикальным ~ 5 мм. В этой точке располагался фотоэлектронный умножитель ФЭУ₁, на входном окне которого находился экран Эк с круглой диафрагмой диаметром 1 мм. ФЭУ₁ можно было дистанционно перемещать перпендикулярно оптической оси установки, измеряя распределение интенсивности излучения по поперечному

сечению изображения. Поскольку ширина пучка d более чем на два порядка меньше радиуса равновесной орбиты R_0 , можно считать, что мощность излучения, испускаемая отдельным электроном, не зависит от его положения в сгустке. Поэтому распределение яркости по поперечному сечению пучка совпадает с распределением плотности электронов.

На оптической оси имеется полупрозрачное зеркало З, отводящее 30% интенсивности синхротронного излучения в фотоэлектронный умножитель $\Phi \mathcal{E} U_2$. Поток, падающий на этот фотоумножитель не диафрагмировался. Поскольку диаметр катода фотоумножителя был больше поперечного размера изображения, то сигнал с $\Phi \mathcal{E} U_2$ пропорционален ускоряемому току и использовался для нормировки зависимостей интенсивности излучения I от времени t , которые измерялись $\Phi \mathcal{E} U_1$.

Были проведены измерения поперечного распределения плотности электронов при ускорении частиц до энергии 350 МэВ и 650 МэВ. Сигнал с $\Phi \mathcal{E} U_1$ регистрировался цифровым осциллографом. Результаты измерений сохранялись в виде файлов, в которых интенсивность излучения фиксировалась с шагом по времени $\Delta t = 20$ мксек. В проведенных экспериментах с большой точностью можно полагать, что энергия частиц в синхротроне изменяется во времени по синусоидальному закону. Энергия достигала максимума в момент времени $t = 8.5$ мсек и затем уменьшалась. Длительность импульса высокочастотного напряжения на резонаторе T_v можно было изменять в диапазоне от 1 мсек до 18 мсек. При длительностях $T_v > 8.5$ мсек в синхротроне, после достижения максимальной энергии, происходило замедление частиц. Это давало возможность изучать динамику поперечных размеров пучка при его торможении.

В экспериментах, при заданных поперечных координатах r_i , фотоэлектронным умножителем $\Phi \mathcal{E} U_1$ регистрировались зависимости интенсивности излучения от времени $I_{r_i}(t)$. $\Phi \mathcal{E} U_1$ перемещался с шагом $\Delta r = r_{i+1} - r_i = 1.2$ мм. Уже сами зависимости $I_{r_i}(t)$ позволяют качественно судить об изменении поперечного размера пучка и его положения в камере синхротрона. Для иллюстрации этого на рис. 2 показаны некоторые осциллограммы $I_{r_i}(t)$, полученные при ускорении частиц до энергии 650 МэВ и длительности импульса ВЧ $T_v = 16$ мсек. (Выбраны осциллограммы, измеренные с шагом перемещения $\Phi \mathcal{E} U_1$, равным $\Delta r = 2.4$ мм). Кривые 1 и 6 иллюстрируют зависимость от времени плотности электронов на краях сгустка, а кривые 3 и 4 – в середине сгустка. Видно, что до момента времени $t \approx 6$ мсек поперечные размеры сгустка уменьшаются, поскольку плотность частиц в середине сгустка увеличивается, а на периферии сгустка уменьшается. В дальнейшем размеры сгустка увеличиваются, т.к. уменьшается

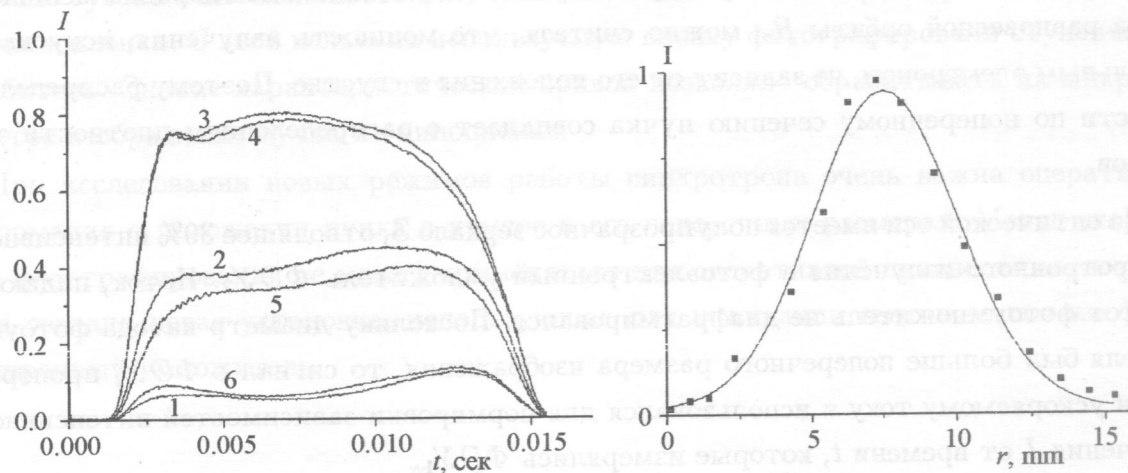


Рис. 2. Зависимость от времени интенсивности излучения при различных положениях $\Phi \Theta Y_1$. $\Delta r = r_2 - r_1 = \dots = r_6 - r_5 = 2.4$ мм.

Рис. 3. Поперечное распределение частиц в сгустке. Квадраты – экспериментальные значения, кривая – аппроксимация гауссовской зависимостью.

плотность в середине и увеличивается на краях сгустка.

Серия осциллограмм, подобных показанным на рис. 2, позволяет количественно описать изменение положения пучка в камере и изменение поперечного размера сгустка. Для этого программным способом в файлах производилась выборка интенсивностей излучения $I_{r_i}(t_j)$, измеренных в заданный момент времени t_j . Это позволяло для заданного момента времени t_j построить зависимость интенсивности излучения от поперечной координаты r_i (поперечной координаты $\Phi \Theta Y_1$). Пример такой зависимости показан на рис. 3. Точки на рисунке соответствуют значениям интенсивности в заданный момент времени t_j на осциллограммах, соответствующих различным поперечным координатам $\Phi \Theta Y_1$. Кривая на рис. 3 показывает гауссовскую зависимость, аппроксимирующую экспериментальные точки. Как видно из рисунка, гауссовская зависимость достаточно хорошо описывает экспериментальные результаты. В нашем случае ширина гауссовской кривой эквивалентна ширине сгустка, а положение максимума кривой определяет поперечную координату пучка в камере.

Построение таких распределений для различных моментов времени дает возможность построить зависимость от времени поперечного размера сгустка $d(t)$ и его положения в камере синхротрона $r(t) = R(t) - R_0$, где $R(t)$ – радиус орбиты. На рис. 4

показаны поперечные распределения частиц в пучке при выводе электронов из синхротрона. Распределения получены для различных моментов времени: кривая 1 соответствует моменту времени $t_j = 7.8$ мсек, кривая 2 - $t_j = 8$ мсек, кривая 3 - $t = 8.2$ мсек. Приведенные распределения позволяют вычислить значения скорости смещения пучка и судить об изменении пространственного распределения частиц при выводе электронов.

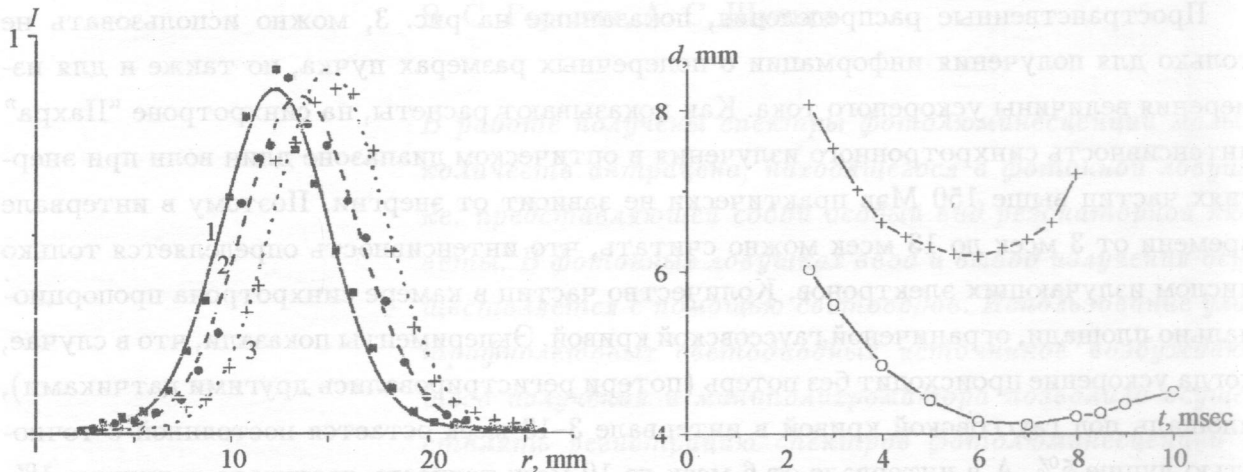


Рис. 4. Поперечные распределения частиц в сгустке при выводе электронов из синхротрона. 1 - $t_j = 7.8$ мсек, 2 - $t_j = 8$ мсек, 3 - $t_j = 8.2$ мсек.

Рис. 5. Зависимость поперечного размера пучка от времени. Крестики - максимальная энергия частиц 350 Мэв, кружки - 650 Мэв.

На рис. 5 представлена зависимость от времени ширины электронного пучка. Верхняя кривая соответствует случаю, когда измерения проводились при ускорении частиц до максимальной энергии, равной 350 МэВ, а нижняя кривая - до энергии 650 МэВ. В первом случае длительность импульса высокочастотного напряжения на резонаторе была равна $T_v = 8$ мсек, а во втором - $T_v = 10$ мсек. В обоих случаях частица имеет максимальную энергию в момент времени $t = 8.5$ мсек, поэтому во втором случае электроны некоторое время движутся в спадающем магнитном поле и уменьшают свою энергию.

Из рисунка видно, что пучок имеет минимальный поперечный размер не при максимальной энергии, а в более ранний момент времени. К моменту времени, когда энергия частиц максимальна, ширина пучка уже заметно возрастает. Можно указать несколько

причин такой зависимости ширины ускоряемого пучка за время ускорения [2]. В частности такой причиной может быть плохой вакуум в некоторой части камеры. К такому же результату могут приводить квантовые флуктуации излучения, взаимодействия частиц пучка, взаимодействие ускоряемого пучка с резонатором или с каким-либо резонирующим объемом вакуумной камеры. Последующие эксперименты позволят оценить вклад каждой из причин в наблюдаемую зависимость.

Пространственные распределения, показанные на рис. 3, можно использовать не только для получения информации о поперечных размерах пучка, но также и для измерения величины ускоренного тока. Как показывают расчеты, на синхротроне "Пахра" интенсивность синхротронного излучения в оптическом диапазоне длин волн при энергиях частиц выше 150 МэВ практически не зависит от энергии. Поэтому в интервале времени от 3 мсек до 13 мсек можно считать, что интенсивность определяется только числом излучающих электронов. Количество частиц в камере синхротрона пропорционально площади, ограниченной гауссовской кривой. Эксперименты показали, что в случае, когда ускорение происходит без потерь (потери регистрировались другими датчиками), площадь под гауссовской кривой в интервале 3–13 мсек остается постоянной с точностью лучше 5%. А в интервале от 6 мсек до 10 мсек точность достигала величины 1%.

Измерения показали, что созданная система диагностики и обработки полученных сигналов позволяет с высокой точностью фиксировать поперечные размеры ускоряемого пучка и его положение в камере синхротрона.

Авторы благодарны Г. Г. Субботину за помощь при проведении экспериментов. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант 05-08-33689).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ю. А. Башмаков, В. А. Карпов, А. С. Яров, ЖТФ 54(5), 905 (1984).
- [2] А. А. Коломенский, А. Н. Лебедев, Теория циклических ускорителей. (М., Физматгиз, 1962).

Поступила в редакцию 22 мая 2007 г.