

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

У830/2-81

28/9-81

P9-81-427

А.П.Сумбаев, С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕКТРОННОГО КОЛЬЦА
ПО ИЗМЕРЕНИЮ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В ВИДИМОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА
НА ПРОТОТИПЕ КУТИ ОНМУ ОИЯИ

1981

При сжатии электронно-ионного кольца в импульсном магнитном поле в камере адгезатора КУТИ ОИЯИ достигается энергия электронов порядка 20 МэВ /1/. При таких энергиях значительная часть синхротронного излучения электронов заключена в видимой области спектра.

Измеряя мощность излучения, можно определить количество электронов в кольце, так как спектр излучения одного электрона хорошо известен /см., напр., /2,3/ /:

$$I_{\lambda} = N_e W_{\lambda} .$$

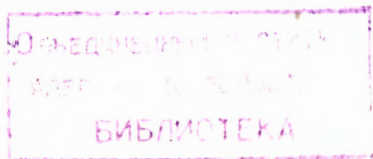
I_{λ} - мощность излучения кольца; W_{λ} - мощность излучения одного электрона; N_e - число электронов в кольце.

Для регистрации синхротронного излучения использовался фотоэлектронный умножитель ФЭУ-87. Схема расположения ФЭУ относительно камеры адгезатора показана на рис.1.

В плоскости, находящейся на расстоянии $L=90$ см от оптического окна, находился световод /3/ длиной 2 м, который соединялся с ФЭУ /4/ для того, чтобы избежать влияния рассеянных магнитных полей. Эксперименты проводились при разных количествах электронов в кольце; после сжатия кольцо разжималось, и электроны высаживались на стенку камеры, при этом возникающий поток γ -квантов был пропорционален количеству электронов в кольце. Эти измерения проводились по мониторинговому ФЭУ со сцинтиллятором; режим работы ФЭУ выбирался в области линейности по выходному току при напряжении питания $U=1,7$ кВ. При этом амплитуда выходного сигнала γ была пропорциональна числу электронов, которые высаживались при расжатии на стенки камеры.

На рис.2 представлены осциллограммы сигнала с ФЭУ от синхротронного света и тока, соответствующего магнитному полю III степени сжатия. Проводился также контрольный эксперимент - апертура световода перекрывалась черной бумагой, при этом на приемнике в режиме сжатия сигналов не было. Для измерения числа электронов в кольце по синхротронному свету необходимо точное знание энергии электронов. Эти измерения были проведены с использованием узкополосных фильтров с полосой пропускания $\Delta\lambda = 100 \text{ \AA}$, с длинами волн от 4000 \AA до 6900 \AA . Спектральная чувствительность системы ФЭУ-фильтр-световод определялась по люминесцентной лампе СИ6-80:

$$\Psi(\lambda_1) = \frac{J(\lambda_1 T)}{P(\lambda_1 T)} ,$$



где $J(\lambda, T)$ - ток с ФЭУ для данного фильтра с длиной волны λ_1 ;
 $P(\lambda, T)$ - мощность излучения лампы для данной длины волны;
 $\Psi(\lambda, T)$ - спектральная чувствительность системы.

Калибровка проводилась в режиме модулированного потока света, который создавался вращающимся диском с отверстием. Изменяя расстояние между лампой и диском, можно изменять световой поток. На рис.3 представлена зависимость амплитуды сигнала с ФЭУ от величины светового потока; видно, что область линейности доходит до 100 мВ, это соответствует выходному току с ФЭУ $J_a = 2$ мА при длительности импульса света $\tau = 2$ мс и частоте повторения 50 Гц.

В измерениях синхротронного света на ускорителе для каждого фильтра с длиной волны λ_1 определяется ток с ФЭУ $J_c(\lambda_1)$ по

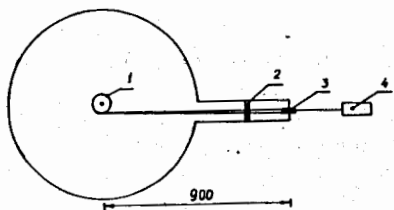


Рис.1. Геометрия измерения синхротронного света: 1 - электронное кольцо; 2 - диафрагма; 3 - световод; 4 - ФЭУ-87.

Рис.2. Осциллограммы сигналов: а - форма тока в III ступени сжатия; б - синхротронный свет с ФЭУ.

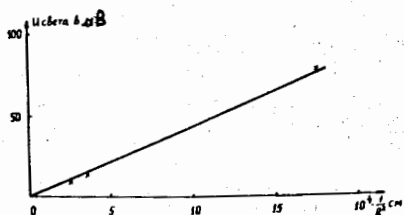
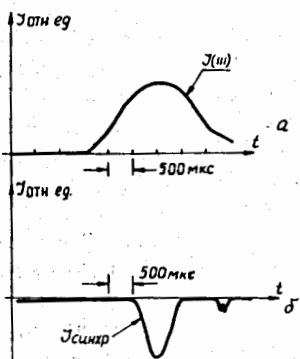


Рис.3. Зависимость амплитуды сигнала с ФЭУ в режиме калибровки измерений от величины светового потока: $\tau = 2$ мс; $f = 50$ Гц.

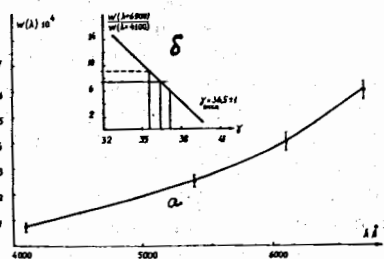


Рис.4. Спектральное распределение синхротронного света, измеренное в режиме сжатия при $U=20$ кВ, $R = 3,5$ см /а/; зависимость отношения излучения синхротронного света $\frac{W_{6900}}{W_{4100}}$ от энергии электронов /б/.

известной величине $\Psi(\lambda_1)$ находится спектр синхротронного света W_{λ_1} :

$$W_{\lambda_1} = \frac{J_c(\lambda_1)}{\Psi(\lambda_1)}$$

На рис.4а приведена зависимость W_{λ_1} от длины волны, измеренная на III ступени при напряжении $U = 20$ кВ, радиус измерения $R = 3,5$ см. Поскольку в этих измерениях не известно число электронов, то для сравнения с теоретическим расчетом сопоставляется отношение мощности излучения на $\lambda = 6900$ А и $\lambda = 4100$ А. На рис.4б приведена зависимость этой величины $\frac{W_{6900}}{W_{4100}}$ от энергии электронов γ ; экспериментальное отношение $\frac{W_{6900}}{W_{4100}} = 7,5 \pm 1,5$; этому значению соответствует релятивистский фактор электронов $\gamma = 36 \pm 1,0$, который соответствует напряжению на III ступени $U = 20$ кВ.

Спектр синхротронного излучения при этом рассчитывается по формуле из работы [3]:

$$W_{\lambda} = \frac{3^{5/2}}{16\pi^2} \frac{ce^2}{R^3} \left(\frac{E}{mc^2}\right)^7 G(\gamma),$$

где для интересующих нас длин волн $\lambda \ll \lambda_c$

$$G(\gamma) = \left(\frac{\pi}{2}\right)^{1/2} \gamma^{5/2} e^{-\gamma} \quad \gamma = \lambda_c / \lambda, \quad \lambda_c = \frac{4,2 R}{\gamma^3};$$

R - радиус кольца в момент измерения в см; γ - релятивистский фактор электронов в кольце; λ - длина волны, на которой проводятся измерения; W_{λ} - мощность излучения от одного электрона на единичный интервал длин волн.

Измерение числа электронов по синхротронному свету было сделано для длины волны $\lambda = 6900$ А; значение числа электронов находилось по формуле

$$N_e = \frac{I(\lambda)}{W_{\lambda}}, \quad /2/$$

где $I(\lambda_1)$ - экспериментально измеренная мощность излучения от всех электронов в кольце. Измерение проводилось по ФЭУ для длины волны $\lambda = 6900$ А, предварительно эталонной лампой СИ-6-80 производилась абсолютная градуировка ФЭУ для этой длины волны. Калибровка проводилась при температуре нити $T = 2325$ К. При расчете мощности падающего на приемную площадь света учитывалось, что источник излучения имеет косинусоидальную диаграмму направленности [4], поэтому $P(\lambda, T)$ - мощность, падающая на приемник:

$$P(\lambda_1, T) = C_1 \lambda_1^{-5} \left(e^{c^2/\lambda_1 T} - 1\right) \xi(\lambda_1, T) \frac{S_{\lambda} \Delta \Omega}{\pi},$$

где $C_1 = 3,72 \cdot 10^{-5}$; $C_2 = 1,44$ град.см; $S_{\Pi} = 0,052$ см² - площадь излучателя; $\xi(\lambda T)$ - коэффициент излучательной способности вольфрама^{5/}; $\Delta\Omega$ - телесный угол регистрации света от лампы $\Delta\Omega = 1,68 \cdot 10^{-5}$. Площадь приемника излучения $S_{\Pi} = 5 \cdot 10^{-2}$ см².

При измерении интенсивности излучения от электронов надо учитывать, что полный поток излучения от всех азимутов пересекает площадь^{4/} $S_{\Pi} = 2\pi L 2a_z$, где L - расстояние от точки излучения до приемника; a_z - ширина зоны излучения в горизонтальном направлении. Из этого потока в детектор попадает только часть излучения, которая равна отношению площадей детектора к площади излучения $\frac{S_{\Pi}}{S_{\Pi}}$.

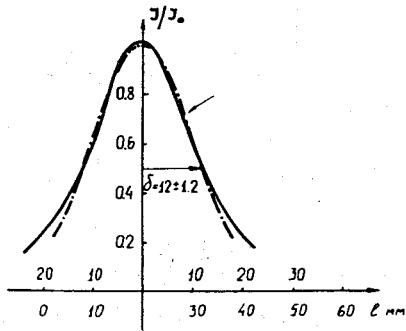


Рис.5. Зависимость углового распределения синхротронного света для $L = 90$ см, $U = 20$ кВ, $U_{\gamma} = 2$ В, $\lambda = 6900$ А.

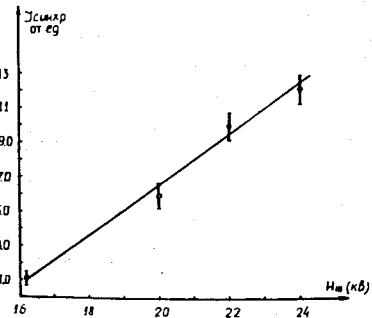


Рис.7. Зависимость выхода синхротронного излучения, регистрируемого ФЭУ, от энергии электронов в единицах напряжения на III ступени сжатия.

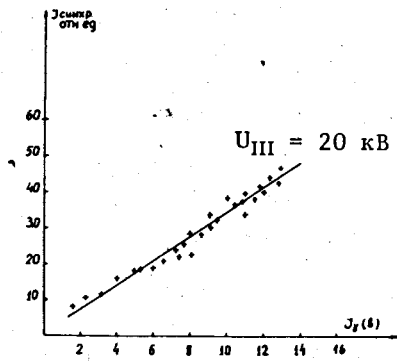


Рис.6. Зависимость амплитуды сигнала синхротронного света от относительного числа электронов в кольце в единицах обратной высадки.

Для определения количества электронов N_e в кольце с учетом вышесказанного можно из /2/ получить

$$N_i = \frac{J_c(\lambda_i)}{J(\lambda_i T)} \frac{S_{\Pi}}{S_{\Pi}} \frac{P(\lambda_i T)}{W_{\infty 1}}, \quad /3/$$

где $J_c(\lambda_i)$ - амплитуда сигнала при регистрации синхротронного света; $J(\lambda_i T)$ - амплитуда сигнала при калибровке.

Для определения площади, на которую приходится синхротронное излучение в z -направлении, с помощью фотопластинок производилось измерение угловой ширины излучения. Распределение интенсивности излучения находилось по стандартной методике^{5/}. На уровне 0,5 интенсивности ширина изображения для относительного числа электронов в единицах обратной высадки $U_{\gamma} = 1,5$ В равна $a_z = 1,2$ см, $L = 90$ см /рис.5/.

Подставляя эти данные в формулу: $J_c(\lambda_i) = 100$ мВ, $J(\lambda_i T) = 5$ мВ, $P(\lambda_i T) = 8 \cdot 10^{-2}$ Вт/см, $S_{\Pi} = 1356$ см², $S_{\Pi} = 5 \cdot 10^{-2}$ см² для $\gamma = 36$, $R = 3,5$ см, $W_{\lambda_i} = 0,9 \cdot 10^{-7}$ Вт/см, получаем значение $N_e = 4,8 \cdot 10^{11}$ на 100 мВ сигнала с ФЭУ, которому соответствует значение относительного числа электронов в кольце по обратной высадке $U_{\gamma} = 1,5$ В. На 1В сигнала обратной высадки приходится $3,2 \cdot 10^{11}$ электронов. Были проведены коррелированные измерения амплитуды синхротронного света и обратной высадки U_{γ} , которые приведены на рис.6. Из этих данных видно, что число электронов в кольце и сигнал обратной высадки связаны линейной зависимостью. Была также определена зависимость выхода синхротронного света от энергии электронов /рис.7/, которая варьировалась при изменении зарядного напряжения на III ступени сжатия.

Точность определения числа электронов в кольце обусловлена резкой зависимостью выхода синхротронного излучения от энергии и при точности определения энергии $\Delta\gamma/\gamma = 2,7\%$ составляет 27%. Ошибка, связанная с калибровкой по эталонной лампе из-за неточности определения температуры, составляет 15%, так что суммарная ошибка измерения числа электронов составляет 40%. Максимальное измеренное количество электронов в кольце, соответствующее обратной высадке $U_{\gamma} = 20$ В, составило $N_e = 16,6 \pm 2,7 \cdot 10^{12}$.

Выражаем глубокую благодарность В.А.Свиридову за обсуждение результатов, а также А.П.Кобзеву, предоставившему для калибровок образцовую вольфрамовую лампу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В.С. и др. ОИЯИ, Р9-10054, Дубна, 1976.
2. Скринский А.Н., Кулипанов Г.Н. УФН, 1977, т.122, в.3, с.369.

3. Gähviller C. et al. The Rev.Sci.Inst., 1972, vol.41, No.9, p.1275.
4. Адо Ю.М. В сб.: Труды ФИАН СССР, 1963, XIX, с.66.
5. Малышев В.И. Введение в экспериментальную спектроскопию. "Наука", М., 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 июня 1981 года.