



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

2693 / 2-81

1/6-81

P9-81-157

Ю.М.Волков, А.А.Мальцев, В.А.Свиридов,
В.П.Фоминенко, В.П.Чижов

ИЗМЕРЕНИЕ ЧИСЛА ЭЛЕКТРОНОВ
ПО СИНХРОТРОННОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ
В ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ

Направлено в ПТЭ

1981

Синхротронное излучение в кольцевых ускорителях электронов позволяет получать разнообразную информацию об ускоряемых электронных пучках. С его помощью можно измерять ток электронов в кольце, геометрические и энергетические параметры электронных колец, не вызывая каких-либо искажающих воздействий на ускоряемые частицы. Для измерения тока электронов целесообразно использовать длинноволновую часть спектра синхротронного излучения. Для синхротронного излучения в компрессоре ускорителя электронных колец ОИЯИ^{1/1} эта часть спектра приходится на инфракрасную область. Поэтому разработана методика измерения числа электронов по синхротронному излучению в ИК-области, проверка ее проведена на синхротроне ЛИЯФ^{2/2}.

Спектральное распределение мощности синхротронного излучения имеет вид^{3/3}

$$dw/d\lambda = 4\pi \cdot e^2 \cdot c \cdot \int_{\xi}^{\infty} K_{5/3}(\xi') d\xi' / \sqrt{3} \cdot \gamma^2 \cdot \lambda^3 . \quad /1/$$

Здесь e - заряд электрона; c - скорость света; $\gamma = E/mc^2 / E$ и m - энергия и масса электрона; $\xi = \lambda_c / \lambda$, $\lambda_c = 4\pi R / 3\gamma^3$; R - радиус орбиты электрона /см/; $K_{5/3}(\xi')$ - функция Макдональда.

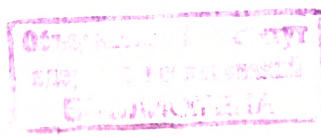
Из /1/ можно оценить мощность^{4/4} излучаемую вблизи максимума кривой спектрального распределения /для $\lambda \sim \lambda_c / 2$ /:

$$w_1 \approx 9 \cdot 10^{-21} \cdot \gamma^7 \cdot R^{-3} \quad W \frac{\text{Вт}}{\text{мкм элн}} , \quad /2/$$

и на длинах волн, превышающих критическую $\lambda \gtrsim \lambda_c$:

$$w_2 \approx 9 \cdot 10^{-10} \cdot R^{-2/3} \cdot \lambda^{-7/3} \quad W \frac{\text{Вт}}{\text{мкм элн}} . \quad /3/$$

Из /2/ и /3/ видно, что ошибка вычисления мощности синхротронного излучения, связанная с неточностью знания энергии и радиуса электронов, во втором случае значительно меньше, чем при измерении вблизи пика спектрального распределения: $\Delta w_1 / w_1 = 7\Delta\gamma / \gamma + 3\Delta R / R$, тогда как $\Delta w_2 / w_2 \sim \Delta R / R$. Это обстоятельство и определяет целесообразность использования для измерения тока электронов в кольце области длин волн $\lambda \gtrsim \lambda_c$.



Мощность излучения одного электрона определяется формулой

$$w = 4,6 \cdot 10^{-16} \cdot \gamma^4 \cdot R^{-2} \text{ Вт.}$$

Если полная мощность излучения W кольца пропорциональна числу N электронов в нем, то измерение ее позволяет определить число электронов $N = W/w$. Полная мощность синхротронного излучения рассчитывается из экспериментальных данных:

$$W = u \cdot \Omega \cdot \int_0^{\infty} w(\lambda) d\lambda / S \cdot \int_0^{\infty} \epsilon(\lambda) \cdot w(\lambda) d\lambda, \quad /4/$$

где u - величина сигнала фотоприемника в вольтах, пропорциональная интенсивности излучения; Ω - геометрический фактор, определяемый геометрией опыта и угловым распределением синхротронного излучения; $\epsilon(\lambda)$ - относительная спектральная чувствительность и S - интегральная чувствительность /величина сигнала в вольтах на единицу падающей мощности/ фотоприемника. При определении интегральной чувствительности фотоприемника использовалось тепловое излучение. Измерения производились в широком спектральном диапазоне, совпадающем в значительной мере со спектром синхротронного излучения электронов. Существенно, что спектральное распределение синхротронного излучения близко к планковскому распределению излучения черного тела. В качестве теплового источника была использована светоизмерительная лампа СИРШ 6-100 с ленточным излучателем из вольфрама. Расчет спектральных характеристик теплового источника производился по данным об излучательной способности вольфрама, опубликованным в ^{5,6}. Для иллюстрации подобия спектров синхротронного и теплового излучений на рис. 1 приведены в относительных единицах спектр синхротронного излучения электронов с энергией 41 МэВ и спектр теплового излучения вольфрама при $T = 2680 \text{ К}$ /в обоих случаях $\lambda_m \approx 1 \text{ мкм}/$. Близкое соответствие спектров теплового и синхротронного излучений позволяет проводить калибровки фотоприемника на стенде с тепловым излучателем с точностью 3%. Аппаратура может обеспечить измерение числа электронов с точностью 5%, определяемой в основном точностью калибровки фотоприемника и точностью измерения энергии и радиуса орбиты электронов.

Аппаратура, созданная для измерения по синхротронному излучению тока электронов кольца в компрессоре коллективного ускорителя ОИЯИ ^{1/}, была проверена на синхротроне ЛИЯФ ^{2/}, позволяющем путем изменения энергии электронов получать спектральные характеристики синхротронного излучения, подобные характеристикам излучения колец компрессора. На рис. 2 приведены рассчитанные спектры синхротронного излучения для трех значений энергии электронов /радиус орбиты равен 30 см/.

Измерение магнитотормозного излучения производилось светочувствительным фотоприемником, состоящим из кремниевого фото-

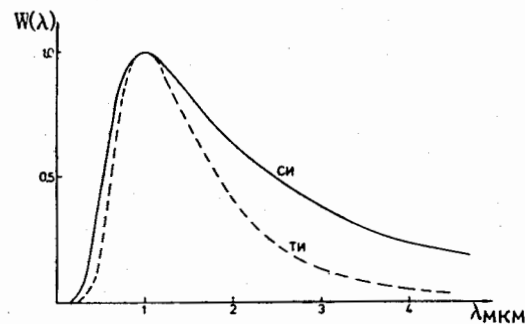


Рис. 1. Спектральные характеристики теплового излучения /ТИ/ и синхротронного излучения /СИ/ для одинаковых λ_m .

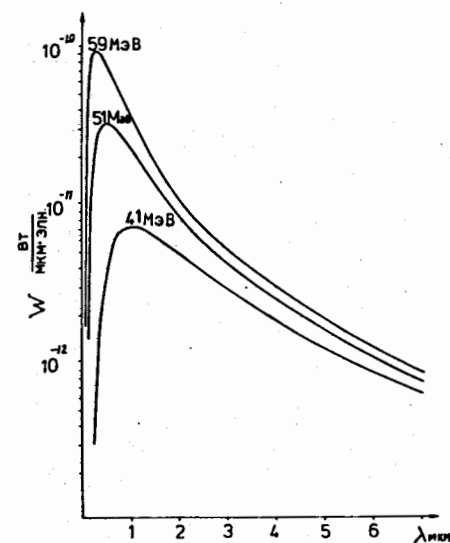


Рис. 2. Спектральные характеристики синхротронного излучения электронов для различных энергий.

диода и усилителя в однокорпусном интегральном исполнении, способным работать в непосредственной близости от электронного кольца синхротрона в условиях высоких электромагнитных помех. Такие фотоприемники в случае регистрации синхротронного излучения имеют ряд преимуществ по сравнению с применявшимися ранее фотоэлектронными умножителями /ФЭУ/. Уступающая ФЭУ в чувствительности, фотоприемник имеет более широкий динамический диапазон и широкополосность спектральной характеристики /0,4-1,1 мкм/. Малые размеры фотоприемника, нечувствительность к внешнему магнитному полю, низковольтный источник питания /10 В/ упрощают проблему компоновки прибора. Спектральная характеристика фотоприемника, измеренная в относительных единицах, представлена на рис. 3.

Результаты измерения углового распределения интенсивности синхротронного излучения для электронов с энергией 59 МэВ относительно орбитальной плоскости ускорителя представлены на рис. 4. Ширина кривой на полувысоте составляет 7 мрад.

Результаты измерения в плоскости орбиты ускорителя величины сигнала фотоприемника, усредненные по многим импульсам ускорителя, вместе с соответствующими зна-

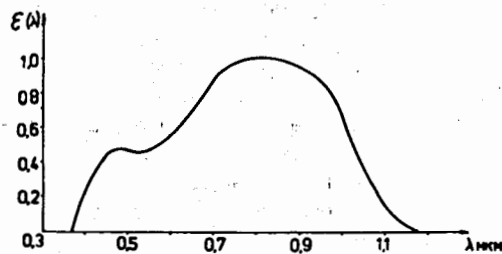


Рис. 3. Спектральная характеристика фотоприемника.

чениями полной мощности синхротронного излучения, рассчитанными по формуле /4/, представлены в таблице. Здесь же приведены вычисленные мощности излучения одного электрона и рассчитанные по данным таблицы средние интенсивности электронов на орбите синхротрона вместе с ошибками измерения.

Кроме измерения тока электронного кольца по синхротронному излучению, число электронов на орбите синхротрона измерялось по

суммарной энергии тормозного излучения электронов, образующегося при прохождении их через медную мишень. Энергия тормозного излучения измерялась квантометром. Равномерность и однократность прохождений электронов через мишень обеспечивалась "забрасывателем" - рассеивателем из алюминия толщиной 0,5 мм, расположенным перед мишенью на азимуте 45° и радиусе, который на 1 мм больше радиуса мишени /R = 280 мм/. Размер рассеивателя по радиусу - 1 мм. Размер медной мишени - радиатора - 3x15x1 мм³. Энергия электронов E=59 МэВ. При этой энергии электронов квантометр "захватывал" 90% интенсивности пучка тормозного излучения, что было определено на основании измерений пространственного распределения тормозного излучения методом наведенной активности. Измеренное по тормозному излучению среднее число электронов в одном импульсе ускорителя оказалось равным $N = 2,6 \pm 0,7 \cdot 10^8$ 1/имп. Основной вклад

Таблица

E МэВ	u мВ	W Вт	w Вт	N 1/имп.
59	1,65	$2,28 \cdot 10^{-2}$	$9,1 \cdot 10^{-11}$	$2,5 \pm 0,5 \cdot 10^8$
51	1	$1,43 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-11}$	$2,8 \pm 0,5 \cdot 10^8$
50	0,9	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$4,7 \cdot 10^{-11}$	$2,9 \pm 0,5 \cdot 10^8$
45	0,65	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-11}$	$4,1 \pm 0,7 \cdot 10^8$
41	0,3	$8,1 \cdot 10^{-3}$	$2,13 \cdot 10^{-11}$	$3,8 \pm 0,7 \cdot 10^8$

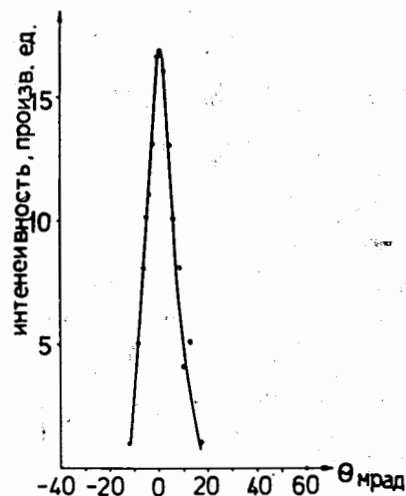


Рис. 4. Измеренное угловое распределение синхротронного излучения.

в ошибку вносят неопределенности, связанные с потерями электронов на забрасывающей мишени /когда часть электронов, рассеявшихся на большой угол, выбывает из процесса ускорения, не попав на мишень-радиатор/, и с некоторой вероятностью более чем однократного прохождения электронов через мишень-радиатор /при однократном прохождении полной толщины мишени-радиатора электрон выбывает из ускорения и не может вторично попасть на мишень, однако возможно в некоторой доле случаев попадание электрона на край мишени меньшей толщины, что приводит к увеличению средней длины пробега электрона в мишени-радиаторе/.

Как видно, результаты независимых измерений числа

электронов на орбите по тормозному излучению и синхротронному излучению совпадают с точностью 25% и, следовательно, абсолютная чувствительность фотоприемника, определенная на стенде с тепловым излучателем, согласуется с вычисленной по данным измерений на синхротроне ЛИЯФ.

Авторы выражают глубокую признательность Н.Н.Чернову за содействие работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белинская Г.И. и др. ОИЯИ, Р9-9281, Дубна, 1975.
2. Волков Ю.М. и др. ЯФ., 1978, 27, №4, с. 868-876.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. "Наука", М., 1960.
4. Годвин Р. УФН, 1970, 101, №3, с. 493.
5. Свет Д.Я. Температурные излучения металлов и некоторых веществ. "Металлургия", М., 1964.
6. Брамсон М.А. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. "Наука", М., 1964.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 марта 1981 года.