

УНИВЕРСАЛЬНАЯ И ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ КРИВЫЕ ИНТЕНСИВНОСТИ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Е.М. Мороз, В.А. Орлов, К.Н. Шорин, А.С. Яров

Вычислен вариант универсальной кривой синхротронного излучения, облегчающий расчет ряда характеристик монохроматических пучков СИ. Соответствующая кривая диагностического пучка синхротрона на 0,6 ГэВ сопоставлена с экспериментом.

Для исследований спектрального распределения интенсивности W синхротронного излучения (СИ) электрона с энергией E , движущегося по участку окружности радиуса R , обычно пользуются зависимостью /1,2/

$$W = \frac{\text{const}}{R^3} \gamma^7 y^3 \int_y^\infty K_{5/3}(\eta) d\eta, \quad (1)$$

где $\gamma = E/E_0$; E_0 — энергия покоя электрона; $y = \lambda_c/\lambda$; λ — исследуемая, а

$$\lambda_c = 4\pi R/3\gamma^3 \quad (2)$$

— характеристическая длины волн излучения; $K_{5/3}$ — функция Макдональда /1/. Функцию переменной y

$$G(y) = y^3 \int_y^\infty K_{5/3}(\eta) d\eta \quad (3)$$

называют универсальной спектральной кривой синхротронного излучения. Она вычислена и приведена, например, в /1/, а в отнормированном к единице в максимуме виде в /3/.

Известны /1,2,4/ асимптотические при $y \rightarrow 0$ значения полной интенсивности (со всей окружности радиуса R и проинтегрированной по вертикальному углу) в единицах мощности:

$$W_{ac} \approx 9 \cdot 10^{-6} R^{-2.3} \lambda^{-7.3} \text{ Вт/}\text{\AA}\cdot\text{электрон,}$$

или в числе фотонов:

$$N_{ac} \approx 5 \cdot 10^9 R^{-2.3} \lambda^{-4.3} \text{ фотон/с}\cdot\text{\AA}\cdot\text{электрон,}$$

где R и λ — соответственно в метрах и ангстремах.

Широко используемые в настоящее время для физических исследований или диагностики пучки СИ, генерируемые в синхротронах или накопителях, как правило, монохроматизированы ($\lambda = \text{const}$) тем или иным способом. В то же время, энергия E электронов в процессе генерации монохроматизированного пучка может изменяться различным образом /1/ и в больших пределах, как, например, в диагностических пучках синхротрона /2/. Расчет характеристик этих пучков СИ требует достаточно точного учета зависимости их интенсивности от энергии электронов. Непосредственно в выражении (1) эта зависимость носит неявный характер, а использование универсальной кривой $G(y)$ в виде (3) не упрощает выполнение соответствующего расчета. В то же время, раскрывая в формуле (1) произведение $\gamma^7 y^3$, легко прийти к представлению зависимости $W(\lambda)$ в виде, более удобном для вычисления характеристик пучков СИ, упомянутых выше. В этом случае аналогичная (1) зависимость с учетом (2) и (3) может быть представлена в виде

$$W \approx 9 \cdot 10^{-6} R^{-2/3} \lambda^{-7/3} G_E \text{ Вт/}\text{\AA} \cdot \text{электрон}, \quad (4)$$

или

$$N \approx 5 \cdot 10^9 R^{-2/3} \lambda^{-4/3} G_E \text{ фотон/}\text{\AA} \cdot \text{с} \cdot \text{электрон}, \quad (5)$$

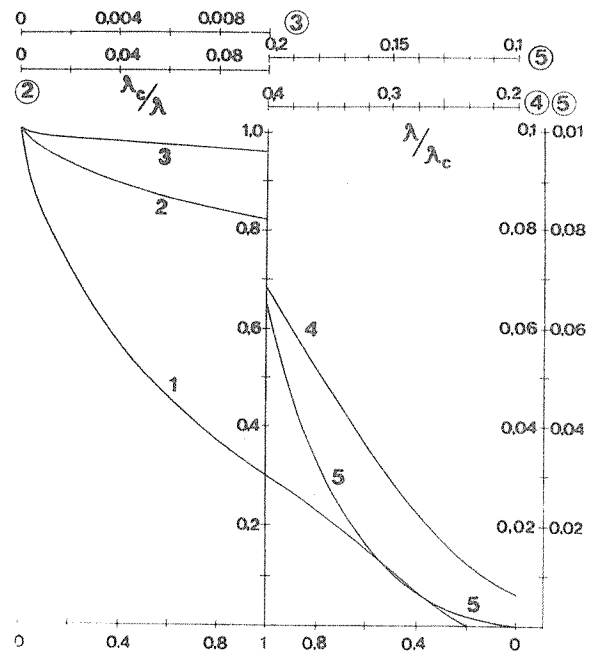
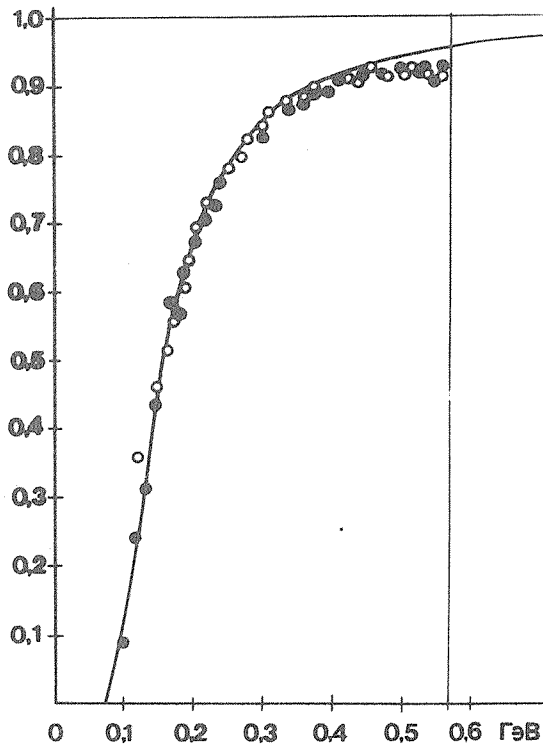
где

$$G_E = y^{2/3} \int_y^\infty K_{5/3}(\eta) d\eta / \lim_{y \rightarrow 0} y^{2/3} \int_y^\infty K_{5/3}(\eta) d\eta$$

— универсальная кривая интенсивности монохроматического синхротронного излучения. При $y \rightarrow 0$

$$G_E \rightarrow 1; \text{ тогда } \lim_{y \rightarrow 0} y^{2/3} \int_y^\infty K_{5/3}(\eta) d\eta = 2^{2/3} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right) = 1,587 \cdot 1,354 = 2,149.$$

Р и с. 1. Универсальная кривая синхротронного излучения для расчета характеристик монохроматизированного пучка.



Р и с. 2. Кривая интенсивности диагностического пучка синхротрона на 0,6 ГэВ: сплошная линия — расчет, точки — эксперимент.

На рис. 1 значения G_E (на вертикальной оси) даны в зависимости от переменных $y = \lambda_c/\lambda$ (слева от оси $y = 1$), или $(1/y) = \lambda/\lambda_c$ (справа от оси $y = 1$), изменяющихся в диапазоне $0 \div 1$, что позволяет компактно и полностью охватить диапазон возможных значений длин волн λ используемого излучения.

Из универсальной кривой G_E с помощью соотношения (2) можно получить нормализованную диагностическую кривую D_E излучения любого синхротрона, описывающую в относительных единицах зависимость интенсивности диагностического пучка от энергии ускоряемых электронов.

Диагностическая кривая D_E синхротрона на 0,6 ГэВ ($R = 2$ м) для середины видимого диапазона СИ ($\lambda = 5500 \text{ \AA}$) приведена на рис. 2. С помощью соотношений (4), (5) и кривой D_E легко перейти к абсолютным значениям интенсивности СИ в диагностическом пучке. Для синхротрона на 0,6 ГэВ при $\lambda = 5500 \text{ \AA}$ и $\Delta\lambda = 1 \text{ \AA}$ W_D в горизонтальном угле 1 мрад составляет в единицах мощности:

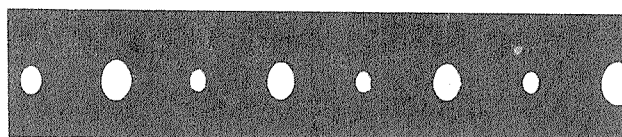
$$W_D \approx 1,68 \cdot 10^{-18} N_e D_E \text{ Вт/\AA} \cdot \text{мрад},$$

или в числе фотонов:

$$N_D \approx 5,1 N_e D_E \text{ фотон/\AA} \cdot \text{с} \cdot \text{мрад},$$

где N_e — число электронов в ускоряемом сгустке. Кривые D_E для всего видимого диапазона ($4000 \div 8000 \text{ \AA}$) близки к кривой рис. 2.

Точками на кривой рис. 2 нанесены результаты эксперимента в синхротроне на $\sim 0,6$ ГэВ, где интенсивность диагностического пучка была получена путем интегрирования распределения СИ по поперечному сечению сгустка электронов, зарегистрированного скоростной киносъемкой. Киносъемка производилась при двух чередующихся от кадра к кадру значениях коэффициента ослабления, что наглядно иллюстрирует фрагмент соответствующей кинограммы на рис. 3. Черные точки на рис. 2 получены при ослаблении в семь раз интенсивности выводимого пучка, светлые — практически без ослабления. Ограничение экспериментальных точек энергией 570 МэВ — следствие специфики режима работы синхротрона в опыте.



Р и с. 3. Фрагмент кинограммы сечения сгустка электронов при съемке с чередующейся величиной ослабления яркости диагностического пучка СИ и вертикальной протяжкой киноплёнки.

В области энергий $400 \div 570$ МэВ экспериментальные точки оказываются несколько ниже расчетной кривой, что объясняется небольшими потерями интенсивности ускоренного сгустка в конце цикла ускорения, а также эффектами частичного насыщения магнита синхротрона в области формирования диагностического пучка.

Авторы благодарны П.А. Кирейко и Г.В. Демьянову за помощь в работе и обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Синхротронное излучение в исследовании твердых тел. Под ред. Соколова А.А. М., Мир, 1980, с.15.
2. Куликов О. Ф. Труды ФИАН, 80, 3 (1975).
3. Артемьева З. Л., Мороз Е. М., Шорин К. Н. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 7 36 (1980).
4. Якименко М. Н. УФН, 114, 55 (1974).

Поступила в редакцию 8 января 1986 г.