

# РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО НЕПРЕРЫВНОМУ ИЗМЕРЕНИЮ АБСОЛЮТНОГО ЗНАЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПУЧКОВ И ЕЕ СТАБИЛЬНОСТИ В ЭЛЕКТРОННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ И НАКОПИТЕЛЯХ

И.П.Карабеков, С.С.Овакимян, А.В.Гуксян  
Ереванский физический институт

Измерение абсолютного значения энергии частиц в ускорителях электронов имеет ряд принципиально важных приложений. Это, во-первых, прецизионное мониторинговое измерение энергии и её стабильности в экспериментах по электроррождению и  $e\bar{e}$ -рассеянию на внутреннем пучке электронов. Во-вторых, момент достижения электронами заданной энергии может быть использован для запуска устройств, осуществляющих плоскую вершину магнитного поля и тем самым стабилизацию энергии выведенных электронных пучков и края спектра тормозных гамма-пучков.

Для  $e^+e^-$  накопителей особенно важно контролируемое изменение энергии пучков  $\Delta E$  с высокой точностью, для изучения резонансных процессов – рождения частиц при аннигиляциях.

Метод измерения абсолютного значения энергии пучков и её временной стабильности, представленной в настоящей работе, заключается в следующем.

На рис. I показана экспериментально измеренная кривая интенсивности отражения от кристалла-монокроматора Si (III) пучка синхротронного излучения (СИ) в рентгеновом диапазоне длин волн, измеренная с помощью ионизационной камеры. Интегральный коэффициент отражения  $\bar{R}(\lambda)$  использованного кристалла в рабочем

интервале длин волн и ширина дифракционного максимума  $\varepsilon$  были измерены непосредственно на пучке СИ с использованием  $(n+n)$  и  $(n-n)$  двухкристалльных спектрометров <sup>/1/</sup>. Также были экспериментально измерены значения коэффициентов поглощения в воздухе  $\mu_g(\lambda)$  для выбранных длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . На рис.1 по оси абсцисс отмечены две точки  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , для которых показания ионизационных камер  $I_{ик_1}(\theta_1)$  и  $I_{ик_2}(\theta_2)$  на восходящей и нисходящей ветвях спектральной кривой отражения, соответственно, равны между собой. Однако согласно теории магнито-тормозного излучения это равенство будет наблизаться только при определенном значении максимальной центральной энергии электронов  $E_{m_0}$  в пучке. Как известно <sup>/2/</sup>, поток энергии, переносимой фотонами заданной длины волн  $\lambda$  в интервале длин волн  $\Delta\lambda$ , определяется выражением

$$P(\lambda; E_m) = \frac{3^{3/2}}{8\pi^3} \frac{e^2 c}{\rho^3} \left( \frac{E_{m_0}}{m_0 c^2} \right)^7 \chi^4 L(\chi), \quad (1)$$

где

$$\chi = \frac{\lambda_m}{\lambda}; \quad (2)$$

$$\lambda_m = \frac{4\pi\rho}{3} \left( \frac{m_0 c^2}{E_{m_0}} \right)^3; \quad (3)$$

$\rho$  - радиус закругления траектории ускоряемых электронов в магнитном поле ускорителя;  $c$  - скорость света;  $\chi^4 L(\chi)$  - спектральная функция, табулированная в <sup>/2/</sup>.

Возникающая разность в интенсивностях спектральных составляющих обязана только смещению центральной энергии электронов  $E_{m_0}$  на орбите ускорителя или накопителя. Экспериментальная установка, позволяющая измерить значение  $E_{m_0}$  и  $\Delta E_{m_0}$ , показана на рис.2. Пучок синхротронного излучения выводился из вакуумного пучкопровода длиной  $L = 25$  м через бериллиевое окно толщиной 0,2 мм и с помощью двух одинаковых коллиматоров расщеплялся на два луча. Один из лучей направлялся на монохроматор  $M_1$ , установленный под углом  $\theta_1$ , выделяющий длину волн  $\lambda_1$  (рис.1). С помощью гониометра ГУР-5 второй монохроматор  $M_2$  устанавливается под углом  $\theta_2$  для выделения пучка фотонов с длиной волн

$\lambda_2$ . Отраженные пучки детектируются пролетными ионизационными камерами ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub>, конструктивно выполненными как в <sup>/3/</sup>. Длина собирающих электродов камер  $\ell = 50$  см. К ионизационным камерам прикладываются одинаковые напряжения противоположных знаков, а собирающие электроды их соединены вместе и подключены к входу электрометрического усилителя, позволяющего измерить токи порядка  $10^{-14}$  А и заряд  $\sim 10^{-12}$  Кл. Монохроматоры М<sub>1</sub> и М<sub>2</sub> были изготовлены из единого среза кристалла Si (III) и имели идентичные кристаллографические параметры. Перед началом измерения оба монохроматора М<sub>1</sub> и М<sub>2</sub> были установлены под углом  $\theta_1 = 9^\circ 30'$ , и при этом ионизационные камеры во входной цепи электрометров создали одинаковые по величине токи, равные  $1,5 \cdot 10^{-10}$  А на 1 мА циркулирующего тока в ускорителе. Значение ускоряемого тока измерялось с помощью датчика абсолютного числа частиц <sup>/4/</sup>. Разность токов ионизационных камер после соединения их собирающих электродов вместе была установлена  $\sim 10^{-13}$  А. Далее с помощью гониометра ГУР-5 второй кристалл М<sub>2</sub> был установлен под углом  $\theta_2 = 21^\circ 13' 12''$ , а детектор ИК<sub>2</sub> соответственно под углом  $\sim 42^\circ$ , при котором разность токов вновь была зафиксирована  $\sim 10^{-13}$  А. Смещение  $E_{m_0}$  производилось путем изменения тока подмагничивания электромагнита ускорителя. Результаты измерения разности токов ионизационных камер  $\Delta I_{ик}$  в зависимости от изменения  $E_{m_0}$ , приведенные к 1 мА ускоряемого тока электронов, показаны на рис.3 крестиками. Результаты расчета представлены сплошной линией. Расчет токов камер и соответственно их разности  $\Delta I_{ик}$  проводился с использованием (1) следующим образом:

$$I_{ик_i} = c \bar{R}_i(\lambda_i) \lambda_i c \operatorname{tg} \theta_i P[\lambda_i; (E_{m_0} \pm \Delta E_{m_0})]^* \\ * e^{-\mu_{вe}(\lambda_i) X_{вe}} \cdot e^{-\mu_b(\lambda_i) X_b} \cdot (1 - e^{-\mu_b(\lambda_i) \ell}), \quad (4) \\ (i=1,2)$$

$$c = \frac{6,24 \cdot 10^{14} n_e h e.}{2\pi z w} \quad (5)$$

В этих выражениях

$n_e$  — число частиц на орбите ускорителя;

$w$  — энергия образования одной пары ионов в воздухе;

$h$  — горизонтальный размер коллимирующей щели;

$e$  — заряд электрона;

$X_e$  — расстояния от бериллиевого окна до ИК<sub>1</sub> и ИК<sub>2</sub> по ходу пучков  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ;

$X_{be}$  — толщина бериллиевого окна;

$$\bar{R}_1(\lambda) = 6,4 \cdot 10^{-5}; \quad \bar{R}_2(\lambda_2) = 8,96 \cdot 10^{-5}; \quad \lambda_1 = 1,0347 \text{ \AA};$$

$$\lambda_2 = 2,2705 \text{ \AA}; \quad \mu_1(\lambda_1) = 4,86 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}; \quad \mu_1(\lambda_2) = 24,34 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1};$$

$$\mu_{be}(\lambda) = 0,6509 \text{ см}^{-1}; \quad \mu_{be}(\lambda_2) = 6,139 \text{ см}^{-1}.$$

Для выбранных значений  $\theta_1$  и  $\theta_2$  и чувствительности использованных детекторов для выбранных длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  получена крутизна характеристики преобразования, равная  $S = 6,1 \cdot 10^{-13} \text{ А/МэВ}$ .

Измерения проводились при медленном выводе электронов на гамма-мишень ускорителя. Максимальная энергия ускорителя согласно установленным значениям токов электромагнита была равна 4,5 ГэВ. Однако полученная разность  $\Delta I_{ик} \approx 0$  согласно проведенным расчетам соответствует 4,3 ГэВ, что, очевидно, является следствием искажения расчетного спектра СИ из-за вывода частиц. Действительно, при выводе электронов эффективно ослабляется коротковолновая часть спектра, что и приводит к уменьшению эффективного значения  $E_{m_0}$ .

#### Литература

1. З. Г. Пинскер. Динамическое рассеяние рентгеновских лучей в идеальных кристаллах, М., "Наука", 1974.
2. D. N. Tombouljan, D. E. Bedo. Journ. Appl. Phys., 29, 804 (1958).
3. А. И. Алиханян и др. ПТЭ, № 3, 39 (1974).
4. И. П. Карабеков и др. Научное сообщение, ВФИ-23 (73), Ереван, 1973.

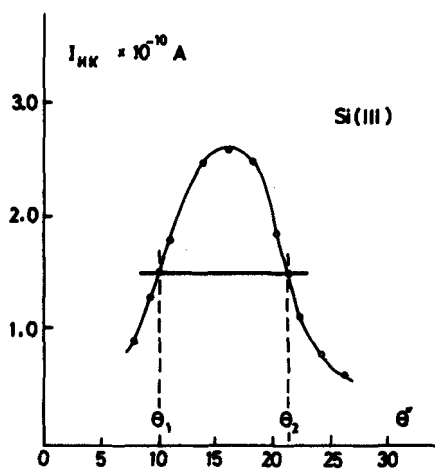


Рис. 1.

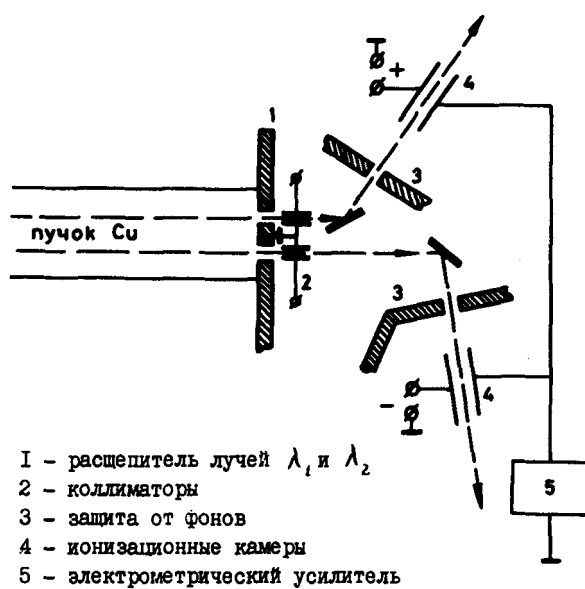


Рис. 2.

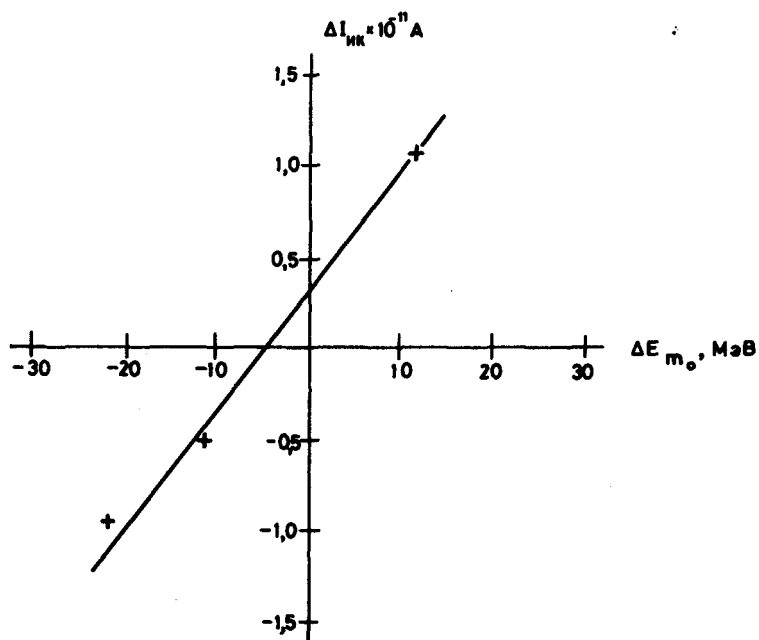


Рис. 3.

## Д И С К У С С И Я

Е.А.Переведенцев: Какова относительная точность измерения энергии?

И.П.Карабеков: Относительная точность составляет 0,1%. Абсолютная точность определяется точностью, с которой известны кристаллографические параметры.

Е.А.Переведенцев: Из чего изготовлены выходные окна и где они расположены?

И.П.Карабеков: Установка расположена на расстоянии 25 м от точки излучения. Синхротронное излучение выводится через фольги толщиной 0,2 мм, изготовленные из бериллия.

Ю.А.Башмаков: Какова точность установки кристалла в гониометре?

И.П.Карабеков: Точность установки кристалла составляет 18".

Е.А.Переведенцев: В ИЯФ СО АН разработан и успешно применяется метод оперативного измерения абсолютной энергии электронов с использованием спектральных особенностей синхротронного излучения (СИ) (В.Н.Корчуганов, Г.Н.Кулипанов и др. Препринт ИЯФ 77-9, Новосибирск, 1977). Идея этого прецизионного метода основана на резкой зависимости интенсивности СИ  $I_\lambda$  от энергии  $E$  при  $\lambda \ll \lambda_c$

$$I_\lambda \sim H^{1/2} E^{-1} \lambda^{-5/2} \exp [-c/(E^2 H \lambda)] \Delta \lambda, \quad (1)$$

где  $H$  — магнитное поле в точке излучения;  $\lambda$  — регистрируемая длина волны;  $\Delta \lambda$  — диапазон длин волн;  $c$  — известная постоянная;  $\lambda_c$  — критическая длина волны.

Допуская, что  $E \sim H$ , получаем из (1)

$$E \approx \left[ \frac{3c}{\lambda H^2} / \left( \frac{1}{I_\lambda} \frac{dI_\lambda}{dH} \right) \right]^{1/2}. \quad (2)$$

Таким образом, измеряя  $I_\lambda$  при  $\lambda = \text{const}$  и нескольких значениях  $H$ , можно определить  $dI_\lambda/dH$  и, следовательно,  $E$ .

В установке, используемой на накопителе ВЭПП-3, магнитное поле измеряется миниатюрным датчиком ЯМР, расположенным в апертуре магнита в точке излучения. Коллимированный пучок СИ монохроматизируется кристаллом Si (1,1,1) на гониометрической головке с приводом от шагового двигателя (1 шаг соответствует 2"), управляемого от ЭВМ. Настройка нужной длины волны производится автоматически: в пучок СИ вводится медная шторка толщиной 150 мкм. Затем шторка убирается, и производится измерение при нескольких  $H$  с автоматической

подстройкой частоты ЯМР и вводом данных в ЭВМ в режиме on-line. Использование в качестве регистратора  $I_{\lambda}$  ионизационной камеры и специальная обработка данных с помощью ЭВМ позволили достичь точности  $\Delta E/E \leq 5 \cdot 10^{-4}$  (сравнение с резонансной деполяризацией). Воспроизводимость измеренной энергии ВЭПП-3 при повторении режимов накопителя с помощью управляющей ЭВМ не хуже  $\pm 2,5 \cdot 10^{-4}$ .

Л.Б.Дуганский: Какова величина девиации магнитного поля в Вашем методе измерения энергии по синхротронному излучению?

Е.А.Переведенцев: Величина шага  $\Delta H/H$  составляет  $\sim 0,01$ . Обычно делается несколько циклов измерений вблизи интересующей нас точки для стабилизации нужного частного цикла намагничивания.