

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. Гукасян

Ереванский физический институт

Измерение абсолютного значения энергии частиц в ускорителях электронов имеет ряд принципиально важных приложений. Это, во-первых, прецизионное мониторирование энергии и её стабильности в экспериментах по электророждению и 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 ΔE 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-монохроматора Si (III) пучка синхротронного излучения (СИ) в рентгеновском 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 ξ были измерены непосредственно на пучке СИ с использованием $(n+n)$ и $(n-n)$ двухкристальных спектрометров ^{1/1}. Также были экспериментально измерены значения коэффициентов поглощения в воздухе $\mu_g(\lambda)$ для выбранных длин волн λ_1 и λ_2 . На рис. I по оси абсцисс отмечены две точки θ_1 и θ_2 , для которых показания ионизационных камер $I_{nk_1}(\theta_1)$ и $I_{nk_2}(\theta_2)$ на восходящей и нисходящей ветвях спектральной кривой отражения, соответственно, равны между собой. Однако согласно теории магнито-тормозного излучения это равенство будет наблюдаться только при определенном значении максимальной центральной энергии электронов E_{m_0} в пучке. Как известно ^{2/1}, поток энергии, переносимой фотонами заданной длины волны λ в интервале длин волн $\Delta\lambda$, определяется выражением

$$P(\lambda; E_m) = \frac{3^{5/2}}{8\pi^3} \frac{e^2 c}{\rho^5} \left(\frac{E_{m_0}}{m_0 c^2} \right)^7 X^4 L(X), \quad (1)$$

где

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

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

ρ - радиус закругления траектории ускоряемых электронов в магнитном поле ускорителя; c - скорость света; $X^4 L(X)$ - спектральная функция, табулированная в ^{1/2}.

Возникшая разность в интенсивностях спектральных составляющих связана только смещением центральной энергии электронов E_{m_0} на орбите ускорителя или накопителя. Экспериментальная установка, позволяющая измерить значение E_{m_0} и ΔE_{m_0} , показана на рис. 2. Пучок синхротронного излучения выводился из вакуумного пучководца длиной $Z = 25$ 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 θ_1 , выделяющий длину волны λ , (рис. I). С помощью гониометра ГУР-5 второй монохроматор M_2 устанавливается под углом θ_2 для выделения пучка фотонов с длиной волны

λ_2 . Отраженные пучки детектируются пролетными ионизационными камерами ИК₁ и ИК₂, конструктивно выполненными как в /3/. 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. Монокроматоры М₁ и М₂ были изготовлены из единого среза кристалла Si (III) и имели идентичные кристаллографические параметры. Перед началом измерения оба монокроматора М₁ и М₂ были установлены под углом $\theta_1 = 90^\circ 30'$, 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 /4/. Разность токов ионизационных камер после соединения их собирающих электродов вместе была установлена $\sim 10^{-13}$ А. Далее с помощью гониометра ГУР-5 второй кристалл М₂ был установлен под углом $\theta_2 = 21^\circ 13' 12''$, а детектор ИК₂ 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 $\Delta I_{\text{ИК}}$ 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 $\Delta I_{\text{ИК}}$ проводился с использованием (1) следующим образом:

$$I_{\text{ИК}_i} = C \bar{R}_i(\lambda_i) \lambda_i C \operatorname{tg} \theta_i P [\lambda_i; (E_{m_0} \pm \Delta E_{m_0})] \cdot \\ \cdot e^{-\mu_{\text{Be}}(\lambda_i) X_{\text{Be}}} \cdot e^{-\mu_b(\lambda_i) X_b} \cdot (1 - e^{-\mu_b(\lambda_i) \ell}), \quad (4)$$

(i = 1, 2)

$$C = \frac{6,24 \cdot 10^{11} n_e h e}{2 \pi z w} \quad (5)$$

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 ИК₁ и ИК₂ по ходу пучков λ_1 и λ_2 ;

X_{Be} - толщина бериллиевого окна;

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

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

$$\mu_{be}(\lambda_1) = 0,6509 \text{ см}^{-1}; \quad \mu_{be}(\lambda_2) = 6,139 \text{ см}^{-1}.$$

Для выбранных значений θ_1 и θ_2 и чувствительности использованных детекторов для выбранных длин волн λ_1 и λ_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 $\Delta I_{\text{ИК}} \approx 0$ согласно проведенным расчетам соответствует 4,3 ГэВ, что, очевидно, является следствием искахания 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. H. Tomboulian, D. E. Bedo. Journ. Appl. Phys., 29, 804 (1958).
3. А. И. Алиханян и др. ПГЭ, № 3, 39 (1974).
4. И. П. Карабеков и др. Научное сообщение, ЕРИ-23 (73), Ереван, 1973.

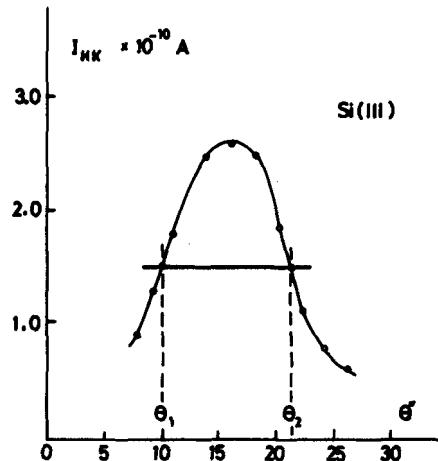


Рис.1.

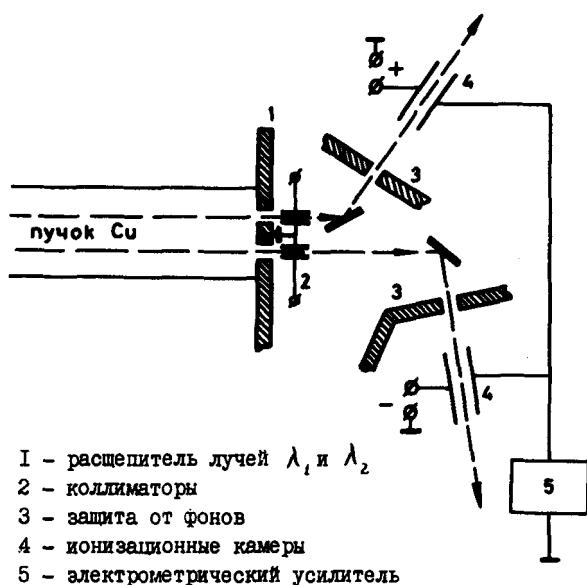


Рис.2.

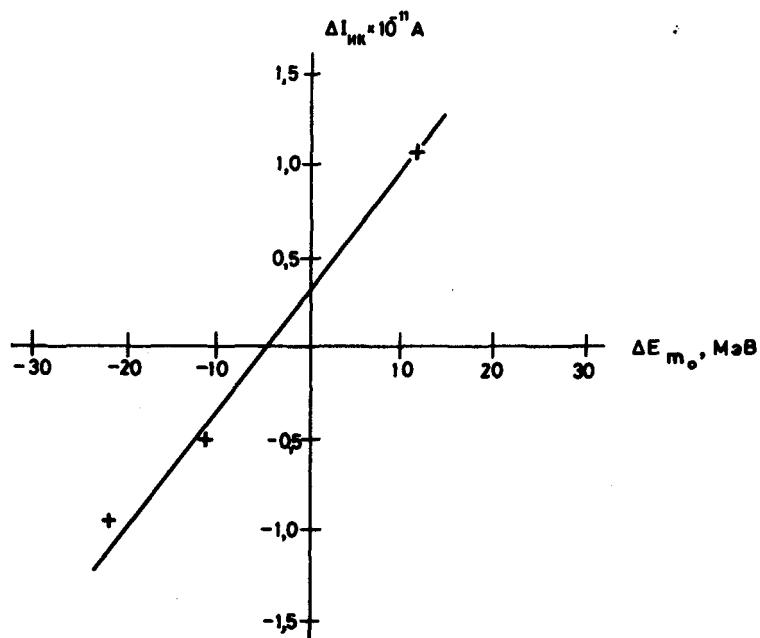


Рис.3.

ДИСКУССИЯ

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_λ 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; λ – регистрируемая длина волны; $\Delta \lambda$ – диапазон длин волн; c – известная постоянная; λ_c – критическая длина волны.

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

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

Таким образом, измеряя I_λ при $\lambda = \text{const}$ и нескольких значениях H , можно определить dI_λ/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_λ 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 ВЭШ-3 при повторении режимов накопителя с помощью управляющей ЭВМ не хуже $\pm 2,5 \cdot 10^{-4}$.

Л.Б.Луганский: 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.