

07;10;12

©1994

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ЭМИТТАНСОВ ПУЧКА В НАКОПИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ С ПОМОЩЬЮ КРАЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

О.В. Чубарь

В современных накопителях электронов на краях поворотных магнитов и в элементах электронной оптики формируется интенсивное электромагнитное излучение [1-6]. Ниже для краткости оно называется краевым излучением (КИ). До настоящего времени КИ в ускорителях электронов, как правило, не находило серьезных практических применений. Между тем это излучение весьма привлекательно как для диагностики пучка, так и для пользовательских экспериментов с излучением [5,6]. Монохроматическое КИ весьма чувствительно к угловым расходимостям и поперечным размерам электронного пучка. Это позволяет по измеряемому распределению интенсивности КИ путем численной обработки экспериментальных данных определять горизонтальные и вертикальные угловые расходимости, поперечные размеры и эффективные эмиттансы пучка (т.е. интегральные по времени измерения, нормированные проекции полного фазового объема пучка на горизонтальную и вертикальную фазовые плоскости). Численная обработка представляет собой применение метода наименьших квадратов (МНК) к измеренному и расчетному распределениям интенсивности КИ с целью определения параметров пучка.

Расчет распределения интенсивности КИ пучка с ненулевым эмиттансом

Исходя из преобразования Фурье запаздывающего потенциала, для интенсивности монохроматического (с длиной волны λ) некогерентного излучения всего электронного пучка можно получить [7]:

$$I(\mathbf{r}^*, \Sigma, \gamma) = \text{const} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{G(s, \tilde{s}, \mathbf{r}^*, \Sigma, \gamma)}{(y^* - \tilde{s})(y^* - s)} ds d\tilde{s}; \quad (1)$$

$$G(s, \tilde{s}, \mathbf{r}^*, \Sigma, \gamma) = \int (\beta_{\perp} - \mathbf{n}_{\perp}) \cdot (\tilde{\beta}_{\perp} - \tilde{\mathbf{n}}_{\perp}) \times$$

$$\times \exp \left[i \left(\Phi - \tilde{\Phi} \right) \right] \cdot F \cdot dx_0 dx'_0 dz_0 dz'_0; \quad (2)$$

$$\Phi = \frac{\pi}{\lambda} \left[s\gamma^{-2} + \int_0^s (x'^2 + z'^2) d\hat{s} + \frac{(x^* - x)^2 + (z^* - z)^2}{y^* - s} \right], \quad (3)$$

где $\mathbf{r}^* = \mathbf{r}^*(x^*, y^*, z^*)$ — радиус-вектор точки наблюдения (находящейся в волновой зоне). Начало координат расположено в середине прямолинейного промежутка, координатная ось Y совпадает с его геометрической осью; x и z — горизонтальная и вертикальная оси; s — длина равновесной траектории; $\mathbf{r} = \mathbf{r}(x, y, z)$ — радиус-вектор мгновенного положения частицы, $\mathbf{n} = (\mathbf{r}^* - \mathbf{r})/|\mathbf{r}^* - \mathbf{r}|$, β — относительная скорость ($\mathbf{n}_\perp, \beta_\perp$ — поперечные составляющие). $F = F(x_0, x'_0, z_0, z'_0, \Sigma)$ — распределение плотности частиц в фазовом пространстве поперечных начальных координат и углов траекторий, определяемое совокупностью параметров Σ . В соотношениях (2), (3) предполагается, что $\gamma \gg 1$, $|\beta_x| \approx |x'| \ll 1$, $|\beta_z| \approx |z'| \ll 1$, $|n_x| \ll 1$, $|n_z| \ll 1$. $\beta_\perp, \mathbf{n}_\perp, \Phi$ в (2) зависят от переменной интегрирования S , в то время как $\tilde{\beta}_\perp, \tilde{\mathbf{n}}_\perp, \tilde{\Phi}$ — от \tilde{s} . В приближении линейной динамики частиц пучка и Гауссовой формы распределения $F(x_0, x'_0, z_0, z'_0, \Sigma)$ 4-кратное интегрирование в (2) можно проделать аналитически, оставив только 2-кратный интеграл (1) для расчетов на ЭВМ.

Данная методика расчета применима для нахождения с помощью МК совокупности параметров пучка Σ по измеряемому распределению интенсивности КИ.

Измерения

Измерения распределения интенсивности КИ были проведены на накопителе электронов с энергией 450 МэВ Сибирь-1 (КИСИ, РИЦ "Курчатовский институт"). Схема измерений показана на рис. 1. В качестве детектора использовалась цифровая ПЗС камера [8]. Поскольку область распределения интенсивности КИ, представлявшая интерес для диагностики пучка, превышала фоточувствительную область ПЗС матрицы, с камерой был использован объектив. Для обеспечения монохроматичности применялся интерференционный фильтр ($\langle \lambda \rangle = 648$, $\Delta\lambda_{1/2} = 4$ нм).

Если в прямолинейном промежутке, где формируется наблюдаемое КИ, нет квадрупольных линз, а основная магнитная система симметрична относительно вертикальной плоскости, проходящей через центр этого промежутка, то распределение интенсивности КИ эффективно зависит лишь

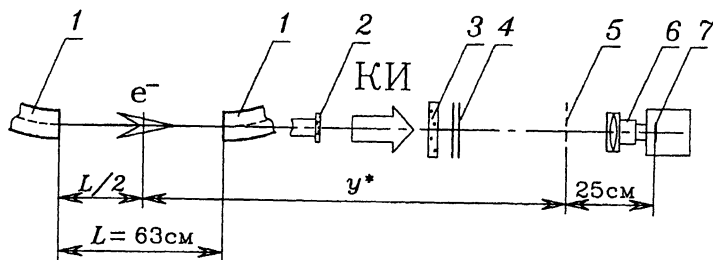


Рис. 1. Схема измерения распределения интенсивности краевого излучения.

1 — поворотные магниты, 2 — выводящее окно, 3 — блок нейтральных фильтров, 4 — интерференционный монохроматический фильтр, 5 — предметная плоскость, 6 — объектив, “переносящий” изображение с предметной плоскости на чувствительную поверхность ПЗС матрицы; 7 — ПЗС матрица.

от композиций $\sigma_{x,z \text{ eff}} = [\sigma_{x,z}^2 + (\sigma_{x,z}/y^*)^2]^{1/2}$, где $\sigma_{x,z}$, $\sigma'_{x,z}$ — горизонтальные и вертикальные среднеквадратичные угловые расходимости и поперечные размеры пучка. Данная ситуация имела место в нашем случае. Поэтому для разделения вкладов $\sigma_{x,z}$ и $\sigma'_{x,z}$ следовало бы провести два измерения распределения интенсивности КИ — при различных Y^* (что пока не было сделано, поскольку описываемые измерения проводились при пуско-наладочных работах на накопителе Сибирь-1 и пучкового времени было мало). Но даже пользуясь результатами лишь одного измерения, можно получить оценки сверху для эффективных эмиттансов пучка. Искомые оценки равны $(\sigma_{x,z} \sigma'_{x,z})_{\text{max}} = y^* \sigma_{x,z \text{ eff}}^2 / 2$.

В расчетах, проделанных для определения $\sigma_{x \text{ eff}}$ и $\sigma_{z \text{ eff}}$ по (1)–(3) и МНК, были использованы результаты измерений полей поворотных магнитов и корректирующего магнита, находившегося в прямолинейном промежутке (измерения проводились сотрудниками Института ядерной физики СО РАН, Новосибирск, при изготовлении элементов магнитной системы накопителя Сибирь-1).

Как оказалось, поле корректирующего магнита существенно влияет на распределение интенсивности излучения, но это не сказывается на возможности определения эффективных эмиттансов пучка электронов. На рис. 2 показаны результаты поиска наиболее подходящих параметров $\sigma_{x \text{ eff}}$ и $\sigma_{z \text{ eff}}$ по МНК.

Найденные оценки сверху для эффективных эмиттансов пучка в накопителе Сибирь-1 при $E = 450$ МэВ составляют: $(\sigma_x \sigma_x)_{\text{max}} \approx 1.1$, $(\sigma_z \sigma_z)_{\text{max}} \approx 3.1 \cdot 10^{-2}$ мкм·рад, что согласуется с данными по параметрам накопителя, опубликованными в [9]: $\sigma_x \sigma'_x = 1.05$, $\sigma_z \sigma'_z = 1.04 \cdot 10^{-2}$ мкм рад.

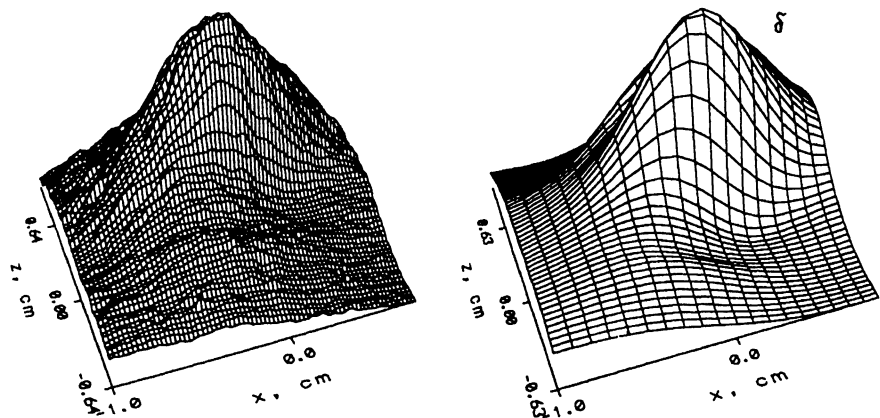
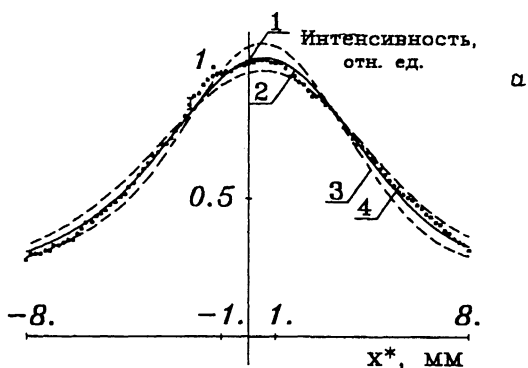


Рис. 2. Распределение интенсивности КИ в предметной плоскости ($y^* = 275 \cdot 5$ см).

а — распределение вдоль линии пересечения с горизонтальной плоскостью ($z^* = 2$ мм): 1 — экспериментальные точки, 2 — найденная по МНК кривая, соответствующая $\sigma'_{x\text{eff}} = (\sigma'_{x\text{eff}})_{\text{fit}} = 0.88$ мрад; 3 — $\sigma'_{x\text{eff}} = 0.8 \cdot (\sigma'_{x\text{eff}})_{\text{fit}}$; 4 — $\sigma'_{x\text{eff}} = 1.2 \cdot (\sigma'_{x\text{eff}})_{\text{fit}}$; б — трехмерное представление: слева — экспериментальные данные, справа — результат расчетов, соответствующий найденным по МНК параметрам $\sigma'_{x\text{eff}}$ и $\sigma'_{z\text{eff}}$.

Заключение

Отличительной чертой метода является экспериментальная простота. Для определения эффективных эмиттансов пучка в накопителях электронов нет необходимости использовать специальные вставные устройства. В большинстве случаев излучение видимого диапазона, генерируемое на краях поворотных магнитов и в элементах элек-

тронной оптики, несет всю необходимую информацию. С помощью данного метода возможен непрерывный невозмущающий контроль параметров пучка.

Автор искренне благодарен Н.В.Смолякову, С.Д.Фанченко (КИСИ, РИЦ "Курчатовский институт") и Э.С.Масунову (МИФИ) за очень полезные замечания по материалу статьи, В.Н.Корчуганову и Е.Б.Левичеву (ИЯФ СО РАН) — за предоставленные измерения магнитного поля элементов накопителя Сибирь-1, И.М.Нагорных, Д.Г.Одинцову и Б.Верховых(КИСИ) — за помощь в экспериментальной работе.

Список литературы

- [1] Никитин М.М., Медведев А.Ф., Мусеев М.Б., Эпп В.Я. // ЖЭТФ. 1980. Т. 79. В. 3(9). С. 763-774.
- [2] Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А. // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 34. В. 1. С. 15-19.
- [3] Серов А.В. // Кратк. сообщ. по физике. 1989. В. 10. С. 36-39.
- [4] Bashmakov Yu.A. // Rev. Sci. Instrum. 1992. V. 63. N 1. P. 343-346.
- [5] Chubar O.V., Smolyakov N.V. // J. Optics (Paris). 1993. V. 24. N 3. P. 117-121.
- [6] Chubar O.V., Smolyakov N.V. // Program of the 1993 Particle Accelerator Conference. Bulletin of The American Physical Society. 1993. V. 38. N 4. Mb63. P. 1332. To appear in the proceedings.
- [7] Chubar O.V., Masunov E.S. // Program of the 1993 Particle Accelerator Conference. Bulletin of The American Physical Society. 1993. V. 38. N 4. Da147. P. 1220. To appear in the proceedings.
- [8] Дик П.А., Краснюк А.А., Стенин В.Я. // Электронная промышленность. 1988. № 4. С. 85-89.
- [9] Artemyev A.N. et al. // Nucl. Instr. and Meth. 1987. A261. P. 18-24.

Курчатовский институт
Москва

Поступило в Редакцию
20 января 1994 г.