

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

Физический
ИНСТИТУТ



имени
П.Н. Лебедева

Российской академии наук

Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

6

Н. Ю. КИРИКОВА, В. А. КОНДРАТЮК,
В. Н. МАХОВ, В. А. МУРАШОВА, А. А. СНЕСАРЕВ,
М. Н. СПЕРАНСКИЙ, В. В. СУЛИН

**СТАТУС УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ С-60
ФИАН КАК МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА
СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МЯГКОЙ
РЕНТГЕНОВСКОЙ И ВУФ ОБЛАСТИ СПЕКТРА**

Москва 2014

Ускоритель электронов С-60 ФИАН

На Московской площадке ФИАН, в Лаборатории электронов высоких энергий (ЛЭВЭ) на протяжении многих лет действует циклический электронный ускоритель (синхротрон) С-60 [1]. Основные параметры ускорителя:

- энергия электронов 630 МэВ;
- индукция магнитного поля при энергии 630 МэВ 1,05 Тл;
- радиус электронной орбиты 2 м;
- усредненное число электронов на орбите 3×10^{10} (ток 100 мА).

Со 2-ой половины 70-х годов ускоритель С-60 после серьезной реконструкции работает как источник синхротронного излучения (СИ) [2]. На Рис. 1 показаны расчетные кривые спектральной плотности потока СИ на единичный интервал длин волн при различных энергиях электронов. Характеристики СИ С-60 рассчитывались с помощью программы ХОР 2.3 [3]. Видно, что при энергии 630 МэВ спектр СИ С-60 перекрывает диапазон вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) и мягкого рентгеновского (МР) излучения, и максимум спектра расположен в районе 1 кэВ.

На Рис. 2 показаны расчетные вертикальные угловые распределения СИ для различных энергий фотонов, из которых видно, что характерная величина угловой расходимости СИ составляет 1 мрад. Ускоритель работает в так называемом квази-накопительном режиме: циклы ускорения следуют с интервалом 5,3 сек, в каждом цикле ускорения имеется плато магнитного поля (и, соответственно, энергии электронов) длительностью 0,6 с (Рис. 3), в течение которого имеется стабильный пучок СИ.

Поскольку частота высокочастотного ускоряющего напряжения, которая составляет 20,45 МГц, равна частоте обращения электронов по орбите, имеется только один сгусток электронов, и импульсы СИ следуют с периодом 49 нс при длительности импульса 7 нс.

Особенностями синхротрона С-60 являются также мягкая фокусировка и большая апертура вакуумной камеры (близкое к эллиптическому внутреннее сечение камеры с размерами по горизонтали и вертикали 300 × 90 мм, соответственно). Имеющаяся система коррекции магнитного поля секторов позволяет оперативно регулировать ряд характеристик управляющего магнитного поля на участках генерации рабочих пучков СИ с целью оптимизации их параметров применительно к условиям того или иного физического эксперимента.

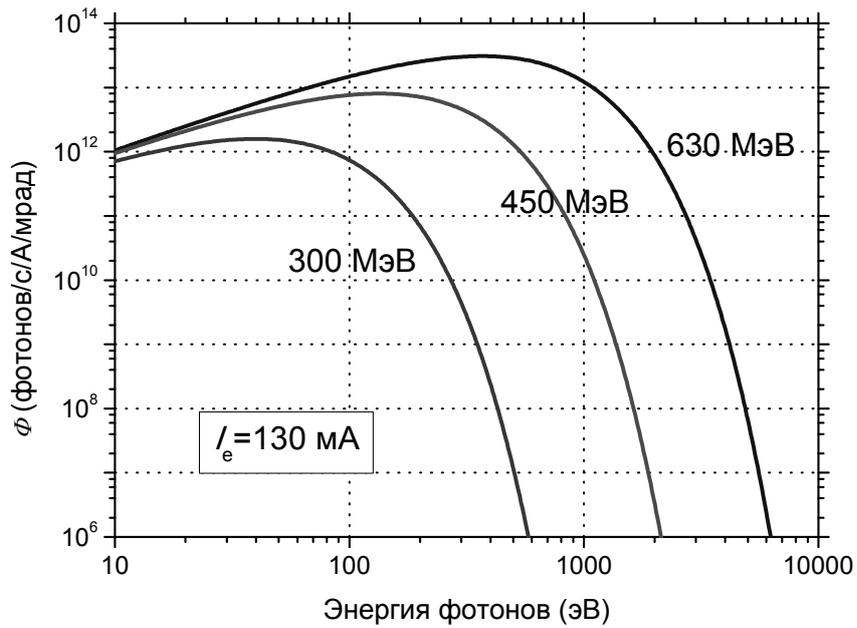


Рис. 1. Спектральная плотность потока СИ С-60.

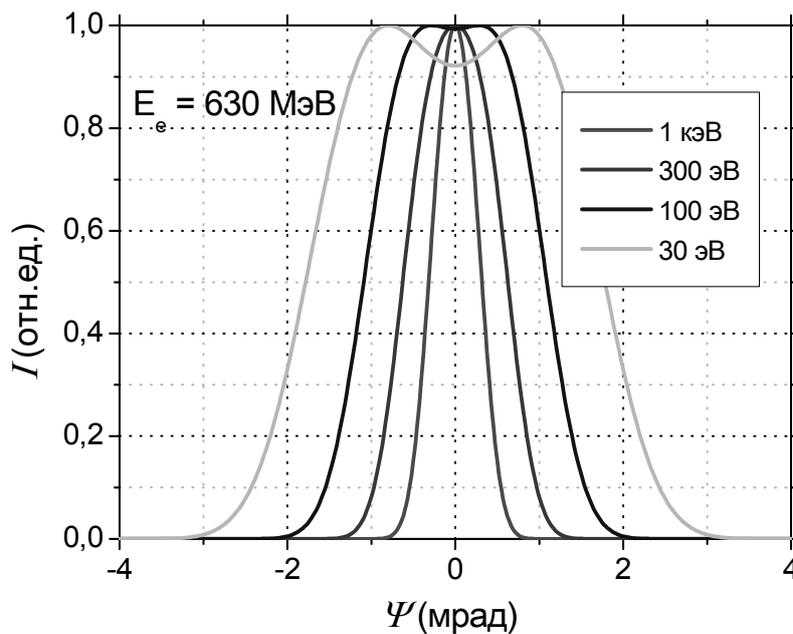


Рис. 2. Нормированные теоретические вертикальные угловые распределения интенсивности СИ С-60.

Работающие в России источники СИ имеют бóльшую энергию электронов, т.е. предназначены для работ, в основном, в жесткой рентгеновской области: в Курчатовском институте «Сибирь-2» ($E_e=2,5$ ГэВ), в Новосибирском ИЯФе - ВЭПП-3 ($E_e=2$ ГэВ) и ВЭПП-4 ($E_e=6$ ГэВ). Особняком стоит накопитель «Сибирь-1» на 450 МэВ, имеющий каналы СИ для ВУФ спектроскопии.

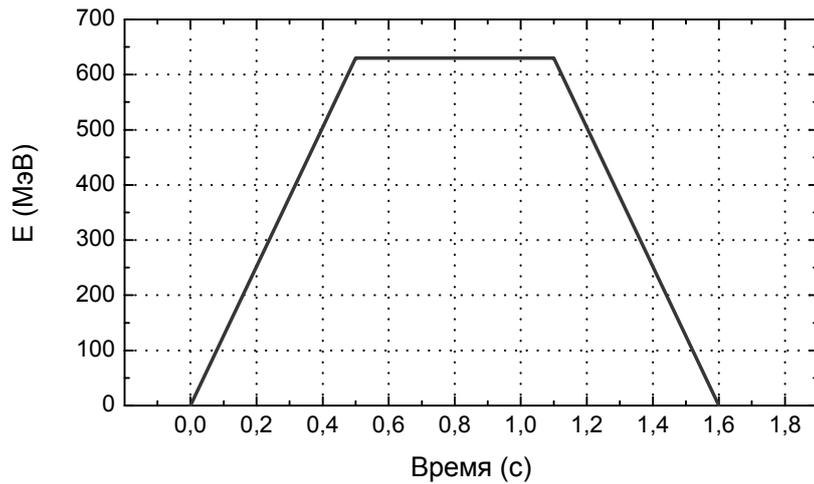


Рис. 3. Закон изменения энергии электронов на С-60 в течение цикла ускорения.

При этом все эти источники являются электронными или электрон-позитронными накопителями с большим временем жизни пучка на орбите и, соответственно, с высоким вакуумом в камере. Работа на экспериментальных станциях возможна либо при таком же вакууме, как в рабочей камере накопителя, то есть лучше 10^{-8} Торр, либо при использовании вакуумных окон, что приводит к ослаблению длинноволновой области спектра СИ, либо требует применения сложных систем дифференциальной откачки. Эта проблема отсутствует на синхротроне С-60, где не требуется сверхвысокий вакуум, и уровень вакуума в ускорителе и экспериментальных станциях одинаковый.

Таким образом, в России особенности синхротрона С-60 позволяют ему занимать свою «нишу» источника СИ в ВУФ и МР области.

В ФИАНе имеется еще один электронный синхротрон С-25Р «Пахра» на максимальную энергию 1,2 ГэВ. Однако, на этом ускорительном комплексе проводятся, в основном, эксперименты на выведенном электронном пучке в рамках программы исследований по физике элементарных частиц.

Очевидно, что С-60 по своим параметрам, таким как яркость или, например, длительность импульса СИ, существенно уступает современным зарубежным источникам СИ. Однако есть область использования СИ, где не требуются высокая яркость или интенсивность СИ, не требуется наличие ондуляторов или вигглеров и т.п. – это метрология, где необходимо иметь «обычное» СИ из отклоняющих магнитов, но с хорошо известными свойствами. В классическом понимании использование СИ в метрологии означает, что СИ может рассматриваться как так называемый первичный стандарт излучения, то

есть спектральные характеристики СИ, генерируемого электронами при пролете в отклоняющих магнитах, могут быть точно рассчитаны с применением известных формул (см. ниже). Поэтому прямой пучок СИ может использоваться для абсолютных калибровок спектрометрических детекторов и спектральных приборов. Более того, фактически, в области ВУФ и МР СИ является единственным инструментом для таких абсолютных калибровок. В более широком смысле под метрологией на СИ понимают методы характеристики свойств оптических элементов, такие как рефлектометрия, исследование рассеивающих свойств, фокусирующих свойств, поляризационных свойств и др. В ЛЭВЭ на протяжении предшествующих лет накопился достаточно большой опыт работы по этим направлениям, причем многие работы были выполнены в сотрудничестве с другими подразделениями ФИАН (см., например, [4-8]).

Надо отметить, что совсем недавно в Берлине, рядом с известным центром СИ BESSY был построен и введен в эксплуатацию специализированный источник СИ для целей метрологии Metrology Light Source (MLS) [9], что недвусмысленно указывает на актуальность подобных исследований. Максимальная энергия MLS оказалась точно такой же, как у С-60: 630 МэВ, хотя радиус орбиты несколько меньше: 1,62 м. Спектры СИ обоих источников приведены для сравнения на Рис. 4. Видно, что характеристики СИ С-60 и MLS, в частности, спектральная область СИ, очень похожи, что указывает на то, что параметры ускорителя ФИАН С-60 действительно близки к оптимальным для работ по данной тематике.

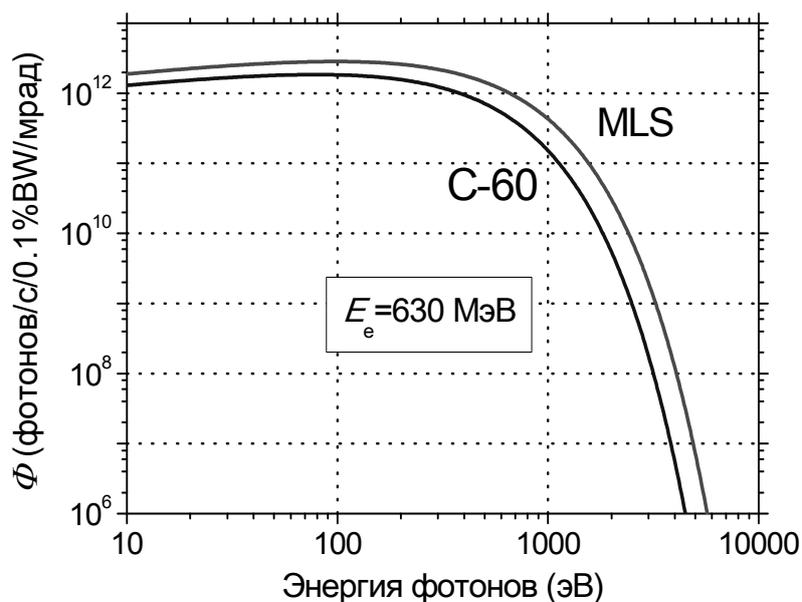


Рис. 4. Сравнение спектральной плотности потока СИ С-60 и MLS (в полосе энергии фотонов $0,1\%E$).

Ускоритель С-60 как метрологический источник СИ.

Спектральная плотность (на единичный интервал энергии) потока фотонов СИ с энергией ε в единичный телесный угол (ψ - вертикальный угол, θ - горизонтальный угол) от N_e электронов с энергией E_e , вращающихся по круговой орбите радиуса R с частотой ν , рассчитывается по формуле:

$$\frac{d\Phi(\varepsilon, \psi)}{d\varepsilon \cdot d\psi \cdot d\theta} = \frac{2eIR^2}{3\gamma^4} \frac{\varepsilon^2}{(hc)^3} \left\{ [1 + (\gamma\psi)^2]^2 K_{2/3}^2(\xi) + [1 + (\gamma\psi)^2] (\gamma\psi)^2 K_{1/3}^2(\xi) \right\} \quad (1)$$

$$\xi = \frac{2\pi R \varepsilon}{3hc\gamma^3} [1 + (\gamma\psi)^2]^{3/2} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} [1 + (\gamma\psi)^2]^{3/2} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{E_e}{m_e c^2}, \quad \varepsilon_c = \frac{3\hbar c \gamma^3}{2R}, \quad I = e \cdot \nu \cdot N_e, \quad R = E_e / e c B. \quad (3)$$

Фактически, это формула для расчета вертикальных угловых распределений СИ, где $K_{2/3}(\xi)$ и $K_{1/3}(\xi)$ – это так называемые модифицированные функции Бесселя 2-го рода. Для расчета спектральной плотности потока СИ через какую-то площадку, расположенную на определенном расстоянии d от излучающей точки орбиты, указанную функцию спектральной плотности надо проинтегрировать по вертикальному углу и умножить на горизонтальную угловую ширину. Кроме того, поскольку источник СИ не точечный, надо учесть эффективную вертикальную расходимость пучка электронов, зависящую от его размера σ_y и расходимости σ_α : $\Sigma_y = (\sigma_y^2 / d^2 + \sigma_\alpha^2)^{1/2}$:

$$\frac{d\Phi(\varepsilon)}{d\varepsilon} = \iint_{\text{апертура}} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Sigma_y} I(\psi') \times e^{-((\psi' - \psi)^2 / 2\Sigma_y^2)} d\psi' \right] d\psi d\theta \quad (4)$$

Таким образом, абсолютную величину потока СИ через какую-то площадку $a \times b$, например, входное окно детектора или входную щель спектрометра, можно точно рассчитать, если известны с достаточной точностью параметры ускорителя и геометрия эксперимента. Схематически эта ситуация отображена на Рис. 5, где указаны те параметры, которые входят в расчетные формулы и которые необходимо знать с хорошей точностью. Это - энергия электронов (E_e), индукция магнитного поля в излучающей точке орбиты (B), ток электронного пучка (I) или число электронов на орбите (N_e), эффективная расходимость электронного сгустка в излучающей точке орбиты (Σ_y) и расстояние от излучающей точки орбиты до точки наблюдения (d).

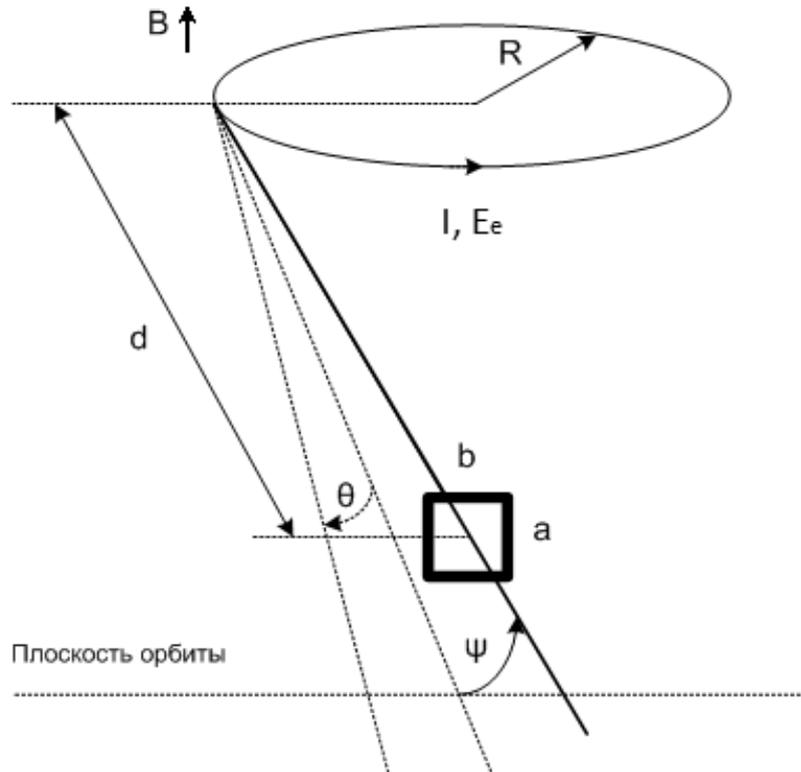


Рис. 5. Параметры ускорителя и пучка СИ, точное знание которых необходимо для проведения абсолютных калибровок.

Параметры ускорителя С-60 были определены много лет назад и известны с достаточно высокой точностью (около 1%), хотя предполагается, что эти параметры будут в будущем уточнены. В стандартной методике расчета характеристик СИ (для целей метрологии) предполагается, что «точно» измеренными параметрами ускорителя являются энергия электронов W и индукция магнитного поля B . Однако, вообще говоря, необходимо «точно» знать любые два из трех параметров: E_e , B и радиус орбиты R , поскольку они связаны простым соотношением: $R = E_e / ecB$ (для релятивистских частиц). Для ускорителя С-60 параметрами, определенными с точностью около 1%, являются B и R , которые и используются для расчета характеристик СИ С-60.

На ускорителе С-60 имеется также измеритель циркулирующего тока (I), погрешность измерений которого составляет около 1%. Измерение тока осуществляется с помощью сигнального электрода, расположенного в прямолинейном промежутке орбиты электронов. Число электронов на орбите N_e связано с величиной наведенного пучком электронов напряжения на сигнальный электрод следующим соотношением:

$$N_e = \frac{U_0 CL}{l_{\text{эф}} e} \quad (\text{ток на орбите равен } I = e \cdot \nu \cdot N_e), \quad (5)$$

где U_0 – среднее за период обращения T частиц значение амплитуды наведенного напряжения: $U_0 = \int_0^T U(t) dt$, C – емкость сигнальных электродов, L – длина орбиты электронов: $L = c/\nu$ (c – скорость света, $\nu = 20,45$ МГц - частота обращения электронов по орбите), $l_{\text{эф}}$ – длина сигнальных электродов, e – заряд электрона.

Таким образом, задача определения циркулирующего тока сводится к задаче измерения наведенного на сигнальные электроды напряжения, что представляет собой сложную радиотехническую задачу для сравнительно высоких частот обращения электронов по орбите как 20,45 МГц. В разработанном методе измерения циркулирующего тока спектр напряжения, наводимого пучком электронов на сигнальный электрод, трансформируется стробоскопическим преобразователем в область низких частот (метод высокочастотного стробирования), что позволяет наблюдать азимутальное распределение сгустка на низкочастотной аппаратуре и использовать низкочастотный амплитудный детектор. При этом коэффициент трансформации ≈ 5000 : с 20,45 МГц до 4 кГц.

Геометрические параметры пучка СИ, а именно: эффективная расходимость электронного сгустка в излучающей точке орбиты (Σ_y) и расстояние от излучающей точки орбиты до точки наблюдения (d), были измерены в специально проведенных экспериментах, описанных ниже.

Специализированный канал СИ на С-60.

Для выполнения работ в области метрологии и рентгеновской оптики на С-60 был модернизирован широкоапертурный ($\text{Ø}160 \div 200$ мм) и достаточно протяженный (~ 20 м) специализированный канал СИ, использовавшийся ранее для работ по рентгенолитографии.

Этот канал имеет 4 вакуумных камеры (№ 1, 2, 3, 5) объемом около 50 л каждая и одну камеру (№ 4) объемом около 90 л, оснащен системой диафрагм, вакуумных клапанов, затворов, системой откачки на основе безмасляных форвакуумных, а также турбомолекулярных и магниторазрядных насосов. Камера № 3 оснащена механизмом вертикального перемещения образцов – так

называемой «протяжки», что позволяет при определенных условиях экспонировать в пучке СИ образцы размером до 120×120 мм.

Канал рассчитан на работу при том же рабочем вакууме, что и камера ускорителя С-60, то есть 10^{-6} Торр, что позволяет работать с прямым пучком СИ без использования вакуумных окон. Применение безмасляной откачки существенно снижает содержание углеводородов в остаточном вакууме, что заметно продлевает срок службы оптических элементов и датчиков магниторазрядных вакууметров в канале. Этот канал выведен в так называемый экспериментальный зал, то есть в радиационно-безопасное помещение.

На Рис. 6 показана схема канала.

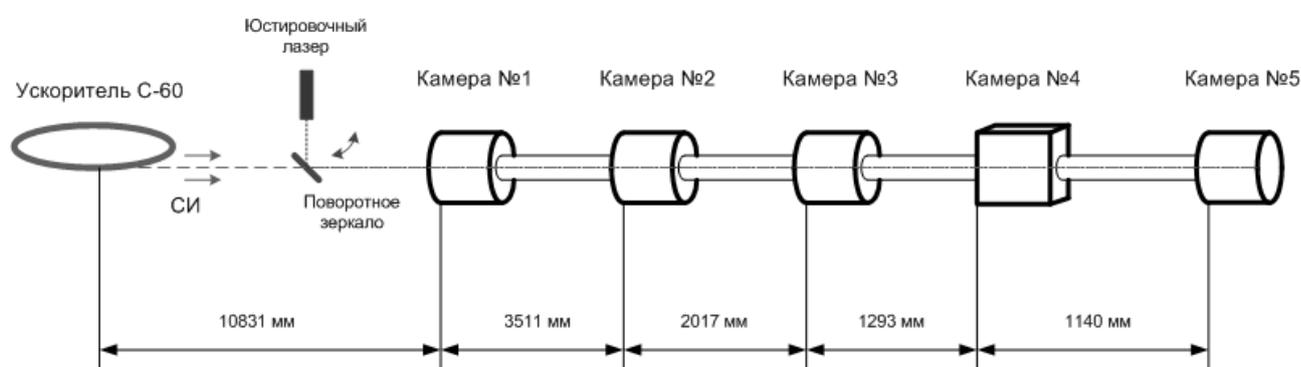


Рис. 6. Схема специализированного канала СИ С-60.

В первой по ходу пучка СИ вакуумной камере (№ 1) на платформе смонтирован набор юстировочных столиков для установки исследуемых образцов, щелей, фильтров, промежуточных детекторов, видеокамеры, как визуализатора, оснащенных необходимыми моторизованными подвижками (линейные трансляторы, поворотные платформы, гониометры) в вакуумном исполнении (фирмы Standa [10]).

Пучок СИ рентгеновского диапазона в районе камеры № 1 имеет по вертикали размер (на полувысоте) порядка 2-х см, что соответствует угловой ширине порядка ± 1 мрад.

Во 2-ой по ходу пучка СИ вакуумной камере канала установлен 2-х координатный рентгеновский детектор – рентгеновская ПЗС-камера DX420-BN фирмы ANDOR [11]. Ее основные характеристики:

- количество пикселей - 1024×255 ;
- размер пикселя (мкм) - 26×26 ;
- площадь входного окна (мм) - $26,6 \times 6,7$;

- максимальное количество спектров, регистрируемых за секунду, - 166;
- задняя засветка;
- вакуумное исполнение;
- возможность охлаждения ПЗС матрицы.

Надо отметить, что кривая спектральной чувствительности ПЗС-камеры (сплошная линия на Рис. 7) хорошо соответствует спектру СИ С-60.

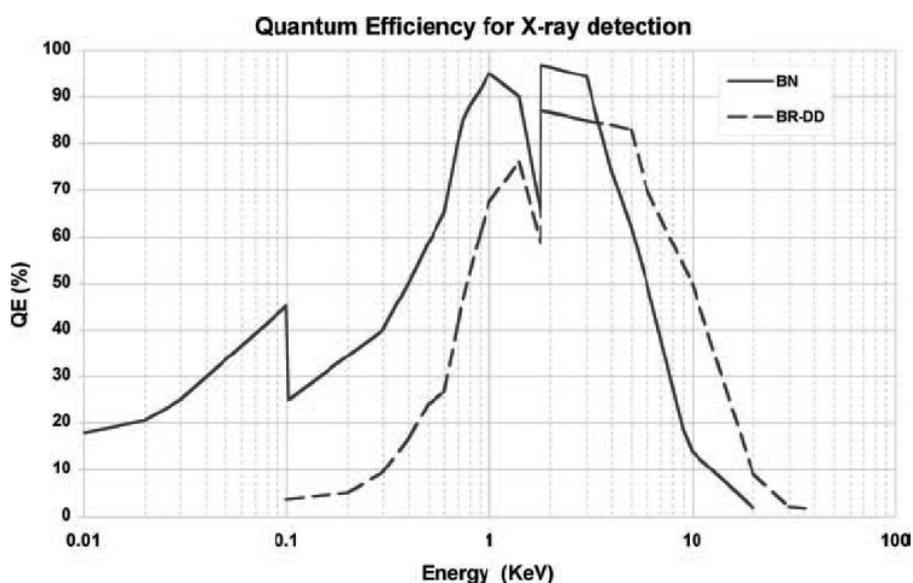


Рис. 7. Кривая спектральной чувствительности рентгеновской ПЗС-камеры ANDOR DX420-BN (сплошная линия).

Как было указано выше, для того, чтобы обеспечить возможность абсолютной калибровки детекторов и спектрометров в пучке СИ, необходимо, в частности, точно измерить геометрические параметры пучка СИ, а именно: угловое распределение СИ, зависящее от эмиттанса электронного сгустка в ускорителе. Для этих измерений была использована рентгеновская ПЗС-камера. Перед камерой в качестве рентгеновского фильтра была установлена алюминиевая фольга толщиной 69 мкм. Этот фильтр, который на несколько порядков снижает поток СИ, падающий на рентгеновскую камеру, формирует квазимонохроматический спектр СИ с максимумом в районе 1,5 кэВ (Рис. 8). Измеренное в указанных условиях угловое распределение СИ заметно шире теоретического (Рис. 9), что обусловлено размытием пучка СИ из-за конечного размера и углового разброса по направлениям скоростей электронного сгустка.

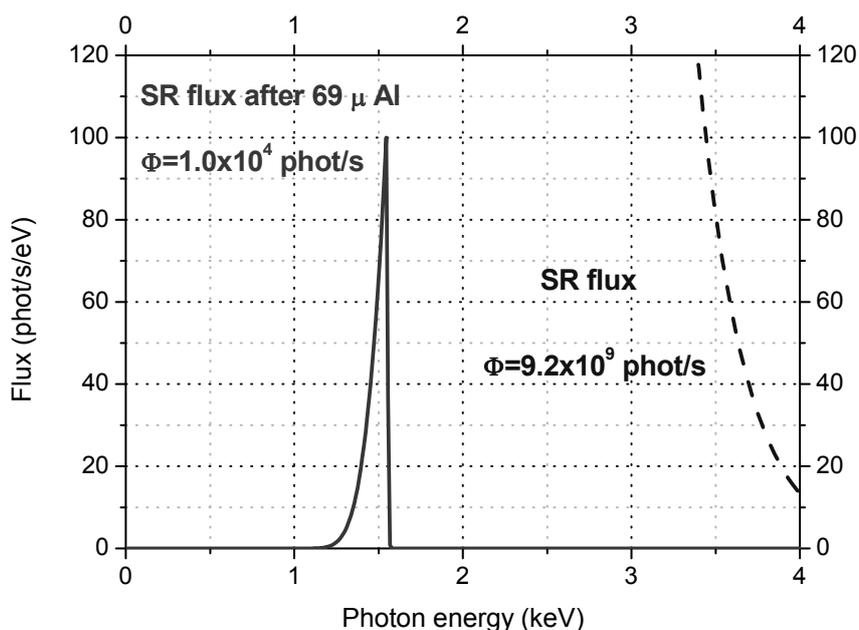


Рис. 8. Спектральная плотность (на единичный интервал энергии фотонов) потока СИ С-60 в прямом пучке и за Al-фольгой толщиной 69 мкм.

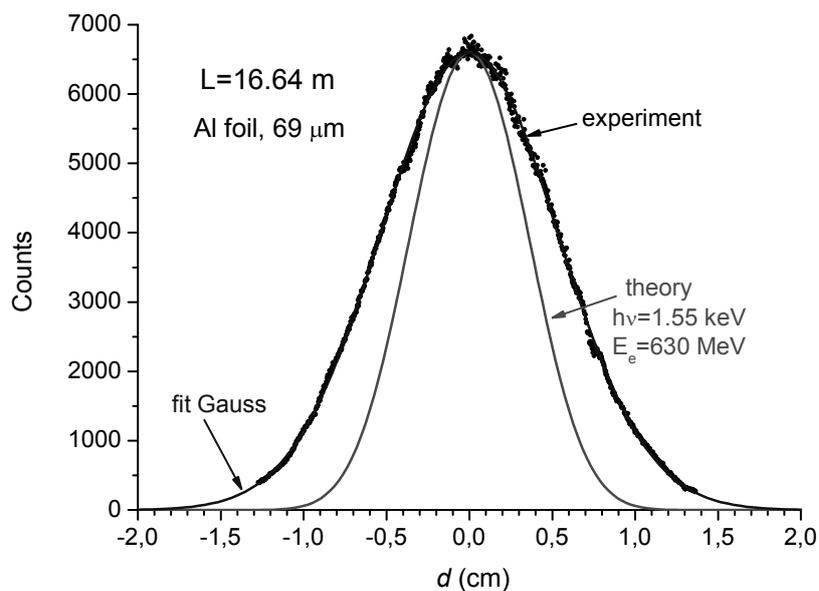


Рис. 9. Теоретическое (для $h\nu=1,55$ кэВ) и измеренное (за Al-фольгой толщиной 69 мкм) угловые распределения СИ С-60 на расстоянии 16,64 м от точки излучения.

Из этих измерений была определена эффективная расходимость электронного сгустка путем фитирования экспериментального углового распределения формулой (4). При этом использовалось теоретическое угловое распределение СИ для энергии фотонов 1,55 кэВ. Полученная таким образом

эффективная расходимость электронного сгустка составила $\Sigma_y = 0,244 \pm 0,001$ мрад (полная ширина на полувысоте – 0,57 мрад).

Здесь следует отметить, что во время проведения экспериментов на специализированном канале СИ рентгеновская ПЗС-камера может использоваться для мониторинга пучка СИ, т.е. для точного контроля его положения и размеров.

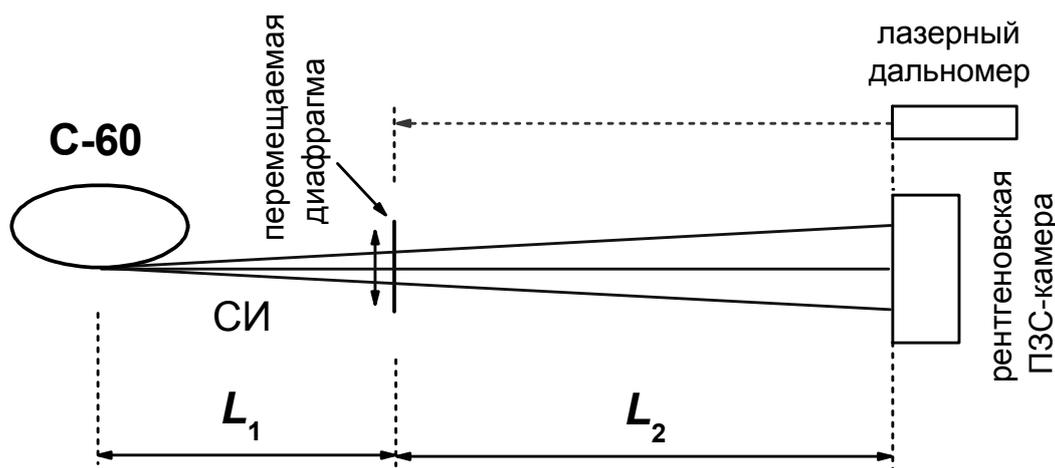


Рис. 10. Схема эксперимента по определению положения излучающей точки орбиты электронов в камере ускорителя.

Второй геометрический параметр – расстояние до излучающей точки орбиты электронов также был определен с использованием рентгеновской ПЗС-камеры в достаточно простом эксперименте, схема которого показана на Рис. 10. Это расстояние ($L_1 + L_2$) определялось путем оптического проецирования перемещаемой перпендикулярно пучку СИ узкой (0,25 мм) вертикальной щели на входное окно ПЗС-камеры. Точность установки положения щели с помощью высокоточных линейных подвижек имела значение лучше 1 мкм. Центр изображений щели на входном окне ПЗС-камеры определялся с точностью ~ 3 мкм по результатам фитирования формы изображения функцией Гаусса (Рис.11). Результаты измерений положения центра изображения щели, регистрируемого на ПЗС-камере, при перемещении щели показаны на Рис. 12.

Расстояние между щелью и ПЗС-камерой (L_2) было измерено с помощью лазерного дальномера с точностью ± 1 мм, т.е. лучше, чем $\pm 0,03\%$. Расстояние L_1 затем вычислялось из простой геометрической пропорции. Определенное таким

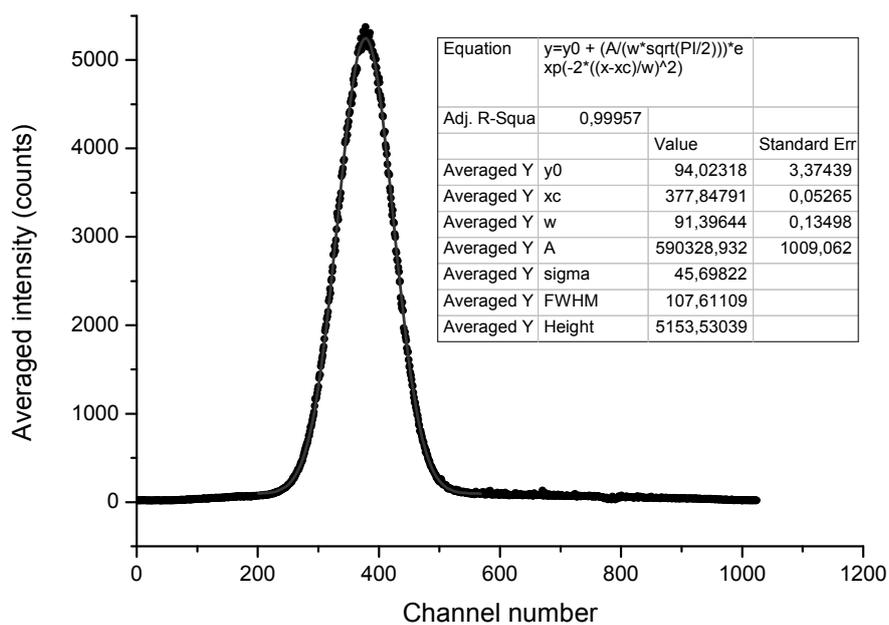


Рис.11. Фитирование гауссоидой изображения щели на входном окне ПЗС-камеры. Каждая экспериментальная точка – интенсивность, усредненная по вертикали по 256 пикселям.

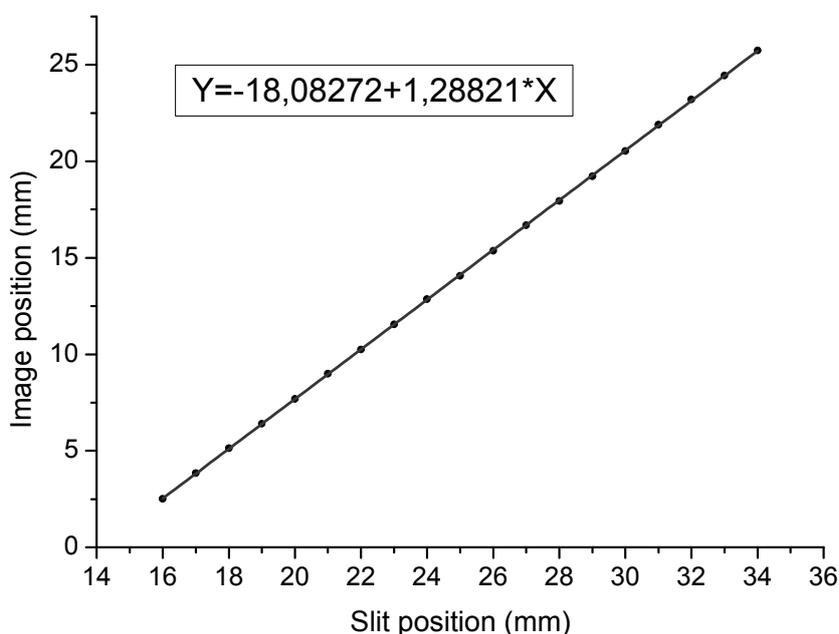


Рис. 12. Результаты измерения положения центра изображения щели, регистрируемого на ПЗС-камере, при перемещении щели перпендикулярно пучку СИ.

способом расстояние от излучающей точки орбиты до входного окна ПЗС-камеры составило $1664,0 \text{ см} \pm 2,5 \text{ см}$. После этих измерений в обеих вакуумных камерах были выбраны «реперные» точки, для которых, таким образом, с такой же точностью известно расстояние от излучающей точки орбиты.

Были изучены также возможности корректировки направления и размера пучка СИ с помощью специальных устройств коррекции магнитного поля ускорителя (используя рентгеновскую ПЗС-камеру для мониторинга пучка СИ). Такая коррекция осуществляется с помощью плоских полюсных обмоток, находящихся в зазоре между вакуумной камерой и полюсами магнита. Обмотки питаются импульсами тока с регулируемой амплитудой и длительностью (в том числе равной полной длительности плато магнитного поля) и синхронизируемыми с желаемой энергией электронов посредством «импульсов привязки к полю». В типовых эксплуатационных режимах работы С-60 используются следующие обмотки коррекции магнитного поля:

1) Обмотка регулирования показателя спада магнитного поля по радиусу (n), изменяющая в желаемой фазе цикла значение радиального градиента управляющего магнитного поля в секторах и влияющая тем самым на время жизни и азимутальный размер сгустка электронов.

2) Обмотки регулирования первой гармоники смещения медианной поверхности: четыре обмотки Z_{I-IV} , соединенные попарно и создающие в диаметрально противоположных секторах (I и III, II и IV) горизонтальную составляющую управляющего магнитного поля разного знака, вызывающую возмущение орбит по вертикали.

3) Обмотка регулирования первой гармоники наклона медианной поверхности, изменяющего степень связи вертикальных и горизонтальных бетатронных колебаний электронов в электронном сгустке и влияющего, тем самым, на форму его поперечного сечения.

Максимальный ток во всех полюсных обмотках ограничен величиной $\pm 10 \text{ А}$ (регулируется плавно), максимальная длительность прямоугольных импульсов тока составляет $0,6 \text{ с}$ (регулируется ступенями по $0,1 \text{ с}$).

В типовых эксплуатационных режимах работы С-60 обмотка регулирования n обеспечивает следующие улучшения характеристик электронного сгустка и пучков СИ:

1) При токе в обмотке -5 А (на плато; соответствующее изменение значения показателя спада поля n составляет $\Delta n = -0,05$) обеспечивается

существенное увеличение времени жизни сгустка, что практически полностью устраняет потери электронов (на плато) из-за малого времени жизни.

2) При пониженной энергии (450 МэВ) при импульсном токе в обмотке ≈ 16 А ($\Delta n \approx 0,24$) длительностью 0,4 с обеспечивается уменьшение длительности структурных импульсов СИ (уменьшение длины сгустка электронов) до $\approx 2,5$ нс (по сравнению с исходной длительностью ≈ 7 нс при максимальной энергии). Такое существенное уменьшение длительности импульсов СИ значительно расширяет возможности экспериментов на С-60 по спектроскопии с временным разрешением.

Указанные изменения характеристик ускоряемого сгустка являются следствием зависимости декрементов бетатронных и синхротронных колебаний от значений показателя спада магнитного поля n . В частности, с помощью обмотки первой гармоники наклона медианной поверхности можно регулировать форму сечения ускоряемого сгустка от эллиптического с вертикальной осью в минимуме < 1 мм до круглого диаметром ≈ 1 см. Пучок с минимальным вертикальным размером < 1 мм реализуется при токе в обмотке наклона ≈ 10 А [2]. Этот режим обеспечивает существенное уменьшение вертикальной угловой расходимости генерируемого пучка СИ, в том числе в области наиболее коротких длин волн СИ, что весьма существенно для исследований по рентгеновской оптике и метрологии.

Результаты измерений изменения положения и ширины (полной ширины на полувысоте – FWHM) пучка СИ в области расположения ПЗС-камеры в зависимости от токов коррекции магнитного поля в обмотках Z_I , Z_{II} , “n” и обмотке регулирования первой гармоники наклона медианной поверхности показаны на Рис. 13 - 16. При этом обмотка Z_{II} расположена в том же секторе магнитной системы ускорителя, из которого выводится СИ в специализированный канал. Как видно из рисунков, действительно, вертикальное положение пучка СИ в канале может регулироваться с помощью обмоток Z_{II} или “n” в достаточно широких пределах при изменении тока в обмотке. Ширина пучка СИ при этом меняется незначительно. Как и ожидалось, слабо меняется положение и ширина пучка СИ при изменении токов в обмотке Z_I , расположенной в соседнем секторе магнитной системы. Видно также, что ширина пучка СИ сильно меняется в зависимости от тока в обмотке регулирования первой гармоники наклона медианной поверхности, причем действительно, минимальный размер пучка реализуется при максимальном значении тока в обмотке 10 А.

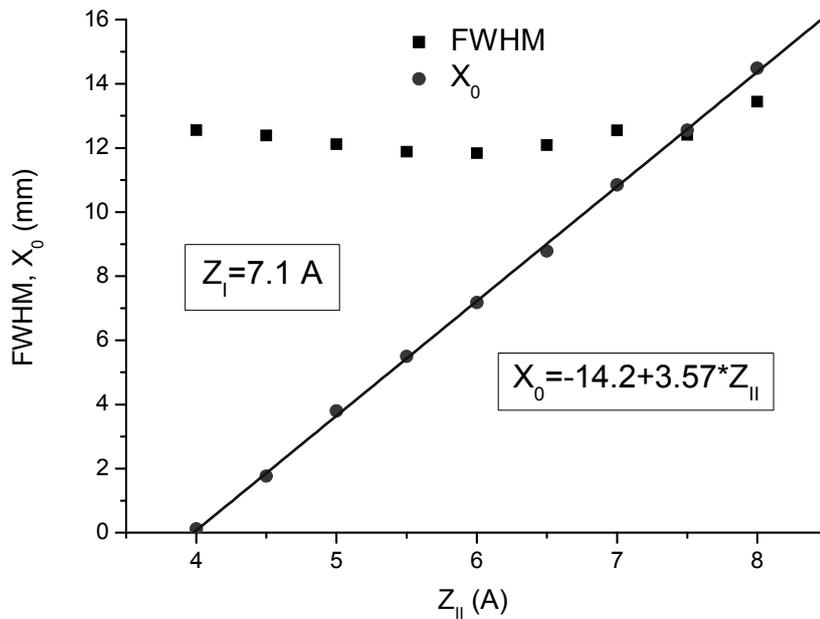


Рис. 13. Положение (X_0) и полная ширина на полувысоте (FWHM) пучка СИ за алюминиевой фольгой толщиной 69 мкм в месте расположения ПЗС камеры (16,64 м от точки излучения) в зависимости от тока коррекции в обмотке Z_{II} . Ток в обмотке Z_I при этом 7,1 А.

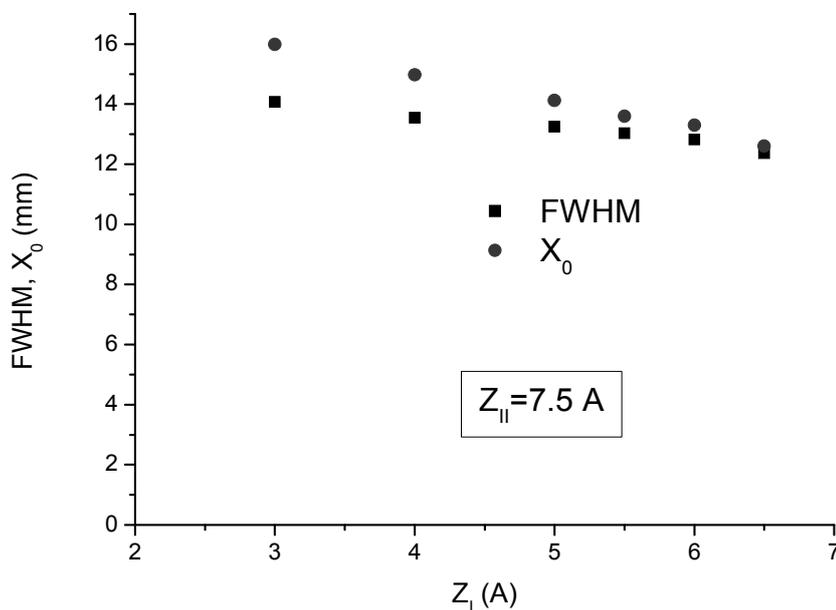


Рис. 14. Положение (X_0) и полная ширина на полувысоте (FWHM) пучка СИ за алюминиевой фольгой толщиной 69 мкм в месте расположения ПЗС-камеры (16,64 м от точки излучения) в зависимости от тока коррекции в обмотке Z_I . Ток в обмотке Z_{II} при этом 7,5 А.

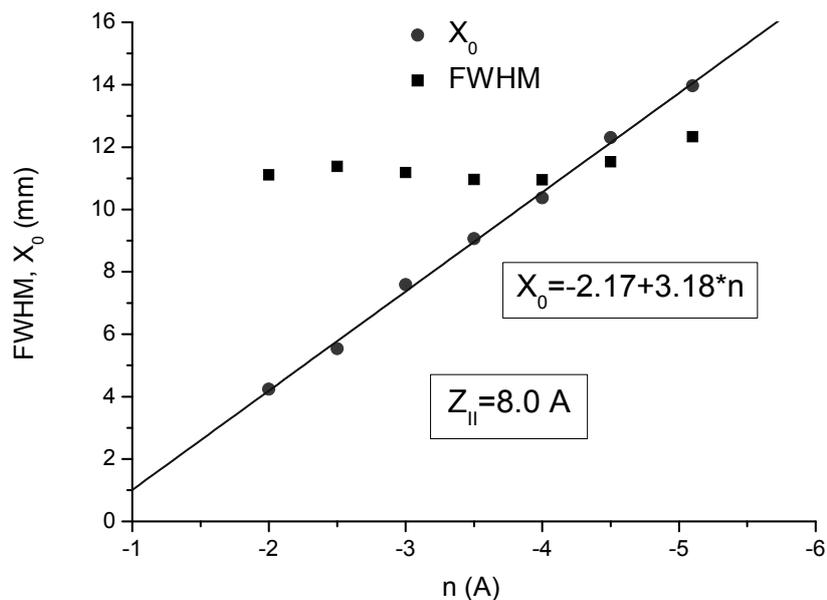


Рис. 15. Положение (X_0) и полная ширина на полувысоте (FWHM) пучка СИ за алюминиевой фольгой толщиной 69 мкм в месте расположения ПЗС камеры (16,64 м от точки излучения) в зависимости от тока коррекции в обмотке “ n ”. Ток в обмотке Z_{II} при этом 8,0 А.

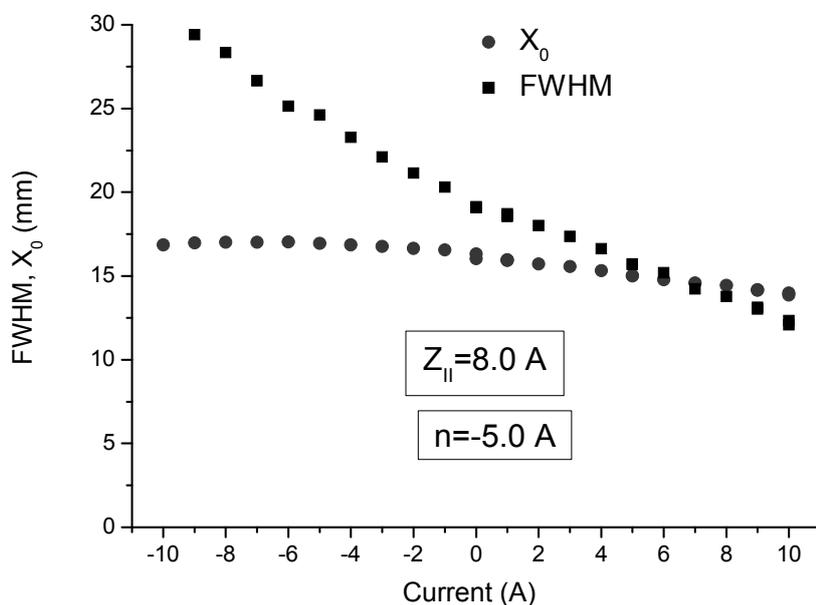


Рис. 16. Положение (X_0) и полная ширина на полувысоте (FWHM) пучка СИ за алюминиевой фольгой толщиной 69 мкм в месте расположения ПЗС камеры (16,64 м от точки излучения) в зависимости от тока коррекции в обмотке регулирования первой гармоники наклона медианной поверхности. Ток в обмотке Z_{II} 8,0 А, в обмотке “ n ” -5,0 А.

Заключение.

Опробована методика измерения расстояния от детектора на базе рентгеновской ПЗС камеры до излучающей точки на орбите ускорителя. Достигнутая при этом точность составляет $\pm 2,5$ см (0,15%).

Проведена оценка эффективной расходимости электронного сгустка С-60, которая составила в стандартном режиме работы С-60 $\Sigma_y = 0,244$ мрад (полная ширина на полувысоте – 0,57 мрад).

Это, совместно с ранее измеренными и известными параметрами ускорителя, позволяет говорить о том, что на специализированном канале СИ С-60 можно проводить работы по абсолютной калибровке с известной точностью, зависящей от конкретных условий задачи.

С середины 2013 г. ускоритель электронов С-60 ФИАН имеет официальное разрешение на работу (санитарно-эпидемиологическое заключение) и может обеспечивать пучок СИ для пользователей в объеме 24 часов в неделю (по одной 8-часовой смене три дня в неделю). Кроме того, С-60 включен в число «уникальных стендов и установок» в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» [12]. Таким образом, характеристики СИ С-60, оснащение канала вывода СИ, системы контроля и управления параметрами СИ С-60 позволяют проводить актуальные исследования в области ВУФ и МР излучения по метрологии (абсолютная калибровка спектрометрических детекторов и спектральных приборов) и рентгеновской оптике (рефлектометрия, исследование рассеивающих, фокусирующих, поляризационных свойств оптических элементов).

Благодарности

Авторы выражают благодарность дирекции ФИАН за помощь в приобретении рентгеновской ПЗС-камеры и моторизованных подвижек, а также всем сотрудникам ЛЭВЭ и ОФТТ, оказавшим помощь при проведении работ.

Список литературы.

1. Сборник «Ускоритель электронов на 680 МэВ», Госатомиздат, М. (1962).
2. Ю.М. Александров, М.И. Благоев, А.А. Комар, В.Н. Махов, С.С. Молчанов, В.А. Мурашова, Г.С. Пашенко, Р.В. Федорчук, Т.И. Сырейщикова, К.Н. Шорин, М.Н. Якименко, «Ускоритель электронов С-60 ФИАН – специализированный источник синхротронного излучения», Препринт ФИАН № 71 (1988).
3. <http://www.esrf.eu/Instrumentation/software/data-analysis/хор2.3/>
4. Ю.М. Александров, Е.Ф. Гиппиус, В.Н. Колесников, Н.В. Лунин, В.Н. Махов, Т.И. Сырейщикова, И.С. Шпигель, М.Н. Якименко, "Абсолютная калибровка вакуумного монохроматора в диапазоне 15-160 нм в пучке синхротронного излучения", Краткие сообщения по физике ФИАН № 3, с.21 (1981).
5. Yu.M. Aleksandrov, A.V. Vinogradov, N.N. Zorev, I.V. Kozhevnikov, V.V. Kondratenko, M.O. Koshevoi, V.A. Murashova, A.A. Rupasov, A.I. Fedorenko, A.S. Shikanov, M.N. Yakimenko, "Study of polarization properties of multilayer X-ray mirrors", Nucl. Instrum. & Methods A 282, 551 (1989).
6. Yu.M. Aleksandrov, K. Eidmann, D.A. Fedin, R.V. Fedorchuk, M.O. Koshevoi, V.A. Murashova, A.A. Rupasov, A.S. Shikanov, M.R. Spol'sky, M.N. Yakimenko, "Investigation of sensitometric characteristics of X-ray photoemulsions in the spectral range of 15-80 Å", Nucl. Instrum. & Methods A 308, 343 (1991).
7. Yu.M. Aleksandrov, S.B. Dabagov, M.A. Kumakhov, V.A. Murashova, D.A. Fedin, R.V. Fedorchuk, M.N. Yakimenko, "Peculiarities of photon transmission through capillary systems", Nucl. Instrum. & Methods B 134, 174 (1998).
8. V.N. Makhov, S.B. Dabagov, A. Marcelli, N.Yu. Kirikova, V.A. Murashova, R.V. Fedorchuk, M.N. Yakimenko, "Enhancement of optical luminescence of solids using a capillary lens", Synchrotron radiation news 13, 20 (2000).
9. R. Klein, G. Brandt, R. Fliegauf, A. Hoehl, R. Müller, R. Thornagel, G. Ulm, "The Metrology Light Source operated as a primary source standard", Metrologia 46, S266 (2008).
10. <http://www.standa.lt>
11. <http://www.andor.com>
12. <http://www.ckp-rf.ru/usu/200612/>

Подписано в печать 10.02.2014 г.
Формат 60x84/16. Заказ № 9. Тираж 140 экз. П.л 1,25.
Отпечатано в РИИС ФИАН с оригинал-макета заказчика
119991 Москва, Ленинский проспект, 53. Тел. 499 783 3640