

На правах рукописи

НИКОЛЕНКО Антон Дмитриевич

**АБСОЛЮТНАЯ КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРОВ
В МЯГКОМ РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**01.04.01 - приборы и методы
экспериментальной физики**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

КУЛИПАНОВ – доктор физико-математических наук,
Геннадий Николаевич профессор, академик РАН,
Учреждение Российской академии наук
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

АНЕВСКИЙ – доктор технических наук,
Сергей Иосифович Всероссийский научно-исследовательский
институт оптико-физических измерений,
г. Москва.

БУРДАКОВ – доктор физико-математических наук,
Александр Владимирович Учреждение Российской академии наук
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения РАН,
г. Новосибирск.

ВЕДУЩАЯ – Учреждение Российской академии наук
ОРГАНИЗАЦИЯ Физический институт имени П.Н.Лебедева
РАН, г. Москва.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2011 г.
в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03
Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск,
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения
Российской академии наук Института ядерной физики имени Г.И. Будкера
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

Автореферат разослан «_____» _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В последние десятилетия наблюдается устойчивое повышение интереса к метрологическим измерениям в мягкой рентгеновской (МР) области (диапазон энергий фотонов от 80 до 2000 эВ) и области вакуумного ультрафиолета (ВУФ) (энергии фотонов 10 – 100 эВ). Этот интерес обусловлен, с одной стороны, развитием научных направлений, использующих МР и ВУФ излучение для наблюдения за различными объектами (лазерная плазма, Солнце, источники излучения для проекционной нанолитографии), а с другой – развитием приборостроения, позволяющего работать с МР и ВУФ излучением (прежде всего, речь идет о развитии оптики и технологии изготовления детекторов для мягкого рентгеновского диапазона). В этой связи повышается спрос на проведение метрологических измерений, включающих в себя аттестацию детекторов, различного рода оптики, источников излучения, работающих в мягком рентгеновском и ВУФ диапазонах. Синхротронное излучение (СИ) предоставляет уникальные возможности для высококачественного проведения подобного рода работ.

Синхротронное излучение представляет собой электромагнитное излучение, испускаемое заряженными частицами, движущимися с ультрарелятивистскими скоростями по криволинейным траекториям в магнитном поле. Высокая интенсивность, малый угловой разброс, непрерывный спектр от инфракрасного до рентгеновского диапазонов дают возможность использования СИ для большого числа практических применений. С точки зрения радиометрии, особую привлекательность синхротронному излучению придает возможность точного расчета его спектральной плотности. СИ широко применяется в ряде национальных метрологических центров в качестве эталонного источника.

Несмотря на все повышающийся спрос на проведение метрологических работ в МР и ВУФ области, в России до последнего времени не существовало специализированных станций СИ, позволяющих проводить такие измерения. Российские потребители вынуждены были обращаться в иностранные метрологические центры. Как показывает практика, наибольшим спросом в ряду подобных работ пользуются калибровки абсолютной спектральной чувствительности детекторов.

Таким образом, актуальность выбранной темы определяется, прежде всего, недостаточной проработкой аппаратно-методической базы, позволяющей проводить метрологические измерения в МР диапазоне на уже имеющихся отечественных источниках СИ. Многолетний опыт работы с синхротронным излучением, накопившийся в ИЯФ СО РАН, дает возможность успешно решить эту задачу.

Цель диссертационной работы

Целью настоящей работы являлось:

Разработка и создание аппаратно-методического комплекса для проведения широкого круга метрологических работ в мягкой рентгеновской и ВУФ областях (10 – 2000 эВ). В качестве первоочередной задачи определено создание специализированной метрологической станции с полным комплектом аппаратуры, разработка и реализация на практике методик калибровки детекторов в мягком рентгеновском диапазоне. Как показала практика эксплуатации созданной станции, наблюдается стабильный рост интереса к ее работе со стороны потребителей, заставляющий все более расширять ее аппаратные и методические возможности.

Личный вклад автора

Автор внес определяющий вклад в большую часть работ, описанных в диссертации, а именно:

Создание станции калибровки детекторов на накопителя ВЭПП-2М – равноценное участие в сборке и запуске станции в эксплуатацию, определяющее участие в автоматизации станции и проведении на ней экспериментов.

Создание метрологической станции "Космос" на накопителя ВЭПП-4М – определяющее участие в создании, запуске в эксплуатацию и проведении экспериментов на станции.

Создание криогенного измерителя мощности СИ для станции "Космос" – определяющее участие в разработке физического проекта радиометра, расчете его оптических параметров, проведении предварительной аттестации радиометра на пучке.

Равноценное участие в реализации метода селективных фильтров для калибровки детекторов.

Определяющее участие в разработке и реализации метода эталонного детектора, метода самокалибровки, метода исследования пространственной однородности чувствительности детекторов, метода исследования радиационной стойкости детекторов.

Научная новизна

Впервые в России создана специализированная метрологическая станция СИ с набором аппаратуры, позволяющим проводить метрологические работы в МР и ВУФ диапазонах.

Впервые реализована комбинированная методика калибровки детектора двумя взаимно-дополняющими методами – методом эталонного детектора и метода самокалибровки.

Впервые реализован прибор для измерения абсолютной мощности СИ с применением сверхпроводящего болометра.

Впервые в России создан комплекс методик для калибровки детекторов в мягком рентгеновском диапазоне с применением СИ.

Предложен метод построения аналитической функции спектральной чувствительности рентгеновского полупроводникового фотодиода, разработана методика подбора параметров этой функции.

Научная и практическая ценность

В результате выполнения работы прокалиброван ряд детекторов, применяющихся в различных научных учреждениях для проведения исследовательских работ:

- детекторы типа СППД, прокалиброванные на "Станции калибровки детекторов" методом селективных фильтров в спектральном диапазоне 100 – 1600 эВ, применяются в ВНИИЭФ (г. Саров) для наблюдения лазерной плазмы;
- детекторы типа ФДУК-100УВ, прокалиброванные на станции "Космос" методом эталонного детектора и методом самокалибровки в спектральном диапазоне 100 – 1000 эВ, применяются в ВНИИТФ (г. Снежинск) для наблюдения лазерной плазмы;
- вторично-электронный умножитель, пространственная однородность чувствительности которого прокалибрована на станции "Космос", предполагается к применению в аппаратуре "Космического солнечного патруля" (ВНЦ ГОИ им. Вавилова, Санкт-Петербург);
- получены данные о сравнительной радиационной стойкости детекторов ФДУК-100УВ и АХУВ-100, дающие возможность разработчикам детектора ФДУК-100УВ (ФТИ им. Иоффе, Санкт-Петербург) корректировать технологию изготовления детекторов;
- параметры аналитической функции, описывающей спектральную чувствительность полупроводниковых фотодиодов, дают новую информацию о процессах, определяющих эту чувствительность.

Положения, выносимые на защиту:

- создание комплекса аппаратуры для проведения метрологических работ в ВУФ и МР спектральных диапазонах (метрологическая станция синхротронного излучения и действующий макет абсолютного измерителя мощности СИ);
- разработка и реализация методики калибровки основных свойств детекторов в мягком рентгеновском диапазоне 80-1600 эВ (спектральная

- чувствительность, однородность чувствительности по поверхности детектора, радиационная стойкость);
- разработка и реализация методики калибровки спектральных свойств тонкопленочных рентгеновских фильтров;
 - разработка и реализация методики построения аналитической функции спектральной чувствительности кремниевых фотодиодов.

Апробация работы

Апробация диссертации проходила в форме устных и стендовых докладов на различных Российских и Международных конференциях и Симпозиумах (всего 20 мероприятий): Международные конференции по использованию синхротронного излучения (Новосибирск: 2006, 2008, 2010 – устные доклады, 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010 – стендовые доклады); Всероссийские совещания по рентгеновской оптике (г. Нижний Новгород: 2009 – устный доклад, 2004, 2005, 2007 – стендовые доклады); Международные конференции "International Conference on Developments and Applications in Optical Radiometry" – NEWRAD (г. Давос 2005 – устный доклад, г. Мадрид 1999, г. Тэджон 2008 – стендовые доклады); Национальные конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов – РСНЭ (г. Москва – 1997, 1999, 2001, 2003, 2005, 2007 – стендовые доклады); Азиатский форум по применению синхротронного излучения (г. Хиросима, 1999 – устный доклад), Пятый Международный симпозиум "Modern Problems of Laser Physics" (г. Новосибирск, 2008 – приглашенный устный доклад).

По работам, связанным с темой диссертации, было опубликовано 15 статей в реферируемых журналах; 26 работ опубликовано в сборниках тезисов и материалах различных конференций и совещаний.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и трех приложений. Текст диссертации содержит 140 страниц, 56 рисунков и 23 таблицы. Список литературы состоит из 144 ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении приведен краткий экскурс в историю развития радиометрии в ведущих мировых научных центрах. Рассмотрены основные тенденции развития радиометрии с применением СИ, ее состояние в России в настоящее время и перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен краткий обзор применения синхротронного излучения в радиометрии. Отмечено, что в настоящее время источники

синхротронного излучения используются в качестве радиометрических эталонов в ряде институтов и в национальных метрологических центрах. Отмечено, что плотность мощности СИ зависит от ограниченного набора параметров, которые могут быть измерены с точностью достаточной, чтобы погрешность расчета параметров СИ не превышала долей процента, рассмотрены методы измерения этих параметров. Далее в главе 1 рассмотрены наиболее распространенные типы детекторов мягкого рентгеновского излучения, пригодных для использования в качестве первичных или вторичных эталонов. Рассмотрены принципы функционирования и основные свойства криогенных радиометров, ионизационных камер, полупроводниковых детекторов, вакуумных рентгеновских диодов, алмазных детекторов. Завершается глава кратким описанием основных методов абсолютной калибровки детекторов – метода эталонного источника, метода эталонного детектора, метода самокалибровки. В выводах, сделанных на основании материала, изложенного в первой главе, отмечено, что СИ широко используется во всем мире для проведения широкого круга радиометрических работ, сформулированы основные задачи, решение которых позволит развивать это направление в России.

Во второй главе рассмотрена аппаратура, созданная в ходе выполнения работ: последовательно были созданы две метрологические станции СИ: "Станция калибровки детекторов в мягком рентгеновском диапазоне", использующая излучение из накопителя ВЭПП-2М и метрологическая станция "Космос" на накопителе ВЭПП-4.

"Станция калибровки детекторов" функционировала с 1995 по 1999 годы и была демонтирована в связи с модернизацией накопителя ВЭПП-2М. Опыт работы, полученный в ходе эксплуатации "Станции калибровки детекторов" и некоторые ее элементы были использованы при строительстве станции "Космос". Глава посвящена в основном описанию аппаратуры ныне действующей станции "Космос", в то время как "Станция калибровки детекторов" описана постольку, поскольку это необходимо для изложения материала, связанного с проводившимися на ней работами.

Станция "Космос" использует излучение из поворотного магнита накопителя ВЭПП-4. Сверхвысоковакуумный канал транспортировки пучка СИ не имеет технологических перегородок, разделяющих вакуум станции и вакуум накопителя. Перепад давления (от 10^{-4} до 10^{-8} Па соответственно) обеспечивается дифференциальной откачкой. Канал оснащен системой аварийного перекрытия канала на случай аварийного прорыва атмосферы в канал. Как показала практика, вакуумная система канала позволяет работать со многими образцами калибруемой аппаратуры, установка которой на подобные станции зарубежных метрологических центров вызывает определенные проблемы, связанные с вакуумной безопасностью каналов СИ.

Расстояние от точки излучения до окончного экспериментального объема станции составляет около 30 м. Основные оптические элементы станции расположены на последних шести метрах станции (рис.1).

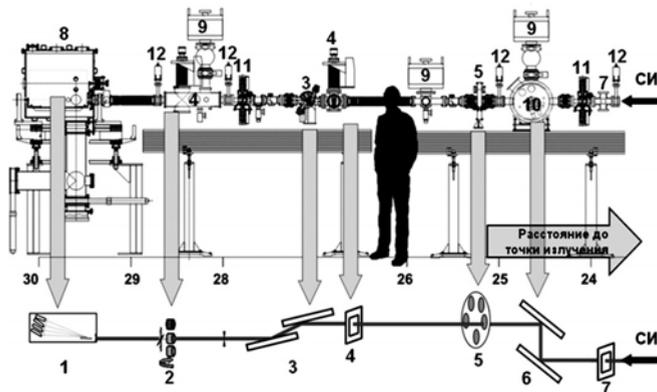


Рис. 1. Компоновка и оптическая схема станции.

Для получения монохроматического излучения метрологического качества в диапазоне 10 – 2000 эВ на станции установлены: монохроматор ВУФ диапазона (10 – 100 эВ) с плоской дифракционной решеткой (3); двухзеркальный монохроматор МР диапазона (80 – 2000 эВ) с плоскими многослойными зеркалами (6); зеркала полного внешнего отражения (устанавливаются в зависимости от диапазона в позиции 3 или 10); блоки сменных рентгеновских фильтров (три блока 4, 5, 7).

Для работы с калибруемыми объектами установлены малый и большой экспериментальные объемы. В малом объеме размещаются эталонный и калибруемый детекторы, большой предназначен для размещения более крупной калибруемой аппаратуры (спектрометры, радиометры в сборе), либо для проведения рефлектометрических измерений.

Набор эталонных детекторов станции представлен калориметром и двумя кремниевыми фотодиодами, прокалиброванными в национальном метрологическом центре Германии РТВ (Physikalisch-Technische Bundesanstalt). На станции также установлен и прошел предварительное тестирование на пучке абсолютный измеритель мощности синхротронного излучения в мягком рентгеновском диапазоне (АИМСИ), чувствительный элемент которого выполнен на основе высокотемпературного сверхпроводникового болометра с электрическим замещением мощности. Ожидается, что прибор, после доводки его характеристик до предельных значений, позволит измерять потоки мягкого рентгеновского излучения в диапазоне энергий 80 – 3000 эВ, мощностью 1 мкВт с относительной погрешностью порядка 1%.

Глава третья посвящена описанию методик, реализованных на станциях обоих СИ для абсолютной калибровки спектральной чувствительности детекторов. Отмечено, что техническое оснащение станции "Космос" в настоящий момент позволяет реализовать все методики, реализованные на обоих станциях. Также возможен, в случае необходимости, перенос разработанных методик на подобные станции СИ в других центрах.

Метод селективных фильтров. Первым методом, реализованным на Станции калибровки детекторов на накопителе ВЭПП-2М, был метод селективных фильтров. Калибровка детекторов методом селективных фильтров по существу является разновидностью метода эталонного источника и использует возможность точного расчета спектрального потока фотонов в белом пучке СИ, генерируемом накопителем. Основная идея калибровки состоит в последовательном измерении сигнала детектора при облучении его потоками фотонов с известным спектральным распределением, сформированными различными аттестованными селективными фильтрами. Селективные фильтры используются для выделения сравнительно узкого спектрального участка из спектра синхротронного излучения.

Регистрируемый сигнал с детектора при его облучении связан с расчетным спектром излучения следующим образом:

$$\int_0^{\infty} \psi(E_{phot}) \cdot \exp(-\mu_i(E_{phot}) \cdot h_i) \cdot S(E_{phot}) dE_{phot} = I_i \quad , \quad (1)$$

где $\psi(E_{phot})$ – спектр потока энергии СИ, Вт/кэВ; $\mu_i(E_{phot})$ – массовый коэффициент ослабления РИ в веществе, г/см²; h_i – массовая толщина фильтра с индексом i , г/см²; $S(E_{phot})$ – спектральная чувствительность детектора, А/Вт; I_i – измеренный ток с детектора за фильтром с индексом i , А.

Спектральная чувствительность восстанавливалась из системы уравнений (1), где все величины, кроме $S(E_{phot})$, известны.

Решение системы интегральных уравнений рассматриваемого вида является крайне неустойчивым, если при восстановлении не использовать априорную информацию. В данном случае априорная информация заключалась в параметрической форме спектральной чувствительности. Чувствительность детектора искалась в виде:

$$S = k \frac{1}{w} \exp\left(-\frac{d_C}{\lambda_C} - \frac{d_{SiO_2}}{\lambda_{SiO_2}} - \frac{d_B}{\lambda_B} - \frac{d_{Filt}}{\lambda_{Filt}}\right) \times \\ \times \left[\left(\exp\left(-\frac{d_{dSi}}{\lambda_{Si}}\right) \right) \left(1 - \exp\left(-\frac{d_{aSi}}{\lambda_{Si}}\right) \right) + \sigma_s \left(1 - \exp\left(-\frac{d_{dSi}}{\lambda_{Si}}\right) \right) \right] \quad . \quad (2)$$

где d_C , d_{SiO_2} , d_B , d_{dSi} , d_{aSi} – толщины поглощающих слоев детектора (углерода, оксида кремния и бора), мертвого и активного слоев кремния соответственно; λ_C , λ_{SiO_2} , λ_B , λ_S , λ_{Filt} – глубины поглощения для соответствующих материалов. Глубина поглощения (т.е. глубина, на которой материал ослабляет излучение в $e = 2.718\dots$ раз) каждого из материалов зависит от энергии фотонов и получена на основании таблиц оптических констант этого материала; σ_s – вероятность диффузии носителей заряда из "мертвого" слоя детектора в активную область.

Нахождение функции спектральной чувствительности детектора сводилось к поиску параметров функции (2). Задача решалась методом ограниченной оптимизации Бокса.

Измерения проводились на установке "Станция калибровки детекторов" накопительного кольца ВЭПП-2М. В качестве селективных фильтров применены предварительно аттестованные тонкие пленки из Co, Ni, Cu, Mg, Al на подложке параксиллена.

Проведены исследования спектральных характеристик рентгеновских детекторов на СИ из накопителя ВЭПП-2М в диапазоне энергий фотонов от 100 до 1600 эВ. Исследуемыми детекторами являлись кремниевые р-і-п диоды СППД11, СППД11-04, СППД13 производства НИИИТ (Москва). Погрешность калибровки на спектральном промежутке 400 – 15600 эВ составила 1 – 2%, а на промежутке 400 – 100 эВ составила 2 – 8%. Важным результатом калибровки явилось обнаружение факта неполного сбора носителей, что указывает на наличие ловушек в полупроводнике.

Достоинства метода селективных фильтров: возможность достаточно дешево проводить калибровку детекторов с большими токами утечки (до 10 мкА) и детекторов с малой чувствительностью.

К недостаткам метода следует отнести его зависимость от корректности модели и отсутствие возможности проверки этой корректности по результатам измерений.

Метод эталонного детектора обладает рядом преимуществ по сравнению с методом селективных фильтров: прозрачность методики обработки экспериментальных данных; потенциально более высокая точность измерений; возможность корректировки математической модели чувствительности калибруемого детектора в зависимости от получаемых данных. В то же время метод требует существенно более серьезного оборудования для своей реализации.

Для получения монохроматического излучения на станции "Космос" используются многослойные зеркала, рентгеновские фильтры и зеркала полного внешнего отражения. В диссертации продемонстрирована методика расчета параметров всех этих элементов и предложен способ численной оценки качества монохроматического излучения с точки зрения возможности проведения метрологических работ.

Метод эталонного детектора позволяет измерить чувствительность калибруемого детектора на дискретном наборе точек спектрального диапазона. Для интерполяции результатов калибровки между полученными точками приведен способ построения функции чувствительности детектора в параметрическом виде (2). Задача подбора параметров функции по данным калибровки является типичной задачей оптимизации и может быть решена методом Левенберга-Марквардта. На участке 100 – 300 эВ спектральная характеристика эталонного детектора терпит резкие перепады, аналитическая функция $S(E_{phot}, d_i)$ предсказывает особенность, связанную с наличием К-края поглощения бора (188 эВ), входящего в состав входного окна детектора. Эта особенность не отражена в результатах калибровки эталонного детектора из-за большого шага по спектру. Вблизи этого края также ожидается отклонение реальной функции чувствительности детектора от аппроксимирующей модели $S(E, d_i)$. Все эти соображения вынуждают отказаться от метода эталонного детектора в спектральной области 100 – 300 эВ и применить другой метод калибровки детектора.

Метод самокалибровки заключается в изучении изменения отклика детектора на монохроматическое излучение при вариации угла падения этого излучения на детектор. В зависимости от значения угла поворота детектора δ изменяется эффективная толщина каждого из слоев на его поверхности

$$d'_i = d_i / \cos(\delta), \quad (3)$$

где d_i – толщина i -го слоя на поверхности детектора. Например, для $\delta = 60^\circ$, эффективные толщины слоев увеличатся в 2 раза относительно $\delta = 0^\circ$. Соответственно с этим изменяется функция чувствительности детектора. Расчеты показывают, что для энергий фотонов больше 50 эВ доля излучения, отраженного или рассеянного от поверхности детектора, меньше 0,1% и не оказывает влияния на калибровку.

На станции "Космос" была проведена калибровка фотодиода ФДУК-100УВ (разработчик ФТИ им. Иоффе, Санкт-Петербург) в диапазоне 100 – 1000 эВ комбинированным методом, включающим в себя метод эталонного детектора и метод самокалибровки.

Точность измерений по всему спектру оценивается в 2,5%, за исключением узкой области вблизи К-края бора (190 – 220 эВ), где наблюдается систематическое отклонение результатов измерений в меньшую сторону от аналитической функции на 6%. Отклонение объясняется влиянием структуры вещества, входящего в состав слоев на поверхности детектора.

По результатам измерений произведен подбор вектора параметров для функции спектральной чувствительности вида (2) калибруемого детектора. Функция восстановлена из результатов комбинированных измерений

методом эталонного детектора (300 – 1000 эВ) и методом самокалибровки (85 – 280 эВ). Результат калибровки детектора представлен на рис. 2.

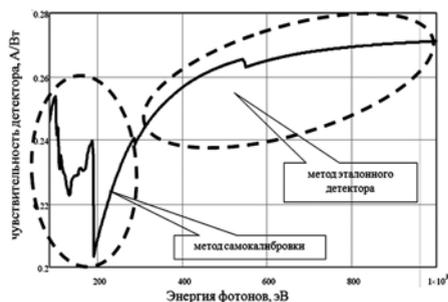


Рис. 2. Результат восстановления функции чувствительности калибруемого детектора.

Сравнение метода самокалибровки и метода эталонного детектора.

Методика эталонного детектора демонстрирует высокую точность результата калибровки, не накладывает практически никаких ограничений на тип калибруемого детектора. Результаты измерений, выполненные по этой методике, не требуют сложной математической обработки. Метод обеспечивает погрешность калибровки 2 – 3 %.

Методика самокалибровки не требует наличия ни эталонного детектора, ни эталонного источника, однако требует наличия монохроматора и адекватной модели чувствительности калибруемого детектора. Методика рассчитана на калибровку полупроводниковых фотодиодов и не подходит для калибровки ряда других детекторов. Обеспечивает погрешность калибровки 2 – 3%.

В четвертой главе описана разработка и реализация на станции "Космос" дополнительных методик, необходимых для аттестации основных потребительских свойств детекторов.

Измерение функции пропускания селективных фильтров необходимо для реализации метода селективных фильтров. Спектральное пропускание фильтров измерено напрямую, в монохроматическом излучении, с применением двухзеркального монохроматора станции. Погрешность измерения функции пропускания фильтров дало вклад в погрешность калибровки детекторов на уровне 2 – 4%.

Однородность чувствительности детектора площади его входного окна является одной из важных характеристик, которая подлежит калибровке наряду со спектральной чувствительностью. Измерения проводились путем пространственного сканирования детектором относительно тонкого монохроматического зондирующего пучка СИ. Проведены измерения пространственной однородности чувствительности фотокатодов для двух вторично-электронных умножителей: ВЭУ-6 и ВЭУ,

входящего в состав "Космического солнечного патруля" (КСП, разработчик ГОИ им. С.И.Вавилова, Санкт-Петербург).

Оба умножителя показали достаточно высокую квантовую эффективность. Измерения выявили наличие существенной неоднородности зонных характеристик обоих типов ВЭУ (рис. 3). По результатам измерений сделан вывод, что абсолютная калибровка обоих ВЭУ имеет смысл только в составе готового измерительного прибора с жестко фиксированными коллиматорами излучения, обеспечивающими воспроизводимость геометрии измерений.

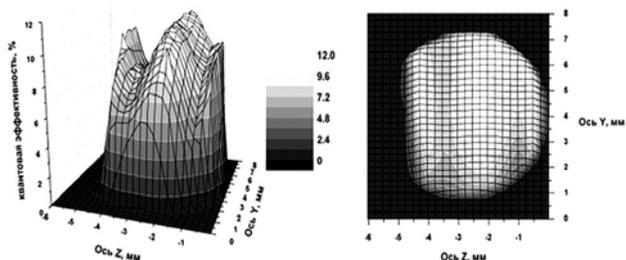


Рис. 3. Пространственная неоднородность чувствительности ВЭУ КСП.

Исследование радиационной стойкости кремниевых фотодиодов проводилось на станции "Космос". После измерения пространственной однородности чувствительности оба исследуемых детектора AXUV-100 и ФДУК-100УВ были подвергнуты облучению квазимонохроматическим пучком (спектральная полоса 150 – 300 эВ) СИ для исследования их радиационной стойкости.

Обнаружено, что детектор ФДУК-100УВ при почти 30-кратном превышении дозы облучения (по сравнению с дозой облучения для AXUV-100), не проявил никаких признаков деградации чувствительности. В то время как AXUV-100 продемонстрировал падение чувствительности примерно на 70% от первоначальной чувствительности. Важным результатом является факт, что деградация детектора произошла по значительной части поверхности, не подвергавшейся прямому излучению (рис. 4).

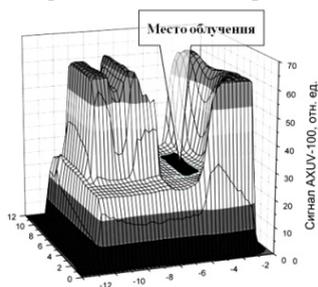


Рис. 4. Карта чувствительности AXUV-100 после облучения с поверхностной дозой 2,7 Дж/см²: энергия фотонов зондирующего пучка – 205 эВ; шаг сканирования – 250 мкм.

Информация, полученная в ходе выполнения работы, представляет существенный интерес для производителей детекторов.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В Приложениях представлены дополнительные материалы по диссертации: принципиальная схема управления АИМСИ, таблицы расчета оптического тракта монохроматизации для станции "Космос", таблицы с результатами калибровки детекторов типа СППД методом селективных фильтров.

Основные результаты, полученные в диссертации

В результате выполнения работ, описанных в диссертации, создан комплекс аппаратуры для проведения работ по абсолютной калибровке детекторов:

- метрологическая станция "Космос";
- действующий прототип абсолютного измерителя мощности СИ на основе ВТСП болометра.

На основе имеющегося аппаратного комплекса разработан и реализован на практике ряд методик для абсолютной калибровки детекторов в мягком рентгеновском диапазоне (100 – 1000 эВ):

- калибровка спектральной чувствительности методом селективных фильтров, методом эталонного детектора и методом самокалибровки;
- калибровка однородности чувствительности детекторов по их поверхности методом зондирующего монохроматического пучка;
- калибровка радиационной стойкости (разрушающий метод);
- методика построения функции спектральной чувствительности кремниевого фотодиода.

Кроме того, разработаны и реализованы на практике сопутствующие методики измерений в мягком рентгеновском диапазоне (100 эВ 1000 эВ):

- калибровка спектрального пропускания рентгеновских фильтров;
- калибровка полного потока СИ калориметрическим методом.

Аппаратно-методический комплекс, созданный на накопителе ВЭПП-4, позволяет проводить широкий круг метрологических работ, включающий в себя не только калибровки детекторов, но и возможность проведения рефлектометрических измерений, калибровки спектрометров и радиометров как единого целого, аттестацию фильтров, плоских и фокусирующих оптических элементов и т.д.

Накопитель ВЭПП-4 может быть использован как эталонный источник, создан независимый тепловой измеритель, позволяющий аттестовать этот

источник. Такое сочетание дает возможность в обозримой перспективе создать первичный эталон энергетической яркости и первичный эталон потока излучения и энергетической освещенности.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. A.N. Subbotin V.V. Gaganov, A.D. Nikolenko, et al. Absolute calibration of X-ray semiconductor detectors against synchrotron radiation of the VEPP-3 storage ring. // *Metrologia*. - 2000. - Vol. 37. - P.497-500.
2. Ancharov A.I., Baryshev V.B., Nikolenko A.D., et al. Status of the Siberian synchrotron radiation center. // *NIM A*. - 2005. - №1: Vol. A543. - P.1-13.
3. Chkhalo N.I., Evstigneev A.V., Nikolenko A.D., et al. The station for detector calibration in the soft X-ray range at the VEPP-2M storage ring. // *NIM A*. - 1995. - Section A: Vol. 359. - P.440-444.
4. I.A. Khrebtov V.G. Malyarov, K.V. Ivanov, D.A. Khokhlov, A. D. Nikolenko, and V.F. Pindyurin. Modeling the responses of a high-temperature superconductor bolometer for absolute measurements of synchrotron radiation. // *Opt. Technol.* - 2007. - T. 74. - C.479-484.
5. I.A. Khrebtov, V.G. Malyarov, A.D. Nikolenko, et al. Tests of Model of Absolute Measuring Instrument of Synchrotron Radiation Power. // *Key Engineering Materials*. - 2010. - Vol.437. - P.636-640.
6. Ivanov K.V. Khokhlov D.A., ... Nikolenko, et al. Characterization of the composite bolometer with a high-Tc superconductor thermometer for an absolute radiometer of synchrotron radiation. // *NIM A*. - 2007. - № 1/2: Vol.575. - P.272-275.
7. Khrebtov I.A., Tkachenko A.D.,... Nikolenko A.D., et al. Absolute high-Tc superconducting radiometer with electrical substitution for X-ray measurements. // *Journal de Physique*. - 2002. - Pr 3: Vol.12. - P.137-140.
8. S. Avakyan, I. Afanas'ev, N. Voronin, A. Nikolenko and V. Pindyurin. Absolute synchrotron radiation calibration for the Space Solar Patrol instrumentation. // *Metrologia*. - 2006. - Vol.43. - P.S105-S108.
9. Бухтияров В.И., Гаврилов Н.Г., Николенко А.Д., и др. Станция мягкого рентгеновского диапазона на синхротронном излучении из накопителя ВЭПП-3 для исследования многослойных структур. // *Поверхность*. - 2005. - Т. 8. - С.13-15.
10. Гаганов В.В., Коваленко Н.В., ...Николенко А.Д. и др., Измерение пропускания селективных поглощающих фильтров в диапазоне энергий фотонов от 0.6 до 1.5 кэВ. // *Поверхность*. - 2002. - Т.11. - С.21-25.
11. Гаганов В.В., Купер К.Е., Николенко А.Д., и др. Абсолютная калибровка рентгеновских полупроводниковых детекторов на синхротронном

излучении накопителя ВЭПП-2М в диапазоне энергий квантов от 0,3 до 1,6 кэВ. // Поверхность. - 2002. - Т.9. - С.36-39.

12. И.А. Хребтов, В.Г. Маляров, А.Д. Николенко и др., Моделирование характеристик высокотемпературного сверхпроводникового болометра для абсолютных измерений синхротронного излучения. // Оптический журнал. - 200. - №7: Т.74. - С.51-58.
13. Н.Г. Гаврилов, А.Г. Легкодымов, А.Д. Николенко и др. Двухзеркальный монохроматор ультрамягкого рентгеновского диапазона станции метрологии ВЭПП-2М с использованием многослойных зеркал. // Поверхность - 2000. - С.129-131.
14. П.Н. Аруев, В.В. Забродский, А.Д. Николенко и др. Предварительная калибровка полупроводниковых детекторов в области мягкого рентгеновского диапазона на синхротронном излучении из накопителя ВЭПП-4. // Поверхность. - 2010. - Т.2. - С.19-24.
15. Авакян С.В., Афанасьев И.М., Николенко А.Д. и др. Подготовка к калибровочным испытаниям аппаратуры "Космический солнечный патруль" на синхротронном источнике. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2006. - № 8: Т.49. - С.18-20.

НИКОЛЕНКО Антон Дмитриевич

**Абсолютная калибровка детекторов
в мягком рентгеновском диапазоне
с использованием
синхротронного излучения**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 29.04.2010 г.

Подписано в печать 3.05.2010 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 16

Обработано на ПК и отпечатано
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11