

Микро- и наноэлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 681.2.0821.083:535.2:543.063
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-71-80>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Использование синхротронного излучения отдельного электрона для спектрорадиометрии оптического диапазона

А.С. Сигов¹, Е.Р. Лазаренко²,
Н.Б. Голованова¹, О.А. Минаева^{1, @},
С.И. Аневский¹, Р.В. Минаев³,
П.Ю. Пушкин¹

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт), Москва, 125039 Россия

³ ООО «Электростекло», Москва, 119571 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: minaeva_o@mirea.ru

Резюме

Цели. Исследование метрологических характеристик источников и приемников оптического излучения в инфракрасной (ИК), видимой и ближней ультрафиолетовой (УФ) областях спектра в значительной мере основано на использовании уникальных метрологических свойств синхротронного излучения. Целью работы является развитие высокоточного метода определения числа ускоренных электронов накопительного кольца, основанного на использовании синхротронного излучения отдельного электрона для воспроизведения единиц величин спектрорадиометрии и фотометрии.

Методы. Определение числа ускоренных электронов позволяет для любого накопительного кольца рассчитать характеристики синхротронного излучения на длинах волн, намного больших критической длины волны, т.е. в видимой, ближней УФ- и ИК-областях спектра. Это обеспечивает возможность, вне зависимости от энергии электронов, определить нормированные на число электронов основные метрологические характеристики, такие как сила света, яркость, освещенность, сила излучения, энергетическая освещенность, энергетическая яркость и другие.

Результаты. Применение метода определения числа ускоренных электронов при малых токах электронного накопительного кольца позволяет обеспечить в широком динамическом диапазоне $1-10^{10}$ электронов на орбите значение суммарного среднеквадратического отклонения не более 0.01% для диапазона экспозиций приборов с зарядовой связью (ПЗС-матрицы) от 10^{-2} до $3 \cdot 10^3$ с.

Выводы. Применение радиометра-компаратора на основе телескопа с ПЗС-матрицей, откалиброванного по чувствительности на источнике синхротронного излучения, особенно актуально при контроле пороговых значений яркостного контраста и пространственного распределения яркости объекта и фона, а также определения метрологических характеристик оптико-электронных средств измерений, включая ПЗС-камеры, радиометры, спектрорадиометры и фотометры.

Ключевые слова: синхротронное излучение, порог чувствительности, яркостный контраст, пространственное распределение яркости, средства измерений

• Поступила: 05.06.2023 • Доработана: 23.06.2023 • Принята к опубликованию: 11.07.2023

Для цитирования: Сигов А.С., Лазаренко Е.Р., Голованова Н.Б., Минаева О.А., Аневский С.И., Минаев Р.В., Пушкин П.Ю. Использование синхротронного излучения отдельного электрона для спектрорадиометрии оптического диапазона. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):71–80. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-71-80>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Synchrotron radiation of a single electron application for optical spectroradiometry

Alexander S. Sigov¹, Evgenij R. Lazarenko²,
Natalia B. Golovanova¹, Olga A. Minaeva^{1, @},
Sergei I. Anevsky¹, Roman V. Minaev³,
Pavel Yu. Pushkin¹

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Federal Agency for Technical Regulation and Metrology (Rosstandart), Moscow, 125039 Russia

³ Elektrosteklo, Moscow, 119571 Russia

@ Corresponding author, e-mail: minaeva_o@mirea.ru

Abstract

Objectives. The investigations of optical radiation sources and metrological detector characteristics in the infrared (IR), visible, and air ultraviolet (UV) spectral regions are partially based on the unique metrological properties of synchrotron radiation. The aim of this work is to develop a high-precision method for determining the storage ring accelerated electron number with synchrotron radiation of a single electron to establish spectroradiometry and photometry units.

Methods. By determining the number of accelerated electrons, any storage ring can be used to calculate the synchrotron radiation characteristics at wavelengths of many large than the critical wavelength in the visible, air UV, and IR regions of the spectrum. This makes it possible to determine the main metrological characteristics normalized to the number of electrons, such as luminous intensity, luminance, illuminance, radiant power, radiance, irradiance, etc., regardless of the energy of the electrons.

Results. When applying the method for determining the number of accelerated electrons at low currents of the electronic storage ring, a total standard deviation of the number of accelerated electrons is less than 0.01% for an exposure range of the CCD matrix from 10^{-2} to $3 \cdot 10^3$ s in a wide dynamic range of $1-10^{10}$ electrons per orbit.

Conclusions. The use of a CCD-based radiometer-comparator calibrated by responsivity on a synchrotron radiation source is particularly relevant in monitoring luminance contrast thresholds and spatial distribution of object and background brightness, as well as determining metrological characteristics of optoelectronic measuring instruments, including CCD cameras, radiometers, spectroradiometers and photometers.

Keywords: synchrotron radiation, responsivity threshold, luminance contrast, luminance spatial distribution, measuring instruments

• Submitted: 05.06.2023 • Revised: 23.06.2023 • Accepted: 11.07.2023

For citation: Sigov A.S., Lazarenko E.R., Golovanova N.B., Minaeva O.A., Anevsky S.I., Minaev R.V., Pushkin P.Yu. Synchrotron radiation of a single electron application for optical spectroradiometry. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):71–80. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-71-80>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Решение актуальных задач спектрорадиометрии и фотометрии основано на использовании эталонных источников и приемников излучения в инфракрасной (ИК), видимой и ультрафиолетовой (УФ) областях спектра [1–3]. Методы спектрорадиометрии играют важную роль в различных областях науки и техники, включая диагностику плазмы, фотохимию и фотобиологию, астронавигацию, дистанционное зондирование Земли, диагностику солнечной активности, исследование свойств жидкостей в терагерцовом диапазоне, локацию удаленных объектов, наноэлектронику [4, 5].

Несмотря на успехи национальных метрологических институтов (НМИ) в создании эталонов спектрорадиометрии, существуют значительные трудности при оценке качества радиометров и фотометров, применяемых в научных исследованиях и при решении практических измерительных задач определения эффективности и опасности ультрафиолетового излучения, а также фотометрических характеристик излучателей на производстве, транспорте, в охране труда, санэпиднадзоре и других областях [6–8]. Международные ключевые сличения К2с абсолютной спектральной чувствительности эталонных приемников УФ-излучения, проведенные Международным бюро мер и весов, показали, что из 14 участников результаты сличений только НМИ Physikalisch-Technische Bundesanstalt¹ (Германия), ВНИИОФИ² (Россия) и NIST³ (США) соответствуют требованиям точности измерений в спектральном диапазоне 200–400 нм [9, 10].

В качестве первичных эталонов единиц фотометрии и спектрорадиометрии в ИК, видимой и ближней УФ областях спектра используются модели черного тела и источники синхротронного излучения [11, 12]. Ограничение яркостной температуры модели черного тела до 3500 К не позволяет расширить рабочий спектральный диапазон в коротковолновую УФ-область спектра, в то время как яркостная

температура синхротронного излучения регулируется за счет изменения энергии электронов от тысяч до десятков миллионов Кельвинов.

Воспроизведение и передача единиц фотометрии и спектрорадиометрии первичными эталонами связаны с рядом проблем, над которыми на протяжении многих лет работают ведущие НМИ. Так, для модели черного тела необходимы определение радиационной температуры, точная регистрация слабых потоков УФ-излучения на фоне мощного ИК-излучения, обеспечение равномерности излучающей области. Использование синхротрона в качестве эталонного излучателя требует повышения точности диагностики электронного пучка.

При применении криогенных радиометров в качестве первичных эталонных приемников основные погрешности связаны с низкой чувствительностью и теплообменом между приемной полостью, корпусом и сверхпроводящими элементами, а также с необходимостью сравнения потоков излучения в широком динамическом диапазоне [13]. Высокая интенсивность синхротронного излучения, отсутствие линий в спектре и высокая яркостная температура позволяют использовать, наряду с криогенным радиометром, эталонную ионизационную камеру и приемник Голя [14]. Кроме того, использование синхротронного излучения позволяет проводить метрологические исследования характеристик многослойных поверхностных покрытий и рассчитывать спектральную чувствительность вторичных эталонных приемников излучения с использованием зависимости сигналов приемников от энергии ускоренных электронов [15, 16].

Для решения проблем, возникающих при исследовании метрологических характеристик источников и приемников оптического излучения в ИК, видимой и ближней УФ областях спектра особый интерес представляет развитие работ, направленных на использование уникальных метрологических свойств синхротронного излучения.

РАДИОМЕТРИЯ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Спектральные энергетические характеристики синхротронного излучения рассчитываются с высокой точностью по результатам измерений радиуса электронной орбиты, энергии и числа ускоренных электронов [17]. Распределение спектральной

¹ <https://www.ptb.de/cms/en.html>. Дата обращения 05.06.2023. / Accessed June 05, 2023.

² Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений. <https://www.vniiofi.ru/> (in Russ.). Дата обращения 05.06.2023. / Accessed June 05, 2023.

³ National Institute of Standards and Technology. <https://www.nist.gov/>. Дата обращения 05.06.2023. / Accessed June 05, 2023.

плотности энергетической яркости (СПЭЯ) синхротронного излучения по излучающей области описывается следующим выражением:

$$L(x, y) = \frac{27Ne^2c}{32\pi^3R^3D\sigma_{x'}\sigma_{y'}} (\lambda_c/\lambda)^4 \gamma^8 [1 + (\gamma\Psi)^2]^2 \times \left\{ K_{2/3}^2(\xi) + K_{1/3}^2(\xi)(\gamma\Psi)^2 / [1 + (\gamma\Psi)^2] \right\} \times \exp \left[-\frac{(x' - x'_0)^2}{2\sigma_{x'}^2} - \frac{(y' - y'_0)^2}{2\sigma_{y'}^2} \right], \quad (1)$$

где L – СПЭЯ синхротронного излучения ($\text{Вт}/\text{м}^3 \cdot \text{ср}$); x', y' – координаты двумерной излучающей области в плоскости орбиты и перпендикулярной плоскости; x'_0, y'_0 – координаты максимума распределения СПЭЯ синхротронного излучения; N – число ускоренных электронов; $\gamma = E/E_0$ – релятивистский фактор; E – энергия ускоренного электрона, $E_0 = 0.511 \text{ МэВ}$ – энергия покоя электрона; e – заряд электрона; c – скорость света; R – радиус орбиты электрона в точке излучения; D – интеграл двумерного гауссова распределения; $\sigma_{x'}, \sigma_{y'}$ – среднеквадратическое отклонение пространственного распределения СПЭЯ электронного сгустка в плоскости орбиты и перпендикулярной плоскости; $\lambda_c = (4/3)\pi R\gamma^3$ – критическая длина волны; λ – длина волны; Ψ – угол отклонения от плоскости орбиты; $K_{1/3}, K_{2/3}$ – модифицированные функции Бесселя (функции Макдональда); $\xi = [\lambda_c/(2\lambda)][1 + (\gamma\Psi)^2]^{3/2}$ – аргумент.

Интеграл двумерного гауссова распределения D рассчитывается по формуле:

$$D = \iint \frac{1}{2\pi\sigma_{x'}\sigma_{y'}} \exp \left[-\frac{(x' - x'_0)^2}{2\sigma_{x'}^2} - \frac{(y' - y'_0)^2}{2\sigma_{y'}^2} \right] dx' dy'.$$

На рис. 1 представлена зависимость модифицированных функций Бесселя (функции Макдональда) $K_{1/3}, K_{2/3}$ от длины волны, нормированной на критическую длину волны λ_c спектра синхротронного излучения [17].

Уравнение (1) описывает спектральное и угловое распределения энергетической яркости в поляризационных σ - и π -компонентах синхротронного излучения. Вектор поляризации σ -компонента лежит в плоскости электронной орбиты, перпендикулярной вектору индукции отклоняющего магнитного поля и описывается первым слагаемым уравнения (1), а вектор поляризации π -компонента лежит в плоскости, параллельной вектору индукции магнитного поля и описывается вторым слагаемым.

Интегрирование уравнения (1) по излучающей области электронного сгустка и углу отклонения

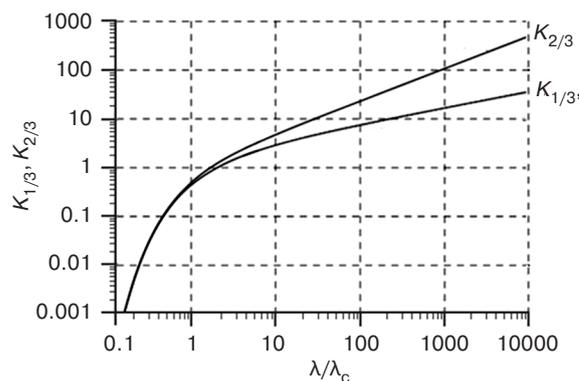


Рис. 1. Зависимость модифицированных функций Бесселя (функции Макдональда) $K_{1/3}, K_{2/3}$ от длины волны

от плоскости электронной орбиты позволяет получить универсальную функцию $f(\lambda/\lambda_0)$ спектрального распределения потока синхротронного излучения [18].

Использование универсальной функции, представленной на рис. 2, позволяет рассчитать характеристики синхротронного излучения, задавая критическую длину волны λ_c электронных накопительных колец.

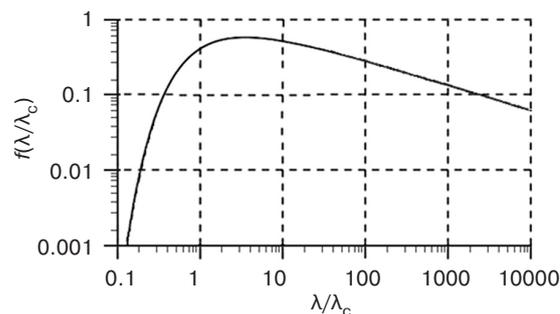


Рис. 2. Универсальная функция спектрального распределения потока синхротронного излучения

Энергия электронов электронного накопительного кольца определяется по результатам абсолютных измерений индукции магнитного поля в излучающей точке электронной орбиты или по длине волны обратного комптоновского рассеяния фотонов на ускоренных электронах, а также с использованием относительных спектральных измерений потока синхротронного излучения. Радиус орбиты электронного накопительного кольца определяется частотой ускоряющего высокочастотного поля.

Определение числа ускоренных электронов с высокой точностью является наиболее важной и сложной задачей спектрометрики синхротронного излучения. На источниках синхротронного излучения число ускоренных электронов НМИ измерялось сравнением СПЭЯ модели черного тела и синхротрона в видимой области спектра, т.е. для спектрометрии использовалось относительное спектральное

распределение энергетической яркости синхротронного излучения с абсолютизацией в видимом диапазоне по модели черного тела. На протяжении ряда лет с использованием источников синхротронного излучения для спектрорадиометрии и фотометрии проводилась разработка точного метода измерений числа электронов с погрешностью, не превышающей сотые доли процента. Метод измерений числа частиц основан на Фурье-преобразовании сигнала телескопа с ПЗС-матрицей, пропорционального СПЭЯ синхротронного излучения при выделении отдельного электрона на релятивистской орбите электронного накопительного кольца с фильтрацией высокочастотных пространственных гармоник для обеспечения широкого диапазона линейности чувствительности приемника излучения.

РАДИОМЕТР-КОМПАРАТОР

Радиометр-компаратор (производство – Россия) включает ахроматический телескоп-рефрактор с фокусным расстоянием 6 м и апертурой 150 мм, содержащий охлаждаемую ПЗС-матрицу, комплект интерференционных фильтров для УФ-, видимого и ИК-диапазонов спектра, а также светофильтров для коррекции спектральной чувствительности в соответствии с относительной спектральной световой эффективностью монохроматического излучения [19]. Использование охлаждаемой ПЗС-матрицы при вычитании темнового сигнала обеспечивает возможность измерений при снижении тока пучка в широком диапазоне экспозиций от 0.1 до 4000 с. Общий вид радиометра-компаратора на канале синхротронного излучения представлен на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид радиометра-компаратора на канале синхротронного излучения

Охлаждаемая ПЗС-матрица включает 3326×2504 пикселей размером 5.4×5.4 мкм с 16-битной дискретизацией значений сигналов. Радиометр-компаратор устанавливается на белом канале электронного накопительного кольца без монохроматизации

синхротронного излучения на фиксированном расстоянии от излучающей точки орбиты.

ИЗМЕРЕНИЕ ЧИСЛА ЭЛЕКТРОНОВ НА ОРБИТЕ

Поток синхротронного излучения характеризуется однородным угловым распределением в горизонтальной плоскости электронной орбиты и имеет сложную угловую зависимость интенсивности поляризационных компонентов и степени поляризации в вертикальной плоскости [18]. Влияние осевых колебаний электронов сгустка дополнительно усложняет угловую зависимость интенсивности поляризационных компонентов в вертикальном направлении, определяемую сверткой углового распределения синхротронного излучения отдельного электрона и распределением электронов сгустка по углам отклонения от плоскости орбиты. Выбор апертуры телескопа определяется необходимостью интегрирования потока синхротронного излучения в вертикальной плоскости по приемной поверхности ПЗС-матрицы.

Для исключения искажений распределения энергетической освещенности, фиксируемой при интегрировании сигналов пикселей ПЗС-матрицы, чувствительность пикселей выравнивается для устранения зонной неоднородности коэффициента пропускания телескопа. На рис. 4 представлено распределение сигналов пикселей ПЗС-матрицы, соответствующее гауссову распределению энергетической яркости по излучающей области синхротрона.

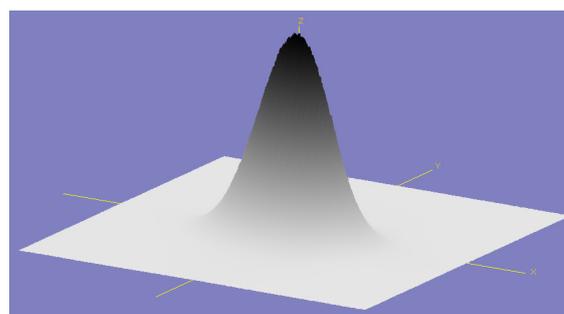


Рис. 4. Распределение сигналов пикселей ПЗС-матрицы

Изображение на ПЗС-матрице формируется при многократном прохождении электронов по релятивистской орбите. Для снижения влияния шумов ПЗС-матрицы при регистрации малых потоков синхротронного излучения используется прямое и обратное Фурье-преобразования с фильтрацией высокочастотных пространственных гармоник. Расчет энергетических характеристик синхротронного излучения отдельного электрона позволяет оценить уровень шумов и порог чувствительности

радиометра-компаратора, составляющий не более 10^{-10} Вт/(нм·м²·ср). Важным метрологическим свойством синхротронного излучения является идеальное гауссово распределение СПЭЯ по излучающей области электронного накопительного кольца за счет осевых, радиальных и фазовых колебаний электронов сгустка. При уменьшении числа электронов пропорционально снижается интегральный сигнал. При этом относительное распределение энергетической яркости по излучающей области не изменяется, что позволяет использовать гауссово распределение для получения равномерной чувствительности радиометра-компаратора по приемной поверхности ПЗС-матрицы.

Регулировка тока электронного пучка накопительного кольца в широком динамическом диапазоне проводится при контроле относительного числа электронов по интегральному потоку синхротронного излучения без изменений спектрального и углового распределения. Впервые регистрация отдельного электрона на орбите проводилась на электронном накопительном кольце первого поколения с использованием фотоумножителя. При выделении на орбите отдельного электрона для высокоточного воспроизведения единиц спектро-радиометрии и фотометрии СПЭЯ синхротронного излучения имеет гауссово распределение за счет высокой частоты обращения электрона, что позволяет исключить при регистрации сигнала высшие пространственные гармоники, т.е. кардинально снизить уровень шума и повысить точность при интегрировании сигналов пикселей в широком диапазоне экспозиций от миллисекунд до одного часа с применением прямого и обратного Фурье-преобразования при фильтрации высокочастотных пространственных гармоник.

В первую очередь необходимо обеспечить диапазон линейности чувствительности ПЗС-матрицы в десяти порядках величины с учетом случайных и систематических погрешностей определения времени срабатывания затвора, шумов считывания сигналов и возможного насыщения зарядов пикселей. Измерение сигнала ПЗС-матрицы проводится при изменении времени экспозиции, но при постоянном значении потока синхротронного излучения. Высокая стабильность энергетических характеристик синхротронного излучения при фиксированном токе электронного пучка позволяет сравнивать сигналы ПЗС-матрицы даже при максимальных экспозициях.

В начале цикла измерений абсолютного числа электронов с использованием потока синхротронного излучения отдельного электрона выбор минимальной экспозиции ПЗС-матрицы соответствует максимальному току пучка электронного

накопительного кольца. Последовательное снижение тока электронного пучка и снижение сигнала, пропорционального потоку синхротронного излучения, компенсируется за счет увеличения времени экспозиции. Различие сигналов, полученных до снижения тока и после увеличения экспозиции, свидетельствует о нелинейной зависимости чувствительности ПЗС-матрицы от времени экспозиции, что требует введения поправочных коэффициентов. Для снижения тока электронного пучка используется скрайбер, что позволяет ступенчато удалять электроны с орбиты накопительного кольца, так, чтобы на орбите остался последний электрон, который может удерживаться в течение нескольких часов.

На рис. 5 показано ступенчатое изменение сигналов ПЗС-матрицы при удалении электронов с орбиты электронного накопительного кольца.

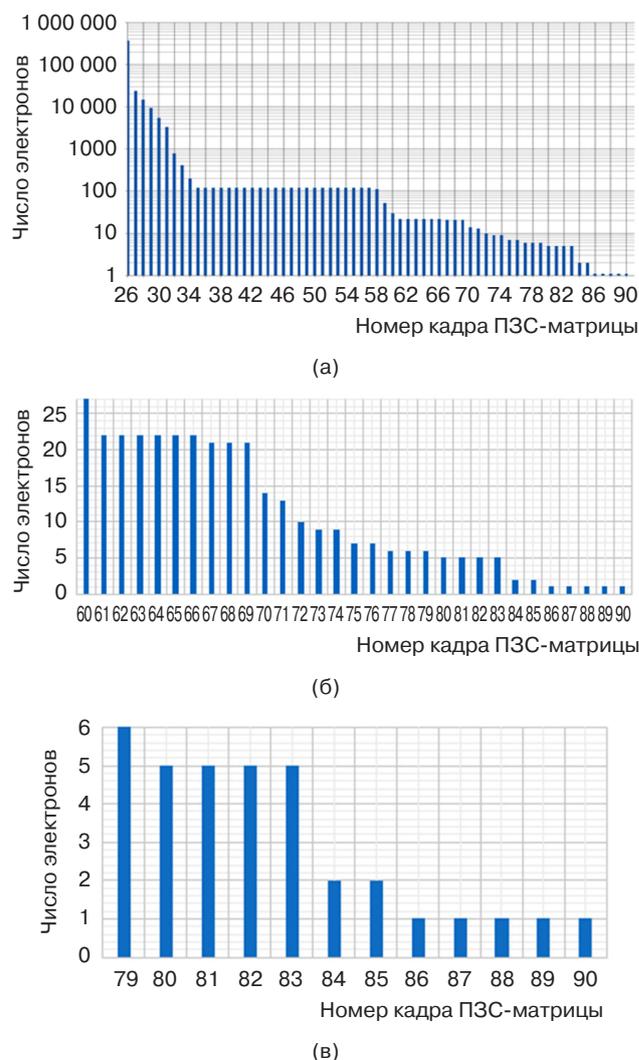


Рис. 5. Диаграмма ступенчатого снижения сигналов ПЗС-матрицы при удалении электронов с орбиты:
(а) диаграмма от 400 000 до 1 электрона;
(б) фрагмент диаграммы от 27 до 1 электрона;
(в) фрагмент диаграммы от 6 до 1 электрона

На рис. 5а в логарифмическом масштабе показано ступенчатое изменение сигнала ПЗС-матрицы, пропорционального числу электронов на орбите, начиная с 26-го кадра, с сигнала в 400 000 относительных единиц. С 26-го по 35-й кадр с использованием скрайбера сигнал быстро снижался до 110 единиц. Для оценки среднеквадратического отклонения (СКО) сигналов ПЗС-матрицы с 35-го по 57-й кадр на протяжении нескольких часов проверялась стабильность потока синхротронного излучения. За это время электронный ступок не потерял ни одного электрона, и СКО сигналов не превышало 0.01%. Кадры 58 и 60 иллюстрируют снижение сигнала в 5 раз, и с 61-го кадра повторялась проверка стабильности потока синхротронного излучения с оценкой СКО сигналов.

На рис. 5б в линейном масштабе при ступенчатом снижении сигналов на 67-м, 72-м, 78-м и 80-м кадрах отмечено наименьшее снижение сигналов, кратное ступенчатым изменениям сигналов и соответствующее потоку синхротронного излучения отдельного электрона.

На рис. 5в в линейном масштабе показаны результаты сравнения сигналов последних кадров, где на 80-м кадре удален один электрон и на орбите осталось пять электронов. После проверки стабильности сигналов на 84-м кадре скрайбером удаляются сразу три электрона, и сигнал соответствует оставшимся двум электронам. После 85-го кадра с орбиты удаляется еще один электрон, и на 86-м кадре сигнал ПЗС-матрицы соответствует одному электрону, который удерживается на орбите длительное время, что позволяет связать чувствительность ПЗС-матрицы с потоком синхротронного излучения отдельного электрона. Определение соотношения сигналов на последних кадрах, показанных на рис. 5в, позволяет точно указать число электронов для каждого снятого кадра и выбрать на графиках масштаб, при котором относительная единица сигнала соответствует потоку синхротронного излучения отдельного электрона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод определения числа ускоренных электронов накопительного кольца, основанный на использовании синхротронного излучения отдельного электрона, предназначен для диагностики электронного ступка при воспроизведении единиц величин спектрорадиометрии и фотометрии на основе фундаментальных физических констант – заряда электрона и скорости света в вакууме. При определении числа электронов от 1 до 10^{10} в диапазоне экспозиций от 10^{-2} до $3 \cdot 10^3$ с суммарное СКО не превышает 0.01%.

Разработанный метод позволяет для любого электронного накопительного кольца рассчитать СПЭЯ синхротронного излучения на длинах волн, значительно больших критической длины волны, т.е. в видимой, ближней УФ- и ИК-областях спектра. Это обеспечивает возможность, вне зависимости от энергии электронов, определить нормированные на число электронов основные метрологические характеристики, такие как сила света, яркость, освещенность, сила излучения, энергетическая освещенность, энергетическая яркость и другие. Таким образом, спектрорадиометрические и фотометрические характеристики синхротронного излучения в видимой, ближней УФ- и ИК-областях спектра, нормированные на число ускоренных электронов, являются неизменными константами для каждого электронного накопительного кольца.

Применение радиометра-компаратора на основе телескопа с ПЗС-матрицей, откалиброванного по чувствительности на источнике синхротронного излучения, особенно актуально при контроле пороговых значений яркостного контраста и пространственного распределения яркости объекта и фона, а также определения метрологических характеристик оптико-электронных средств измерений, включая ПЗС-камеры, радиометры, спектрорадиометры и фотометры.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Элькин Г.И., Саламатов В.Ю., Крутиков В.Н., Новиков Н.Ю. Состояние и основные направления работ в области обеспечения единства измерений в Российской Федерации. *Законодательная и прикладная метрология*. 2010;3:5–10. URL: <https://metrob.ru/html/Stati/metrolob/npravlenia.html>
2. Аневский С.И., Минаева О.А., Крутиков В.Н., Минаев Р.В. и др. *Метрологическое обеспечение нанотехнологий и продукции наноиндустрии*. М.: Издательство «Логос»; 2011. 592 с.

REFERENCES

1. El'kin G.I., Salamatov V.Yu., Krutikov V.N., Novikov N.Yu. The state and main directions of work in the field of ensuring the uniformity of measurements in the Russian Federation. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya = Legislative and Applied Metrology*. 2010;3:5–10 (in Russ.). Available from URL: <https://metrob.ru/html/Stati/metrolob/npravlenia.html>
2. Anevskii S.I., Minaeva O.A., Krutikov V.N., Minaev R.V., et al. *Metrological Support of Nanotechnologies and Nanoindustry Products*. Moscow: Logos; 2011. 592 p. (in Russ.).

3. Richter M., Ulm G. Metrology with Synchrotron Radiation. In: Jaeschke E., Khan S., Schneider J., Hastings J. (Eds.). *Synchrotron Light Sources and Free-Electron Lasers*. Springer; 2020. P. 1–35. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04507-8_63-1
4. Shevelko A.P. Spectral instruments for x-ray and VUV plasma diagnostics. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018;1115(2):022042. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/2/022042>
5. Torretti F., Liu F., Bayraktar M., Scheers J., Bouza Z., Ubachs W., Hoekstra R., Versolato O. Spectral characterization of an industrial EUV light source for nanolithography. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2019;53(5):055204. <http://doi.org/10.1088/1361-6463/ab56d4>
6. Berni L.Â., Vilela W.A., Beloto A.F., de Sena F.O. System for measuring the angular response of radiometers. In: *Proc. 8th Iberoamerican Optics Meeting and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications*. 2013. V. 8785. <https://doi.org/10.1117/12.2019888>
7. Fryc I. Spectral correction of detector used in illuminance measurements. In: *Proc. 11th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics (SPIE 3820)*. 1999. V. 3820. P. 343–348. <https://doi.org/10.1117/12.353083>
8. Han L. The principle and characteristics of photoelectric sensors. *Science and Technology Innovation and Application*. 2020;10:77–78.
9. Lutz W. The CCPR K2.c key comparison of spectral responsivity from 200 nm to 400 nm. *Metrologia*. 2014;51(6):S336. <http://doi.org/10.1088/0026-1394/51/6/S336>
10. Аневский С.И., Золотаревский Ю.М., Иванов В.С., Крутиков В.Н., Минаева О.А., Минаев Р.В. Спектро-радиометрия ультрафиолетового излучения. *Измерительная техника*. 2015;11:26–30.
11. König S., Gutschwager B., Taubert R.D., Hollandt J. Metrological Characterization and Calibration of Thermographic Cameras for Quantitative temperature measurement. *Sens. Sens. Syst.* 2020;9(2):425–442. <https://doi.org/10.5194/jsss-9-425-2020>
12. Gottwald A., Krumrey M., Scholze F., et al. Metrology with synchrotron radiation at PTB. *Eur. Phys. J. Plus*. 2022;137(11):1238. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-03417-9>
13. Woods S., Neira J., Proctor J., Rice J., Tomlin N., White M., Stephens M., Lehman J. Generalized Electrical Substitution Methods and Detectors for Absolute Optical Power Measurements. *Metrologia*. 2022;59(4):044002. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ac72dc>
14. Anevsky S., Ivanov V., Kuznetsov V., Minaeva O., et al. Primary UV-radiation detector standards. *Metrologia*. 2003;40(1):S25. <http://doi.org/10.1088/0026-1394/40/1/307>
15. Сигов А.С., Минаева О.А., Лебедев А.М., Минаев Р.В. Метрологические исследования характеристик многослойных поверхностных покрытий с использованием синхротронного излучения. *Russ. Technol. J.* 2021;9(2): 38–46. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-38-47>
16. Сигов А.С., Голованова Н.Б., Минаева О.А., Аневский С.И., Шамин Р.В., Останина О.И. Решение актуальных задач спектрорадиометрии с использованием синхротронного излучения. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):34–44. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-34-44>
3. Richter M., Ulm G. Metrology with Synchrotron Radiation. In: Jaeschke E., Khan S., Schneider J., Hastings J. (Eds.). *Synchrotron Light Sources and Free-Electron Lasers*. Springer; 2020. P. 1–35. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04507-8_63-1
4. Shevelko A.P. Spectral instruments for x-ray and VUV plasma diagnostics. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018;1115(2):022042. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/2/022042>
5. Torretti F., Liu F., Bayraktar M., Scheers J., Bouza Z., Ubachs W., Hoekstra R., Versolato O. Spectral characterization of an industrial EUV light source for nanolithography. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2019;53(5):055204. <http://doi.org/10.1088/1361-6463/ab56d4>
6. Berni L.Â., Vilela W.A., Beloto A.F., de Sena F.O. System for measuring the angular response of radiometers. In: *Proc. 8th Iberoamerican Optics Meeting and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications*. 2013. V. 8785. <https://doi.org/10.1117/12.2019888>
7. Fryc I. Spectral correction of detector used in illuminance measurements. In: *Proc. 11th Slovak-Czech-Polish Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics (SPIE 3820)*. 1999. V. 3820. P. 343–348. <https://doi.org/10.1117/12.353083>
8. Han L. The principle and characteristics of photoelectric sensors. *Science and Technology Innovation and Application*. 2020;10:77–78.
9. Lutz W. The CCPR K2.c key comparison of spectral responsivity from 200 nm to 400 nm. *Metrologia*. 2014;51(6):S336. <http://doi.org/10.1088/0026-1394/51/6/S336>
10. Anevskii S.I., Zolotarevskii Y.M., Ivanov V.S., et al. Spectroradiometry of ultraviolet radiation. *Meas. Tech.* 2016;28(11):1216–1222. <http://doi.org/10.1007/s11018-016-0873-9>
[Original Russian Text: Anevskii S.I., Zolotarevskii Yu.M., Ivanov V.S., Krutikov V.N., Minaeva O.A., Minaev R.V. Spectroradiometry of ultraviolet radiation. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2015;11:26–30 (in Russ.).]
11. König S., Gutschwager B., Taubert R.D., Hollandt J. Metrological Characterization and Calibration of Thermographic Cameras for Quantitative temperature measurement. *Sens. Sens. Syst.* 2020;9(2):425–442. <https://doi.org/10.5194/jsss-9-425-2020>
12. Gottwald A., Krumrey M., Scholze F., et al. Metrology with synchrotron radiation at PTB. *Eur. Phys. J. Plus*. 2022;137(11):1238. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-03417-9>
13. Woods S., Neira J., Proctor J., Rice J., Tomlin N., White M., Stephens M., Lehman J. Generalized Electrical Substitution Methods and Detectors for Absolute Optical Power Measurements. *Metrologia*. 2022;59(4):044002. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ac72dc>
14. Anevsky S., Ivanov V., Kuznetsov V., Minaeva O., et al. Primary UV-radiation detector standards. *Metrologia*. 2003;40(1):S25. <http://doi.org/10.1088/0026-1394/40/1/307>
15. Sigov A.S., Minaeva O.A., Anevsky S.I., Lebedev A.M., Minaev R.V. Metrological studies of the characteristics of multilayer surface coatings using synchrotron radiation. *Russ. Technol. J.* 2021;9(1):38–47 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-38-47>

17. Schwinger J. On the Classical Radiarion of Accelerated Electrons. *Phys. Rev.* 1949;75(12):1912. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.75.1912>
18. Wiedemann H. *Particle Accelerator Physics*. Springer Science & Business Media; 2007. P. 815–894.
19. Аневский С.И., Золотаревский Ю.М., Крутиков В.Н., Лебедев А.М., Минаев Р.В., Сенин Д.С., Станкевич В.Г. Использование эталонного источника синхротронного излучения для калибровки чувствительности телескопа с ПЗС-матрицей с высоким угловым разрешением. *Измерительная техника*. 2015;5:33–36.
16. Sigov A.S., Golovanova N.B., Minaeva O.A., Anevsky S.I., Shamin R.V., Ostanina O.I. Solution of topical specroradiometric problems using synchrotron radiation. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):34–44 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-34-44>
17. Schwinger J. On the Classical Radiarion of Accelerated Electrons. *Phys. Rev.* 1949;75(12):1912. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.75.1912>
18. Wiedemann H. *Particle Accelerator Physics*. Springer Science & Business Media; 2007. P. 815–894.
19. Anevskii S.I., Zolotarevskii Y.M., Krutikov V.N., et al. The Use of a Standard Source of Synchrotron Radiation for Calibration of the Sensitivity of a Telescope with CCD Array and High Angular Resolution. *Meas. Tech.* 2015;58(5):520–525. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0747-6>
[Original Russian Text: Anevskii S.I., Zolotarevskii Yu.M., Krutikov V.N., Lebedev A.M., Minaev R.V., Senin D.S., Stankevich V.G. The Use of a Standard Source of Synchrotron Radiation for Calibration of the Sensitivity of a Telescope with CCD Array and High Angular Resolution *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2015;5:33–36 (in Russ.).]

Об авторах

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, президент ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sigov@mirea.ru. ResearcherID L-4103-2017, Scopus Author ID 35557510600, SPIN-код РИНЦ 2869-5663, https://www.researchgate.net/profile/A_Sigov

Лазаренко Евгений Русланович, заместитель руководителя Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) (125039, Россия, Москва, Пресненская наб., д. 10, стр. 2). E-mail: elazarenko@rst.gov.ru.

Голованова Наталия Борисовна, д.э.н., профессор, заместитель первого проректора ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: golovanova@mirea.ru. Scopus Author ID 57191447039, SPIN-код РИНЦ 7197-9948, <https://orcid.org/0000-0002-9901-8897>

Минаева Ольга Александровна, д.т.н., заведующий кафедрой метрологии и стандартизации Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: minaeva_o@mirea.ru. Scopus Author ID 6603019847, SPIN-код РИНЦ 5081-1976, <https://orcid.org/0000-0001-9465-3210>

Аневский Сергей Иосифович, д.т.н., профессор кафедры метрологии и стандартизации Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: anevskij@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9197-0034>

Минаев Роман Владимирович, к.т.н., начальник научно-исследовательского отдела ООО «Электростекло» (119571, Россия, Москва, ул. 26-ти Бакинских Комиссаров, д. 5). E-mail: minaev@elktrosteklo.ru. Scopus Author ID 22235214600, <https://orcid.org/0009-0009-6335-5531>

Пушкин Павел Юрьевич, к.т.н., директор Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: pushkin@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 9901-4887, <https://orcid.org/0000-0003-3684-550X>

About the authors

Alexander S. Sigov, Academician of the RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, President of the MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sigov@mirea.ru. ResearcherID L-4103-2017, Scopus Author ID 35557510600, RSCI SPIN-code 2869-5663, https://www.researchgate.net/profile/A_Sigov

Evgenij R. Lazarenko, Deputy Head of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology (Rosstandart) (10/2, Presnenskaya nab., Moscow, 125039 Russia). E-mail: elazarenko@rst.gov.ru.

Natalia B. Golovanova, Dr. Sci. (Econ.), Deputy First Vice-Rector, MIREA – Russian Technological University, (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia) E-mail: golovanova@mirea.ru. Scopus Author ID 57191447039, RSCI SPIN-code 7197-9948, <https://orcid.org/0000-0002-9901-8897>

Olga A. Minaeva, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Metrology and Standardization, Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: minaeva_o@mirea.ru. Scopus Author ID 6603019847, RSCI SPIN-code 5081-1976, <https://orcid.org/0000-0001-9465-3210>

Sergei I. Anevsky, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Metrology and Standardization, Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: anevskij@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9197-0034>

Roman V. Minaev, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Research Department, Elektrosteklo (5, 26 Bakinskikh Komissarov ul., Moscow, 119571 Russia). E-mail: minaev@elktrosteklo.ru. Scopus Author ID 22235214600, <https://orcid.org/0009-0009-6335-5531>

Pavel Yu. Pushkin, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: pushkin@mirea.ru. RSCI SPIN-code 9901-4887, <https://orcid.org/0000-0003-3684-550X>