

УДК 535-3, 535.314

Получение изображения объектов во вторичных рентгеновских лучах с использованием пинхол камеры

Дудчик Ю.И.¹, Хилько Г.И.¹, Ломашко Ю.К.²

¹Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета, ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

²Белорусский государственный университет, ул. Курчатова, 5, 220064, г. Минск, Беларусь

Поступила 19.05.2016

Принята к печати 05.08.2016

Пинхол камера, или камера-обскура, является одним из элементов оптики рентгеновского диапазона спектра. Камера используется для получения изображения синхротронных и лабораторных источников излучения, а также в качестве объектива в методе рентгеновской флуоресцентной микроскопии. Этот метод позволяет получать информацию о пространственном распределении различных химических элементов на площади в несколько квадратных сантиметров с пространственным разрешением на уровне 50–100 мкм. В качестве приемных устройств используются энергодисперсионные цифровые двумерные ПЗС камеры (камеры на основе элементов с зарядовой связью). Такие камеры являются дорогостоящими устройствами и имеют низкую чувствительность для рентгеновских лучей с энергией фотонов выше 8 кэВ. Поэтому перспективно использовать для целей рентгеновской флуоресцентной микроскопии более эффективные ПЗС камеры со слоем сцинтиллятора. Цель данной работы состояла в разработке устройства для получения изображения объектов во вторичных флуоресцентных рентгеновских лучах с использованием пинхол камеры как объектива и цифровой ПЗС камеры для регистрации рентгеновского изображения. Такое устройство разработано. Оно состоит из рентгеновской трубки, пинхол камеры и двумерной цифровой рентгеновской ПЗС камеры. Объект исследования облучался излучением от рентгеновской трубки и испускал вторичные рентгеновские лучи. Пинхол камера с размером отверстия 100 мкм использовалась для формирования изображения объекта во вторичных рентгеновских лучах на входном окне двумерной цифровой рентгеновской камеры. С использованием устройства получены изображения ряда железных пружин, отличающиеся размерами. Установлено, что пространственная разрешающая способность устройства составляет около 200 мкм при экспозиции 60 с. Улучшить разрешение системы можно за счет увеличения экспозиции, оптимизации условий съемки и уменьшения размера отверстия пинхол камеры.

Ключевые слова: рентгеновские лучи, пинхол камера, рентгеновская ПЗС камера.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-169-175

Адрес для переписки:

Дудчик Ю.И.
Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь
e-mail: dudchik@bsu.by

Address for correspondence:

Dudchik Yu.I.
A.N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems,
Belarusian State University,
Kurchatov str., 7, 220045, Minsk, Belarus
e-mail: dudchik@bsu.by

Для цитирования:

Дудчик Ю.И., Хилько Г.И., Ломашко Ю.К.
Получение изображения объектов во вторичных рентгеновских лучах с использованием пинхол камеры.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 2. – С. 169–175.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-169-175

For citation:

Dudchik Yu.I., Hilko G.I., Lomashko Yu.K.
[Fluorescent X-ray imaging with pinhole camera].
Pribory i metody izmerenij
[Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 2, pp. 169–175 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-169-175

Fluorescent X-ray imaging with pinhole camera

Dudchik Yu.I.¹, Hilko G.I.¹, Lomashko Yu.K.²

¹A.N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarusian State University,
Kurchatov str., 7, 220045, Minsk, Belarus

²Belarusian State University,
Kurchatov str., 5, 220064, Minsk, Belarus

Received 19.05.2016

Accepted for publication 05.08.2016

Abstract. Pinhole camera is one of X-ray optics devices. The pinhole camera is used for obtaining the image of synchrotron and laboratory sources, and also as a lens in a method of X-ray fluorescent microscopy. This method allows to obtain information on a spatial distribution of various chemical elements to the areas of several square centimeters with spatial resolution at the level of 50–100 μm . As a rule energy-dispersive two-dimensional CCD cameras are used for imaging. Such cameras are expensive devices and have low sensitivity for X-rays with energy of photons higher than 8 keV. Therefore it is perspective to use for X-ray fluorescent microscopy more effective CCD cameras with a scintillator layer. The purpose of this work consists in development of the device for imaging with secondary fluorescent X-rays by using pinhole as a lens and CCD camera for registration of the X-ray image. The device for obtaining the image of objects in secondary X-rays is developed. The device consists of an X-ray tube, pinhole and CCD camera. The object of research was irradiated with radiation from the X-ray tube and emits secondary X-rays. 100-microns pinhole was used for formation of the image of the object at an entrance window of the CCD camera. Images of a number of the iron springs differing in the sizes are received. It is established that the spatial resolution of the device is about 200 μm at an exposition of 60 s. It is possible to improve permission of the device by increasing in an exposition, optimization imaging conditions and reduction of the pinhole size.

Keywords: X-rays, pinhole camera, X-ray CCD-camera.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-169-175

Адрес для переписки:

Дудчик Ю.И.
Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь
e-mail: dudchik@bsu.by

Address for correspondence:

Dudchik Yu.I.
A.N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems,
Belarusian State University,
Kurchatov str., 7, 220045, Minsk, Belarus
e-mail: dudchik@bsu.by

Для цитирования:

Дудчик Ю.И., Хилько Г.И., Ломашко Ю.К.
Получение изображения объектов во вторичных рентгеновских
лучах с использованием пинхол камеры.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 2. – С. 169–175.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-169-175

For citation:

Dudchik Yu.I., Hilko G.I., Lomashko Yu.K.
[Fluorescent X-ray imaging with pinhole camera].
Pribory i metody izmerenij
[Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 2, pp. 169–175 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-169-175

Введение

Пинхол камера, или камера-обскура, является одним из элементов оптики видимого и рентгеновского диапазонов спектра, которые позволяют получать изображения объектов и источников излучения [1]. Пинхол камера представляет собой отверстие радиусом R в непрозрачном для излучения экране, которое работает как объектив с пространственным разрешением порядка R . При уменьшении R разрешение объектива увеличивается, но уменьшается его светосила. При дальнейшем уменьшении радиуса отверстия существенную роль начинают играть дифракционные эффекты, которые приводят к размытию изображения, поэтому существует оптимальное значение величины R [2]. В области видимого излучения пинхол камера является, скорее, экзотическим элементом из-за малой светосилы, хотя существует целое направление в фотографии с использованием пинхол камеры в качестве объектива фотоаппарата. Основное преимущество пинхол камеры – отсутствие хроматических аберраций.

В области рентгеновского диапазона спектра пинхол камера вплоть до недавнего времени являлась чуть ли не единственным оптическим элементом для получения изображения как синхротронных источников излучения [3], так и фокусного пятна рентгеновской трубки [4] с пространственным разрешением около 5–10 мкм для рентгеновских лучей с энергией фотонов в диапазоне 1–30 кэВ. Улучшить пространственное разрешение рентгеновского пинхола до величины в 1 мкм проблематично, что связано не только с небольшой светосилой устройства при таком отверстии, но и с тем фактом, что, поскольку толщина непрозрачного для рентгеновских лучей экрана пинхол камеры составляет сотни микрометров, то отверстие в таком экране представляет протяженный канал. Основной недостаток такого «канала», как пинхола, является его маленькое поле зрения, которое составляет десятки микрометров. Альтернативой пинхол камере как изображающему устройству в рентгеновском диапазоне спектра является многоэлементная преломляющая рентгеновская линза [5]. Многоэлементная преломляющая рентгеновская линза состоит из большого числа (100 и более) двояковогнутых микролинз, изготовленных из вещества, содержащего элементы с небольшим порядковым номером. Многоэлементные пре-

ломляющие рентгеновские линзы позволяют фокусировать рентгеновские лучи и получать изображения источников рентгеновского излучения и объектов с субмикронным разрешением. Апертура линзы из-за эффекта поглощения рентгеновских лучей в материале линзы несколько меньше, чем $2R$, где R – радиус кривизны линзы. Например, нами разработан целый ряд короткофокусных преломляющих рентгеновских линз, состоящих из более чем ста двояковогнутых оксидных микролинз с радиусом кривизны 50 мкм каждая [6, 7] и с фокусным расстоянием около 50 мм для фотонов с энергией 8 кэВ. В работе [6] линза, содержащая 161 микролинзу, использовалась в качестве объектива рентгеновского микроскопа с лабораторным источником излучения, а в работе [7] линза, содержащая 147 микролинз, использовалась как объектив микроскопа с синхротронным источником излучения. Несмотря на то что преломляющая рентгеновская линза обеспечивает пространственное разрешение при микроскопии на уровне 1 мкм и лучше, поле зрения линзы относительно невелико и составляет около 300 мкм [6]. В то же время в рентгеновской флуоресцентной микроскопии имеются задачи, когда необходимо получить информацию о пространственном распределении различных химических элементов на площади в несколько квадратных сантиметров с пространственным разрешением на уровне 20–100 мкм. Эту задачу традиционно решают путем сканирования поверхности образца рентгеновским пучком с одновременной регистрацией и идентификацией флуоресцентного излучения. В связи с развитием цифровой фототехники перспективным видится использовать двумерные цифровые ПЗС камеры для целей рентгеновской флуоресцентной микроскопии. При этом в качестве объектива может быть использована пинхол камера. Так, в работах [8–10] описаны рентгеновские устройства на основе пинхол камеры, позволяющие получать информацию о пространственном распределении химических элементов на поверхности образца с пространственным разрешением от 30 мкм при поле зрения $2,5 \times 2,5$ мм² до 140 мкм при поле зрения 4×4 см² [9]. В качестве приемных устройств использовались энергодисперсионные цифровые двумерные ПЗС камеры. Такие камеры являются дорогостоящими устройствами и имеют низкую чувствительность для рентгеновских фотонов с энергией выше, чем 8 кэВ. В то же время энергия флуоресцентного рентгеновского излучения

для химических элементов с порядковым номером выше 30 как раз и попадает в область больше, чем 8 кэВ и идентификация таких элементов затруднительна. Поэтому перспективным и новым видится использование для целей рентгеновской флуоресцентной микроскопии ПЗС камеры с нанесенным на окно камеры (или на прижатую к окну волоконно-оптическую шайбу) слоем сцинтиллятора. Эффективность таких камер для регистрации рентгеновских фотонов с энергий больше 8 кэВ значительно выше, чем у отмеченных выше энергодисперсионных камер. При этом идентификацию элементного состава образца можно осуществить путем использования селективно-поглощающих рентгеновских фильтров.

Цель данной работы состояла в разработке устройства для получения изображения объектов во вторичных флуоресцентных рентгеновских лучах с использованием пинхол камеры как объектива и цифровой ПЗС камеры для регистрации рентгеновского изображения и в определении пространственной разрешающей способности устройства.

Экспериментальные исследования

Для получения изображения объектов во вторичных флуоресцентных рентгеновских лучах был изготовлен стенд, структурная схема которого показана на рисунке 1.

В исследованиях объект 4 облучался рентгеновскими лучами от рентгеновской трубки 1 и испускал флуоресцентное рентгеновское излучение. Пинхол камера 2 располагалась между объектом и рентгеновской камерой 3 так, чтобы сформировать на рентгеночувствительном окне камеры изображение объекта.

В качестве источника рентгеновских лучей использовалась рентгеновская трубка БСВ-17 с медным анодом. Рабочее напряжение на аноде трубки – 32 кВ, анодный ток – 14 мА. Энергия фотонов характеристического излучения меди равна 8 кэВ.

В качестве рентгеновской камеры для регистрации изображения использовалась ПЗС камера фирмы *Photonic Science* (модель *FDI VHR*). Камера содержит ПЗС матрицу, к которой присоединена волоконно-оптическая шайба с нанесенным сцинтиллятором на основе соединения $Gd_2O_2S:Tb$. Размер рабочей области рентгеновской камеры составляет $18 \times 12 \text{ мм}^2$, число пик-

селей равно 4008×2670 , размер стороны пикселя составляет 4,5 мкм. При съемке объекта использовалась функция биннинга, которая позволяет объединять несколько пикселей камеры в один. Сигнал от выделенных пикселей суммируется. Использовалось значение биннинга, равное 8, что соответствует эффективному значению размера пикселя 36 мкм.

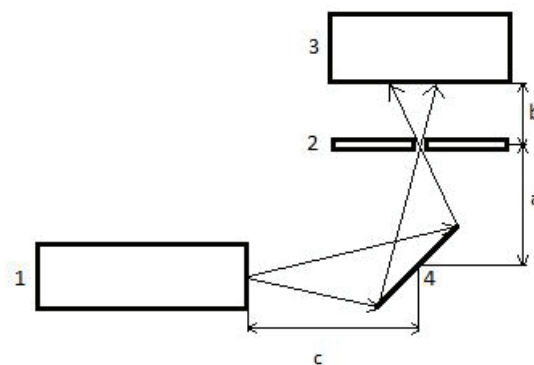


Рисунок 1 – Структурная схема стенда: 1 – рентгеновская трубка; 2 – пинхол камера; 3 – двумерная рентгеновская камера; 4 – объект исследования

Figure 1 – Block diagram of the device: 1 – X-ray tube; 2 – pinhole camera; 3 – X-ray camera; 4 – object for imaging

В качестве образцов использовались железные пружины, отличающиеся толщиной проволоки, фотографии которых показаны на рисунке 2.

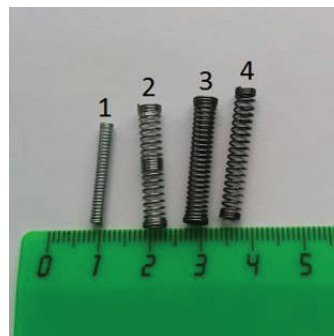


Рисунок 2 – Фотографии пружин

Figure 2 – Iron springs for X-ray imaging

Рентгеновские лучи от рентгеновской трубки с медным анодом эффективно ионизирует К-оболочки атомов железа, что приводит к рентгеновской флуоресценции атомов железа с энергий фотонов $K\alpha$ -серии 6,4 кэВ.

Изготовленная пинхол камера представляет собой свинцовую пластину с отверстием, диа-

метр которого равен 100 мкм. Толщина пластины выбрана равной 200 мкм, чтобы поглощать флуоресцентное рентгеновское излучение от объекта и рассеянное излучение от рентгеновской трубки.

Во время эксперимента пинхол камера располагалась на расстоянии, $a = 30$ мм от объекта исследований (пружины) и на расстоянии $b = 15$ мм от рентгеновской камеры. Таким образом, пинхол камера формировала уменьшенное в 2 раза изображение объекта.

На рисунке 3 показаны полученные изображения пружин во вторичных флуоресцентных рентгеновских лучах. Экспозиция при съемке составляла 60 с. Из рисунка видно, что поле зрения устройства составляет около $0,5 \times 1$ см².

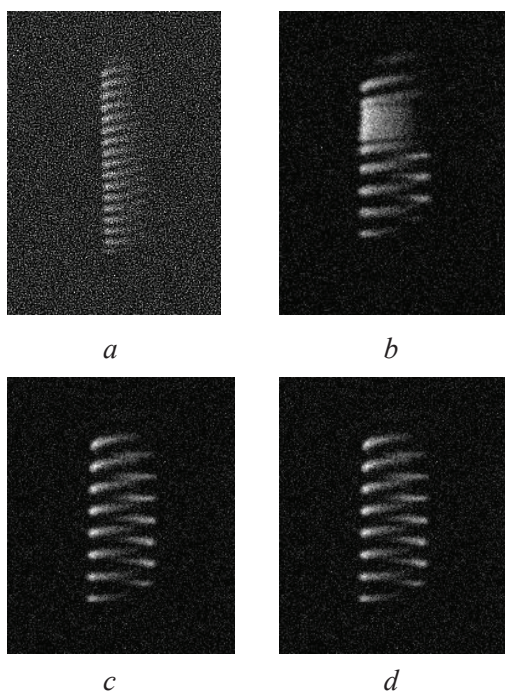


Рисунок 3 – Изображения пружин во вторичных флуоресцентных рентгеновских лучах: *a* – пружина № 1; *b* – пружина № 2; *c* – пружина № 3; *d* – пружина № 4

Figure 3 – Fluorescent X-ray images of the springs: *a* – spring № 1; *b* – spring № 2; *c* – spring № 3; *d* – spring № 4

Проведены исследования по определению пространственной разрешающей способности системы. Один из способов определения пространственной разрешающей способности рентгенооптической системы состоит в анализе теневой картины от объекта, который испускает рентгеновские лучи. В качестве объекта была выбрана железная игла. В эксперименте пинхол камера располагалась на расстоянии $a = 30$ мм от иглы и на расстоянии $b = 15$ мм от рентгеновской каме-

ры. На рисунке 4 показано полученное изображение иглы во вторичных рентгеновских лучах.

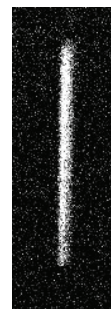


Рисунок 4 – Изображение железной иглы во флуоресцентных рентгеновских лучах

Figure 4 – Fluorescent X-ray image of the iron needle

Для получения краевой функции, которая описывает пространственное распределение плотности почернения изображения вдоль выбранного направления, использовалось программное обеспечение *ImageJ*. В нем имеется встроенная функция *Plot Profile*, которая строит таблицу и график зависимости интенсивности оттенка серого вдоль выбранного отрезка прямой. Такая зависимость и представляет краевую функцию. На рисунке 5 показана краевая функция, полученная в результате обработки изображений иглы. Для определения разрешающей способности оптической системы необходимо определить расстояние, на котором краевая функция уменьшается с величины $0,8 I_{max}$ до $0,2 I_{max}$, где I_{max} – максимальное значение интенсивности. Из рисунка 5 видно, что расстояние между этими уровнями соответствует примерно трем пикселям. При учете размера пикселя (36 мкм при биннинге 8) и геометрии съемки рассчитанная разрешающая способность равна 216 мкм. Поскольку размер отверстия пинхол камеры равен 100 мкм, то достигнутая разрешающая способность является удовлетворительной.

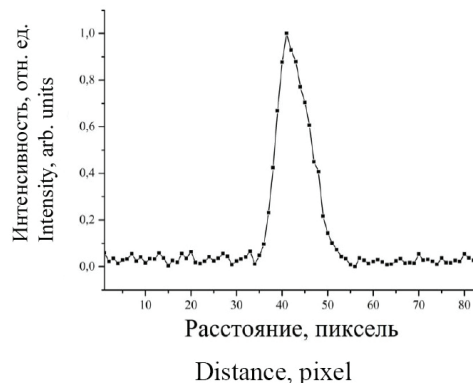


Рисунок 5 – Краевая функция для изображения иглы

Figure 5 – Plot Profile for the needle image

Заключение

Разработано устройство для получения изображения объектов во вторичных (флуоресцентных) рентгеновских лучах. Устройство состоит из источника рентгеновского излучения, пинхол камеры и двумерной цифровой рентгеновской ПЗС камеры. Объект исследования облучался излучением от рентгеновской трубки и испускал вторичные рентгеновские лучи. Пинхол камера с размером отверстия 100 мкм использовалась для формирования изображения объекта во вторичных рентгеновских лучах на входном окне двумерной цифровой рентгеновской камеры. С использованием устройства получены изображения ряда железных пружин, отличающихся размерами. Установлено, что пространственная разрешающая способность устройства составляет около 200 мкм при экспозиции 60 с.

Разработанное устройство отличается от известных аналогов использованием ПЗС камеры с нанесенным на волоконно-оптическую шайбу слоем сцинтиллятора, что позволяет повысить эффективность регистрации рентгеновских фотонов высоких энергий по сравнению со случаем энергодисперсионных ПЗС камер. В этом состоит новизна устройства. Достигнутая пространственная разрешающая способность системы в 200 мкм при поле зрения около $0,5 \times 1 \text{ см}^2$ сравнима с результатом, приведенным в [9] и составляющим: разрешение системы равно 140 мкм при поле зрения $4 \times 4 \text{ см}^2$. Улучшить разрешение разработанной системы можно за счет увеличения экспозиции, оптимизации условий съемки и уменьшения размера отверстия пинхол камеры. В дальнейшем планируется проведение исследований по идентификации элементного состава образца путем использования селективно-поглощающих рентгеновских фильтров.

Благодарности

Работа поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований, проект Ф16Р-070.

Список использованных источников

1. Young, M. Pinhole Optics / M. Young // *Applied Optics*. – 1971. – Vol. 10, no. 12. – P. 2763–2767.
2. Young, M. The pinhole camera: Imaging without lenses or mirrors / M. Young // *The Phys. Teach.* – 1989. – Vol. 27. – P. 648–655.

3. Thomas, C. X-ray pinhole camera resolution and emittance measurement / C. Thomas, G. Rehm, I. Martin, R. Bartolini // *Phys. Rev. ST Accel. Beams*. – 2010. – Vol. 13. – P. 022805-1–022805-9.

4. Иванов, С.А. Рентгеновские трубки технического назначения / С.А. Иванов, Г.А. Щукин. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 201 с.

5. Snigirev, A. A compound Refractive Lens for focusing High-Energy X-rays / A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, B. Lengeler // *Nature*. – 1996. – Vol. 384. – P. 49–51.

6. Дудчик, Ю.И. Рентгеновский микроскоп на основе короткофокусной многоэлементной преломляющей линзы / Ю.И. Дудчик // *Вест. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1. Физика. Математика. Информатика*. – 2009. – № 2. – С. 38–43.

7. Дудчик, Ю.И. Рентгеновская микроскопия с использованием синхротронного излучения и элементов преломляющей рентгеновской оптики / Ю.И. Дудчик, Ч. Хуанг, Б. Му, Т. Ванг, Г. Пан // *Вест. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1. Физика. Математика. Информатика*. – 2010. – № 2. – С. 24–28.

8. Romano, F.P. A new X-ray pinhole camera for energy dispersive X-ray fluorescence imaging with high-energy and high-spatial resolution / F.P. Romano [et al.] // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. – 2013. – Vol. 86. – P. 60–65.

9. Romano, F.P. Macro and micro full field x-ray fluorescence with an X-ray pinhole camera presenting high energy and high spatial resolution / F.P. Romano [et al.] // *Anal Chem.* – 2014. – Vol. 86(21). – P. 10892–10899.

10. Scharf, O. Compact pnCCD-based X-ray camera with high spatial and energy resolution: a color X-ray camera / O. Scharf [et al.] // *Anal Chem.* – 2011. – Vol. 1. – P. 2532-1–2532-8.

Acknowledgments

The paper was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research, project No F 16 R-070.

References

1. Young M. Pinhole Optics. *Applied Optics*, 1971, vol. 10, no. 12, pp. 2763–2767.
2. Young M. The pinhole camera: Imaging without lenses or mirrors. *The Phys. Teach.*, 1989, vol. 27, pp. 648–655.
3. Thomas C., Rehm G., Martin I., Bartolini R. X-ray pinhole camera resolution and emittance measurement. *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 2010, vol. 13, pp. 022805-1–022805-9.
4. Ivanov S.A. Rentsgenovskie trubki obsteogo naznatchenia. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1989, 201 p.

5. Snigirev A., Kohn V., Snigireva I., Lengeler B. A compound Refractive Lens for focusing High-Energy X-rays. *Nature*, 1996, vol. 384, pp. 49–51.
6. Dudchik Yu.I. X-ray microscope on the basis of short-focal-length compound X-ray lens. *Vestnik of Belarussian State University. Physics, Mathematics, Informatics*, 2009, vol. 2. pp. 38–43.
7. Dudchik Yu.I., Huang C., Mu B., Wang Z., Pan G. X-ray microscopy with synchrotron source and refractive optics. *Vestnik of Belarussian State University. Physics, Mathematics, Informatics*, 2010, vol. 2, pp. 24–28.
8. Romano F. P., Altana C., Cosentino L., Celona L., Gammino S., Mascali D., Pappalardo L., Rizzo F. A new X-ray pinhole camera for energy dispersive X-ray fluorescence imaging with high-energy and high-spatial resolution. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2013, vol. 86, pp. 60–65.
9. Romano F.P., Caliri C., Cosentino L., Gammino S., Giuntini L., Mascali D., Neri L., Pappalardo L., Rizzo F., Taccetti F. Macro and micro full field x-ray fluorescence with an X-ray pinhole camera presenting high energy and high spatial resolution. *Anal Chem.*, 2014, vol. 86(21), pp.10892–10899.
10. Scharf O., Ihle S., Ordavo I., Arkadiev V., Bjeoumikhov A., Bjeoumikhova S., Buzanich G., Gubzhokov R., Günther A., Hartmann R., Kühbacher M., Lang M., Langhoff N., Liebel A., Radtke M., Reinholz U., Riesemeier H., Soltau H., Strüder L., Thünemann A.F., Wedell R. Compact pnCCD-based X-ray camera with high spatial and energy resolution: a color X-ray camera. *Anal Chem.*, 2011, vol. 1, pp. 2532-1–2532-8.