

УДК 533.9.082

## СЕНСИТОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПЛЁНКИ УФ-4 ДЛЯ ЕЁ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В EUV-СПЕКТРОСКОПИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

*Е.Д. Казаков<sup>1</sup>, А.П. Шевелько<sup>2</sup>, О.Ф. Якушев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

Представлены результаты исследования сенситометрических характеристик фотоплёнки УФ-4 с помощью EUV-рефлектометра на основе плазмы капиллярного разряда. Для спектрального диапазона  $\lambda = 5\text{—}19$  нм построены характеристические кривые, определены коэффициент контрастности и абсолютная чувствительность. Выведены аппроксимационные формулы для нахождения абсолютной интенсивности излучения по плотности почернения на фотоплёнке. Эти данные необходимы для проведения количественных измерений интенсивности излучения в EUV-области спектра. Такие свойства, как отсутствие накопления шума при длительных экспозициях и нечувствительность к электромагнитным помехам, делают фотоплёнку УФ-4 перспективной для проведения EUV-спектроскопических исследований высокотемпературной плазмы, в том числе плазмы мощных Z-пинчей, основанных на сверхмощных генераторах тока.

**Ключевые слова:** диагностика высокотемпературной плазмы, EUV-спектроскопия, EUV-детекторы излучения, обработка спектров.

## SENSITOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE UF-4 PHOTOGRAPHIC FILM FOR ITS USAGE IN HIGH TEMPERATURE PLASMA EUV-SPECTROSCOPY

*E.D. Kazakov<sup>1</sup>, A.P. Shevelko<sup>2</sup>, O.F. Yakushev<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup>P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Results of UF-4 photographic film sensitometric characteristics studies using EUV-reflectometer based on capillary discharge plasmas are presented. Characteristic curves, contrast coefficients and absolute sensitivity are determined for a spectral range of  $\lambda = 5\text{—}19$  nm. Approximation formulas for determination of absolute intensity from optical density on the photographic film were derived. These data are necessary for quantitative intensity measurements in EUV-spectral range. Such properties as absence of noise accumulation at long time exposures and non-sensitivity for electromagnetic interferences make the UF-4 photographic film perspective for EUV-spectroscopy of high temperature plasmas including high power Z-pinch plasmas based on super power current generators.

**Key words:** diagnostics of high-temperature plasma, EUV-spectroscopy, EUV-radiation detectors, spectra processing.

DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-3-63-67

Длительное время фотографическая плёнка без защитного желатинового слоя являлась одним из основных детекторов в спектроскопических исследованиях в EUV-диапазоне спектра. Наиболее часто используемой за рубежом фотоплёнкой являлась плёнка Kodak 101-01 [1], российским аналогом которой является фотоплёнка УФ-4 [2]. Примеры использования этих детекторов фотоплёнок для исследования высокотемпературной плазмы можно найти в работах по лазерной плазме [3—6] и по плазме мощных Z-пинчей [7—14]. Фотоплёнка обладает существенным недостатком — она не является детектором «реального времени», так как требует продолжительной и сложной процедуры проявления и обработки информации. В связи с этим в последнее время её начинают активно вытеснять детекторы ПЗС (прибор с зарядовой связью) и КМОП (комплементарная структура металл—оксид—полупроводник). Так, ПЗС-детекторы с обратной засветкой (backside-illuminated) являются детекторами реального времени, имеют высокую чувствительность в EUV-диапазоне, хорошее отношение сигнал/шум, широкий динамический диапазон. Тем не менее для многих задач фотоплёнка до сих пор имеет перед другими детекторами существенные преимущества. К ним относятся высокое пространственное разрешение, большая площадь чувствительной поверхности, возможность изгиба по цилиндрической поверхности, отсутствие накопления шума при длительных экспозициях, отсутствие чувствительности к электромагнитным помехам. Пространственное разрешение фотоплёнки может составлять менее 1 мкм, в то время как размер ячейки ПЗС составляет порядка 5 мкм и более. Размер фотоплёнки может достигать десятков квадратных сантиметров, в то время как чувствительная область приборов с обратной засветкой редко превышает 1 см<sup>2</sup>. Существующие же КМОП-детекторы большой площади, используемые в медицинской рентгенологии, имеют весьма низкое пространственное разрешение (хуже 250 мкм). При исследовании процессов, требующих продолжительное время экспозиции, ПЗС- и КМОП-детекторы накапливают шум,

что приводит к существенному ухудшению соотношения сигнал/шум. Это относится к исследованию слабоинтенсивных источников излучения с большой частотой повторения импульсов, например, фемто-секундной лазерной плазме. Фотоплёнка лишена этого недостатка, так как не накапливает шума при временном интегрировании сигнала. Другим существенным преимуществом фотоплёнки является невосприимчивость к электромагнитным наводкам. Это становится особенно важным при проведении исследований на мощных генераторах тока, работающих по программам инерциального управляемого термоядерного синтеза. Так, установки с мегаамперными токами (Ангара 5-1, Z-Machine, ZR) создают такой уровень наводок в широком частотном диапазоне, что большинство электронного оборудования располагается в отдельно стоящих экранированных кабинах либо в специальных металлических боксах с автономным питанием. При этом ошибки в конструкции бокса и недостаточная экранировка могут приводить к выходу из строя электроники установленного в нём регистратора.

Таким образом, фотоплёнка до сих пор является достаточно востребованным детектором на мощных импульсных установках [7—14], а её применение представляет большой интерес, особенно для абсолютных (количественных) измерений. Целью данной работы являлась калибровка отечественной фотоплёнки УФ-4, производимой НИИ «Химфотопроект», для проведения абсолютных измерений интенсивности EUV-излучения высокотемпературной плазмы в диапазоне длин волн  $\lambda = 5\text{—}19\text{ нм}$ .

Ранее фотоплёнка УФ-4 калибровалась в составе люминесцентного детектора [5], а также для отдельных длин волн [15]. Однако в столь широком диапазоне длин волн калибровка ранее не проводилась. Кроме того, в связи с усовершенствованием технологии производства, в том числе технологии полива фотослоя, калибровочные измерения желательно периодически повторять.

Для абсолютной калибровки фотоплёнки УФ-4 использовался специально разработанный EUV-рефлектометр. Рефлектометр состоял из источника EUV-излучения, монохроматора-спектрометра скользящего падения GIMS [16] и измерительной камеры. Компактный, эффективный источник EUV-излучения, располагавшийся в непосредственной близости (на расстоянии 70 мм) от входной щели GIMS, основан на плазме газонаполненного капиллярного разряда [17—18]. В экспериментах использовался газонаполненный керамический капилляр диаметром 2 мм и длиной 10 мм. Наполнение капилляра газом происходило с помощью быстрого электромагнитного клапана. Для создания разряда использовался простой высоковольтный источник, основанный на полном разряде накопительных ёмкостей на разрядный промежуток. Измерения электрических характеристик с временным разрешением  $\sim 1\text{ нс}$  проводились с помощью токового шунта и делителя напряжения. Длительность импульса тока составляла  $\sim 20\text{ нс}$  [17—18], которая практически совпадала с длительностью излучения исследуемых плазменных источников [8—14].

Монохроматор-спектрометр скользящего падения GIMS с постоянным углом отклонения работал в режиме монохроматора. На выходе GIMS устанавливалась специальная испытательная камера (рис. 1) с детектором излучения и кассетой для фотоплёнки. Кассета для фотоплёнки УФ-4 позволяла регистрировать несколько спектров (вплоть до 10—20) без развакуумирования вакуумной камеры. Для записи спектров с различной экспозицией (с плотностью почернения до  $3D$ ) требовалось произвести 1—60 разрядов. Более подробному описанию устройства и особенностей работы рефлектометра будет посвящена отдельная статья.

Интенсивность излучения, прошедшего через выходную щель, регистрировалась с помощью абсо-

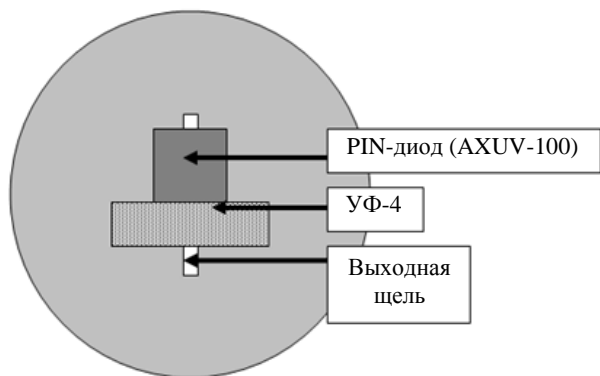


Рис. 1. Схема взаимного расположения элементов на выходе GIMS в испытательной камере

лютно калиброванного PIN-диода AXUV-100 (компания IRD) [19]. Характеристические кривые, зависимости оптической плотности почернения на фотоплёнке от экспозиции  $H$  и от  $\log H$  измерялись при прямом измерении  $H$  с помощью PIN-диода. Заметим, что этот метод калибровки не зависит от знания коэффициента отражения дифракционной решётки. Важным является только то, чтобы освещённость по высоте щели была одинаковой в каналах PIN-диода и фотоплёнки.

Фотоплёнка УФ-4 обрабатывалась по следующему рецепту: проявление в проявителе D19 [20],

разбавленном водой в отношении 1:1 при 20° С (3 мин), промывка в воде (0,5 мин), закрепление (3 мин) и промывка в проточной воде (5 мин). Вуаль фотоплёнки УФ-4 (плотность почернения неэкспонированной плёнки) составляла величину  $D = 0,05—0,1$ , аналогичный уровень вуали имела и плёнка Kodak 101-01.

Эксперименты проводились на пяти длинах волн из рассматриваемого диапазона:  $\lambda = 4,9, 9,75, 13,5, 17,8$  и  $19,3$  нм. На рис. 2 для различных длин волн приведены экспериментальные зависимости интенсивности (экспозиции  $H$ ) в единицах  $\text{эрг/см}^2$  от плотности почернения для небольших плотностей почернения ( $D = 0—0,6$ ). Видно, что для этого диапазона зависимость носит линейный характер и для всех длин волн может быть описана общей аппроксимационной формулой  $H = aD$ , где  $a = 2,3 \pm 0,1$  (приведена среднеквадратическая ошибка).

На рис. 3 представлены характеристические кривые  $D = f(\log H)$  для длин волн 4,9 нм (а) и 13,5 нм (б). Экспериментальные данные хорошо аппроксимируются полиномами третьей степени.

Важным параметром характеристической кривой является коэффициент контрастности

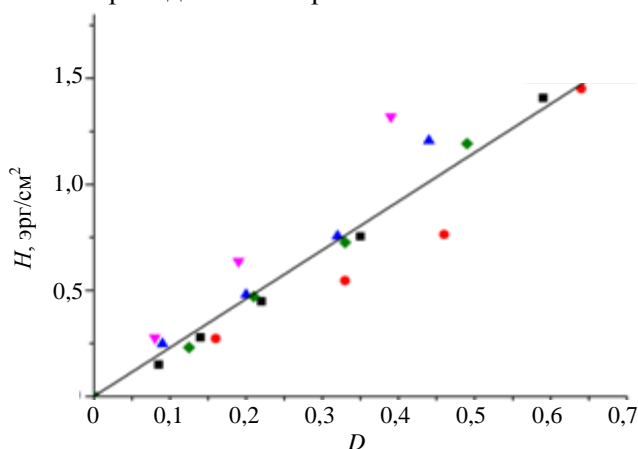


Рис. 2. Зависимость интенсивности падающего излучения  $H$  от плотности почернения на фотоплёнке  $D$ : ■ — 4,9, ● — 9,7, ▲ — 13,5, ▼ — 17,8, ◆ — 19,3 нм

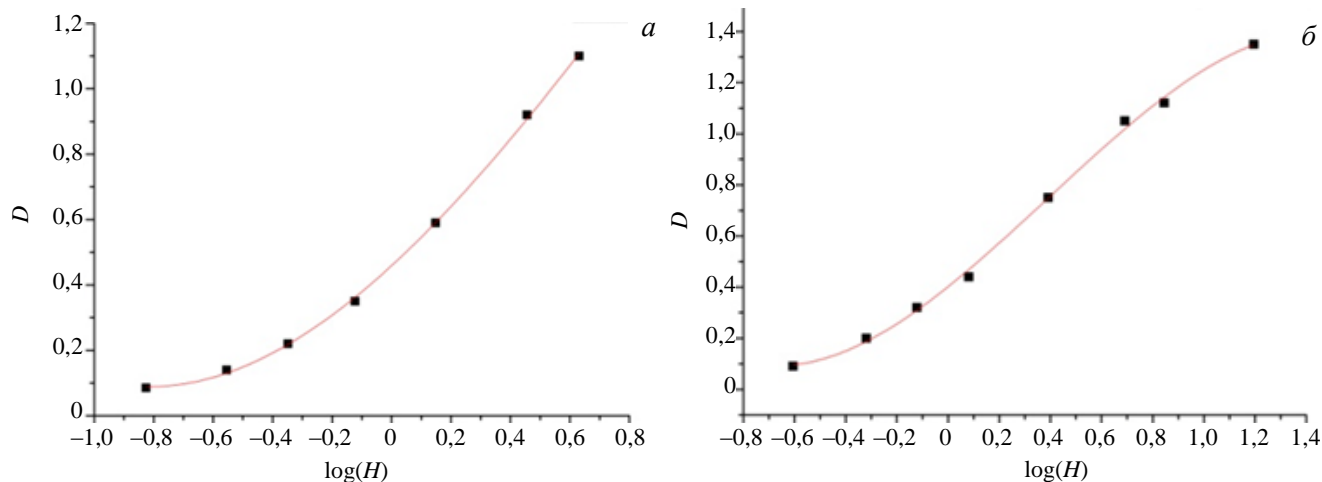


Рис. 3. Характеристические кривые для  $\lambda = 4,9$  нм (а) и  $\lambda = 13,5$  нм (б)

$\gamma = dD/d(\log H)$ , измеряемый на линейном участке кривой  $D = f(\log H)$ . Этот параметр с хорошей степенью точности совпадает для всего диапазона при  $D = 0,2—1,1$  и составляет  $\gamma = 0,83 \pm 0,05$ .

Для диапазона  $D = 0,6—1,2$  линейность нарушается, однако зависимость хорошо аппроксимируется квадратичной функцией  $H = bD^2 + cD$ , где  $b = 9,3 \pm 1,6$ ,  $c = 7,9 \pm 1,5$  за вычетом вуали. При  $D > 1,2$  наблюдается насыщение, которое можно описать зависимостью  $H = 30(D - 1) + 30(D - 1)^3$ . Стоит отметить, что в этой области погрешность измерений резко возрастает.

Величины абсолютной чувствительности фотоплёнки УФ-4 для плотности почернения  $D = 1,0 \pm 0,1$  в спектральном диапазоне  $\lambda = 4,48—19,3$  нм приведены в таблице. Заметим, что фотоплёнка Kodak 101-01 имеет значительно более высокую чувствительность  $H = 2,3$  фот./ $\text{мкм}^2$  в этом спектральном диапазоне для  $D = 1,0 \pm 0,1$ .

Абсолютная чувствительность фотоплёнки УФ-4 для плотности почернения  $D = 1,0 \pm 0,1$

$\lambda$ , нм	$H$ , $\text{эрг/см}^2$	$H$ , фот./ $\text{мкм}^2$
4,9	3,4	84
9,7	3	150
13,5	4,3	290
17,8	5,5	490
19,3	4,1	400

При  $D$ , отличных от 1, наблюдается схожая тенденция — Kodak чувствительнее УФ-4 более чем на порядок. Это объясняется тем, что плёнка УФ-4 обладает существенно меньшим размером зерна (рис. 4) и, соответственно, более низкой чувствительностью, но лучшим пространственным разрешением. На рис. 4 представлены увеличенные изображения экспонированных областей фотоплёнок УФ-4 (а) и Kodak 101-01 (б), полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5910-LV. Экспонирование плёнок проводилось излучением плазмы капиллярного разряда на длине волны  $\lambda = 13,5$  нм в одинаковых условиях. Для проявления плёнок использовались стандартные методы обработки. Как видно на рисунках, для Kodak 101-01 характерный размер зерна находится в пределах 1—2 мкм, в то время как для плёнки УФ-4 этот размер не превышает 0,2—0,3 мкм.

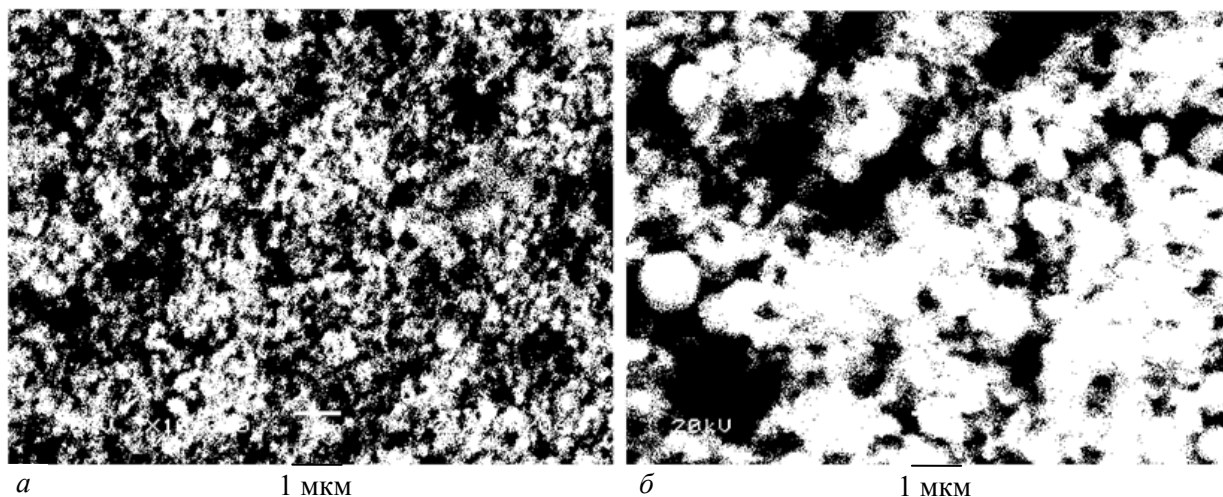


Рис. 4. Изображение экспонированных областей фотоплёнок УФ-4 (а) и Kodak 101-01 (б). Увеличение  $\times 1000$

Таким образом, при проведении исследований было продемонстрировано, что для диапазона длин волн 5—19 нм зависимость экспозиции  $H$  от плотности почернения  $D$  фотоплёнки УФ-4 линейна при  $D \leq 0,6$ , описывается квадратичной зависимостью при  $D = 0,6—1,2$ , а при больших экспозициях выходит на насыщение, что может приводить к высокому уровню ошибок. Для обозначенных диапазонов получены аппроксимационные формулы зависимости интенсивности падающего на фотоплёнку излучения от плотности почернения. Определён коэффициент контрастности для диапазона  $D = 0,2—1,1$ . Продemonстрировано, что УФ-4 может эффективно использоваться в качестве детектора EUV- и мягкого рентгеновского излучения при исследовании высокотемпературной плазмы.

Авторы выражают благодарность С.Г. Черноок за получение изображений фотоплёнок с помощью сканирующего электронного микроскопа.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-02-04411-а.

## REFERENCES

1. Henke B.L., Fujiwara F.G., Tester M.A. et al. Low-energy X-ray response of photographic films. II. Experimental characterization. — J. Opt. Soc. Am. B., 1984, vol. 1, № 6, pp. 828—849.
2. Zaidel' A.N., Shreider E.Ya. Vacuum spectroscopy and its application. — М.: Nauka (Science), Main editorial office of physico-mathematical literature, 1976 (in Russian).
3. Eidmann K., Kishimoto T. Absolutely measured X-ray spectra from laser plasmas with targets of different elements. — Applied Physics Letters, 1986, vol. 49(7), pp. 377—378.
4. Schwanda, W., Eidmann K. Calibration of Kodak 101 X-ray film. — Applied Optics, 1992, vol. 31(4), pp. 554—559.
5. Shevel'ko A.P. Absolute measurements in VUV-region of spectrum by using the fluorescent detector. — Kvantovaya elektronika (Quantum electronics), 1996, vol. 23, pp. 748—750 (in Russian).
6. Shevelko A.P., Shmaenok L.A., Churilov S.S. et al. Extreme ultraviolet spectroscopy of a laser plasma source for lithography. — Physica Scripta, 1998, vol. 57, pp. 276—282.

7. **Shevel'ko A.P., Bliss D.E., Kazakov E.D. et al.** EUV-spectroscopy of plasma, produced in the final anode-cathode gap of highcurrent pulse generator Z-Machine (SNL). — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 2008, vol. 34, № 11, pp. 1021—1032 (in Russian).
8. **Bolkhovitinov E.A., Volkov G.S., Vichev I.Yu. et al.** Study of the fast Z-pinch radiation spectra, being formed at compression of multiwire assemblies on the «Angara-5-1» facility. — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 2012, vol. 38, № 10, p. 894 (in Russian).
9. **Aleksandrov V.V., Grabovskij E.V., Grishchuk A.N. et al.** Vacuum ultra-violet spectroscopy methods use for electron temperature measuring in the peripheral plasma of Z-pinch produced from low-density deuterated polyethylen. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2013, vol. 36, issue 3, pp. 68—73 (in Russian).
10. **Mitrofanov K.N., Grabovskij E.V., Grishchuk A.N. et al.** Specific features of the structure of the Z-pinch emitting region formed during the implosion of a foam-wire load at the Angara-5-1 facility. — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 2013, vol. 39, № 1, p. 71 (in Russian).
11. **Gritsuk A.N., Alexandrov V.V., Grabovskiy E.V. et al.** Radiation anisotropy at the imposition of multiwire arrays. — *IEEE Transactions in Plasma Science*, 2013, vol. 41, pp. 3184—3189.
12. **Kazakov E.D., Shevel'ko A.P.** New method of EUV spectra processing for high-temperature plasma diagnostics. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2014, vol. 37, issue 4, pp. 71—75 (in Russian).
13. **Boldarev A.S., Bolkhovitinov E.A., Vichev I.Yu. et al.** Investigations methods and results of radiation spectra of megaampere Z-pinch on the «Angara-5-1» facility. — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 2015, vol. 41, № 2, pp. 195—199 (in Russian).
14. **Grabovskij E.V., Sasorov P.V., Shevel'ko A.P. et al.** Radiative heating of thin Al-foils by intensive EUV-radiation. — *Pis'ma to ZhETF (Letters to JETPh)*, 2016, vol. 103, № 5, pp. 394—401 (in Russian).
15. **Gilev O.N., Vikhlyayev D.A., Legkodymov A.A., Nikolenko A.D.** Absolute calibration of x-ray optical elements and detectors at wavelength of 46,9 nm. — *Pribory i tekhnika eksperimenta (Instruments and experimental technique)*, 2010, № 6, pp. 107—110 (in Russian).
16. **Shevel'ko A.P., Yakushev O.F.** Spectral devices for absolute intensity measurements in VUV and soft X-ray ranges of spectrum. — *Poverkhnost' (Surface)*, 2003, № 2, pp. 51—55 (in Russian).
17. **Sobel'man I.I., Shevel'ko A.P., Yakushev O.F., Knight L.V., Turley R.S.** Intensive source of EUV-radiation based on capillary discharge plasma. — *Kvantovaya elektronika (Quantum electronics)*, 2003, vol. 33(1), pp. 3—6 (in Russian).
18. **Shevelko A.P., Knight L.V., Turley R.S., Yakushev O.F.** An intense XUV source of radiation, with in the 4—45-nm-spectral range, based on capillary discharge plasmas. — *Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering*, 2001, vol. 4504, pp. 143—150.
19. **Korde R., Prince C., Cunningham D., Vest R.E., Gullikson E.** Present status of radiometric quality silicon photodiodes. — *Metrologia*, 2003, 40(1 SPEC.), pp. S145—S149.
20. **Gorozovskij Yu.N., Baranova V.P.** Properties of black-and-white photographic films. Sensitometric referenc. — *M.: Nauka (Science)*, Main editorial office of physico-mathematical literature, 1979 (in Russian).

#### AUTHORS

**Kazakov E.D.** NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Kazakoved82@gmail.com

**Shevelko A.P.** P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Leninskij Prospekt 53, 119991 Moscow, Russia

**Yakushev O.F.** P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Leninskij Prospekt 53, 119991 Moscow, Russia; olegyakushev@rambler.ru

Received 26 May 2017  
Problems of Atomic Science and Technology  
Ser. Thermonuclear Fusion, 2017, vol. 40, issue 3, pp. 63—67