

УДК 533.9.082

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

Е.Д. Казаков¹, А.П. Шевелько², О.Ф. Якушев²

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Физический 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. Kazakov¹, A.P. Shevelko², O.F. Yakushev²

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²P.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 см². 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 желательнее 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-

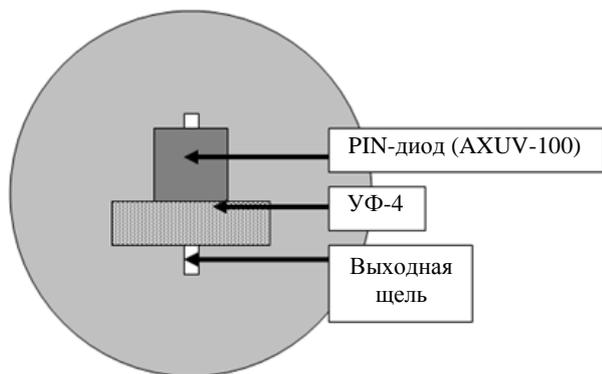


Рис. 1. Схема взаимного расположения элементов на выходе GIMS в испытательной камере

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 $\text{эрг}/\text{см}^2$ 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

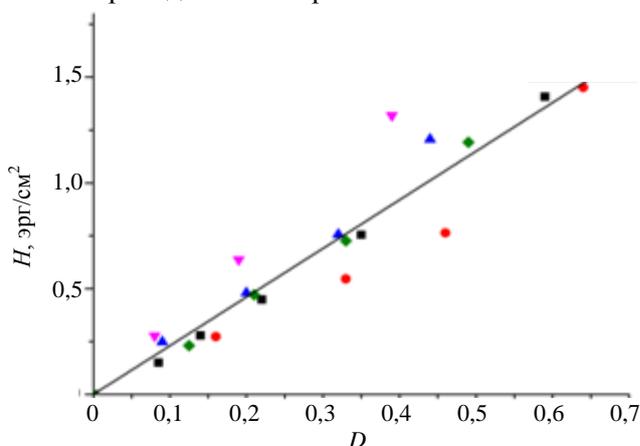


Рис. 2. Зависимость интенсивности падающего излучения H от плотности почернения на фотоплёнке D : ■ — 4,9, ● — 9,7, ▲ — 13,5, ▼ — 17,8, ◆ — 19,3 нм

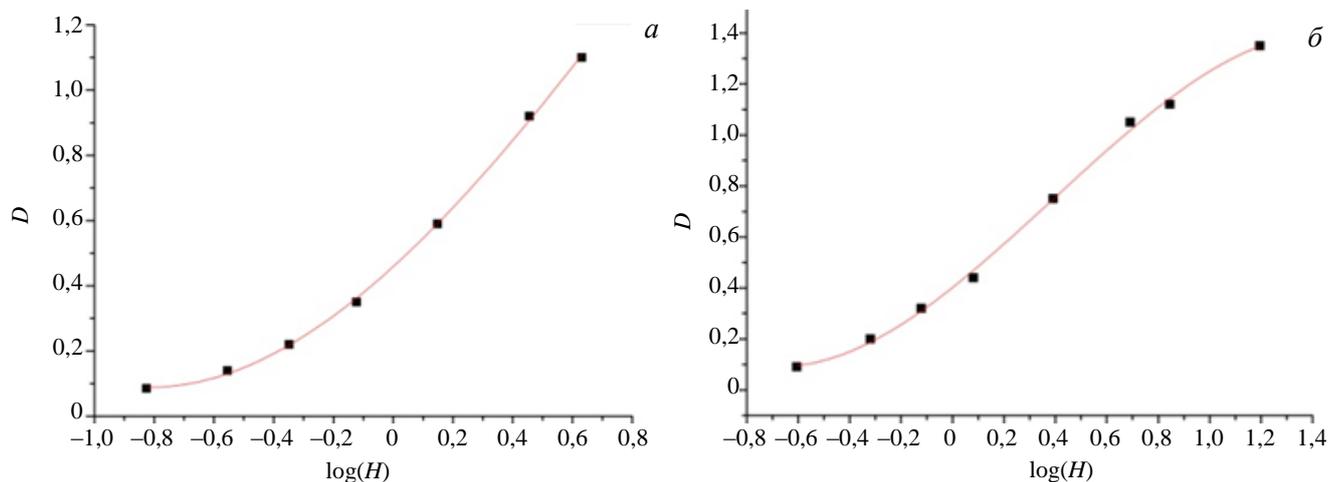


Рис. 3. Характеристические кривые для $\lambda = 4,9$ нм (а) и $\lambda = 13,5$ нм (б)

$\gamma = dD/d(\log H)$, 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./ мкм^2 в этом спектральном диапазоне для $D = 1,0 \pm 0,1$.

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

λ , нм	H , $\text{эрг}/\text{см}^2$	H , фот./ 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.

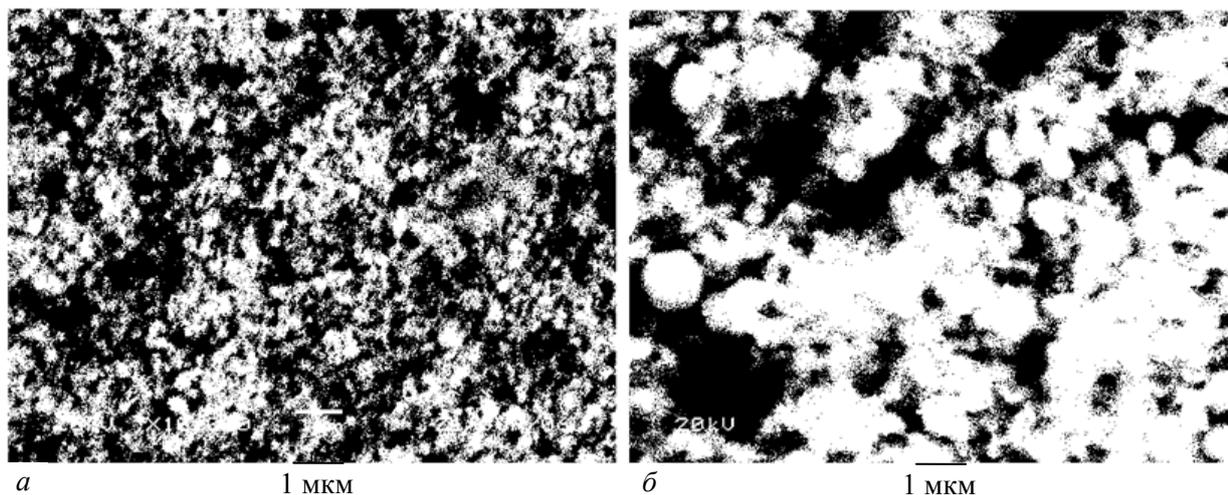


Рис. 4. Изображение экспонированных областей фотоплёнок УФ-4 (а) и Kodak 101-01 (б). Увеличение $\times 1000$

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