

УДК 539.1.044/1.06:535-34+621.386

ФОРМИРОВАНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ ВЫСОКОАСПЕКТНЫХ АНТИРАССЕИВАЮЩИХ СЕТОК ДЛЯ РЕНТГЕНОГРАФИИ

© 2019 г. Б. Г. Гольденберг^{1, *}, В. П. Назьмов¹, Е. И. Пальчиков^{2, 3},
А. Г. Лемзяков¹, А. В. Долгих^{2, 3}, С. И. Мишнев¹

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия

²Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

*E-mail: goldenberg@inp.nsk.su

Рассматривается применимость высокоаспектных антирассеивающих сеток для коррекции диаграммы направленности излучения импульсных рентгеновских трубок в диапазоне энергии фотонов 20–200 кэВ. Описываются методики изготовления и тестирования металлических антирассеивающих растров. Представлены экспериментальные исследования изменения диаграмм направленности рентгеновских аппаратов при использовании антирассеивающих растров.

DOI: 10.1134/S0367676519020145

ВВЕДЕНИЕ

Для изучения внутренней структуры быстро движущихся объектов с использованием рентгеновских флэш-генераторов с напряжениями на аноде 100 и 200 кВ актуальна разработка элементов для формирования малорасходящихся пучков излучения с целью повышения контрастности, разрешающей способности рентгенографии. Рентгеновская оптика практически неприменима для излучения импульсных рентгеновских аппаратов с энергией квантов выше 20 кэВ. Использование антирассеивающих рентгеновских сеток с размером ячеек около 30–40 микрон улучшает отношение сигнал/шум, увеличит пространственное разрешение и уменьшит нежелательное рассеянное излучение. Поскольку рентгеновское излучение рассеивается объектом, рентгеновские решетки используются для коллимации луча излучения вблизи рентгеновской трубки или гашения рассеянного излучения перед детектором. Технология LIGA, которая сочетает в себе глубокую рентгеновскую литографию на синхротронном излучении и гальванопластику, используется для изготовления рентгеновских антирассеивающих сеток. LIGA-растры также могут представлять интерес для формирования различных пространственных пучков излучения в дальней зоне.

Описана методика изготовления промежуточных рентгеновских масок на основе титановой мембраны и рабочих масок на стеклоуглеродной мембране. Экспериментально исследовано влияние LIGA-растров на пространственное распре-

деление излучения импульсного рентгеновского аппарата.

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОАСПЕКТНЫХ АНТИРАССЕИВАЮЩИХ СЕТОК

Для решения поставленных задач формирования высококонтрастных антирассеивающих сеток принципы LIGA-технологии [1] представляются наиболее перспективными – рентгеновская литография получения сетчатых структур из полимерного материала (резиста) высотой более 500 мкм и электрохимическое осаждение слоя золота на подготовленную полимерную структуру. Золото выбрано, как материал, обладающий высоким контрастом в жестком рентгеновском диапазоне. При использовании более легких металлов потребуется значительное увеличение толщины металлической структуры.

Ключевым элементом рентгеновской литографии является рентгеношаблон. Изготовление рентгеношаблона – многостадийный, трудоемкий процесс, включающий в себя формирование на подготовленной подложке структуры топологии из полимерного резиста толщиной около 30–50 мкм и последующее электрохимическое осаждение золота на структуру. Для этого в ИЯФ СО РАН рассматриваются два способа формирования первичного резистивного рисунка. Один метод основан на фотолитографическом формировании полимерного рисунка на заготовке рентгеношаб-

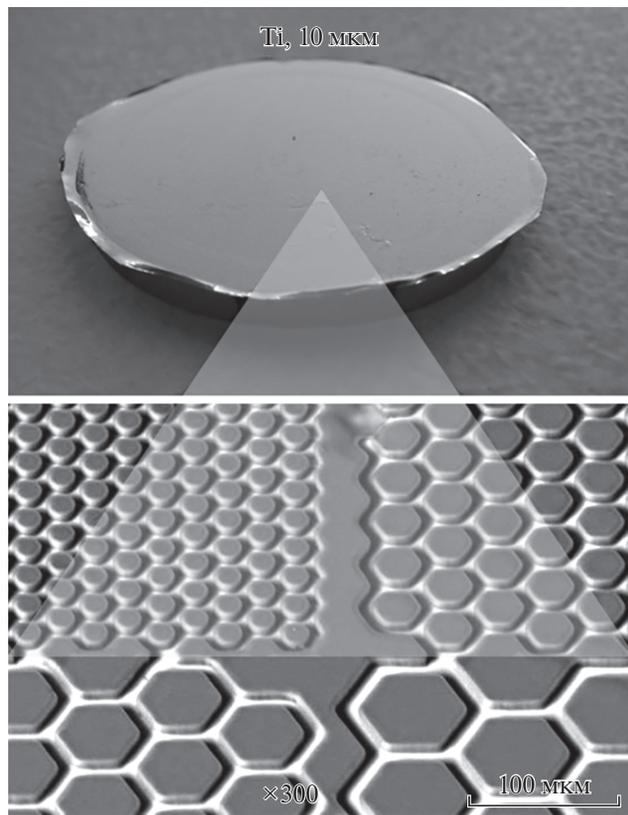


Рис. 1. Образец 10-микронной мембраны из титана, наклеенной на двухдюймовое опорное кольцо из титана, и микроstructures, сформированной фотолитографически.

лона. Для этого отработана методика натяжения на опорном кольце 10-микронной титановой фольги – подложки будущего рентгеношаблона, подобно описанному в [2]. На рис. 1 представлен образец 10-микронной мембраны из титана наклеенной на двухдюймовое опорное кольцо из титана.

На мембрану наносится 5 мкм резиста SU-8, в котором посредством фотолитографии с использованием источника на основе УФ-светодиода формируется первичная структура шаблона [3]. После гальванического осаждения 2–3 мкм золота создается промежуточный рентгеношаблон, контрастный в спектральном диапазоне 10 Å. Далее с использованием СИ в мягком спектральном диапазоне в относительно толстый слой резиста переносится изображение структуры и после проявления проводится осаждение золота до толщины более 25 мкм, обеспечивающее контраст рабочего рентгеношаблона при использовании в жестком спектре СИ. Использование сочетания различных литографических методов обусловлено особенностями взаимодействия с веществом излучения различных диапазонов и необходимостью перенести изображение с ми-

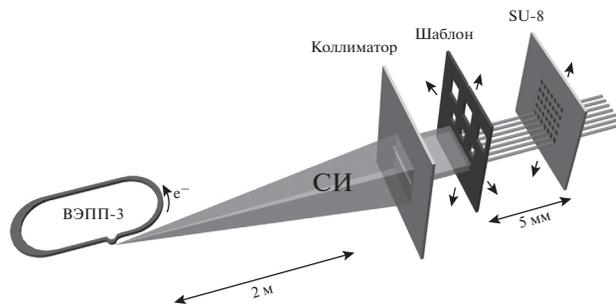


Рис. 2. Схема формирования регулярных микроstructures методом многолучевой прямой рентгенолитографии.

нимальными искажениями в глубокий резистивный слой.

Альтернативный метод – многолучевая динамическая рентгенолитография – разработан для формирования сложных топологических микроstructures (в том числе новых рентгеношаблонов для тиражирования глубоких сеточных структур) с использованием рентгеношаблона с отдельным элементом микроstructures. Топология структуры прорисовывается в слое рентгенорезиста толщиной 30–100 мкм коллимированным микропучком синхротронного излучения (СИ), представляющем собой “перо” или набор “перьев” (в варианте параллельной записи массивом микропучков). Схема реализации этого метода на станции рентгенолитографии на канале вывода СИ из накопителя ВЭПП-3 [4, 5] описана в работе [6] и схематически представлена на рис. 2. Таким образом, за один этап формируется заготовка рабочего рентгеношаблона для последующего осаждения золота. Рисунок 3 иллюстрирует этапы изготовления рентгеношаблона: формирование на подложке топологического рисунка (рис. 3а) и последующее гальваническое осаждение золота в полимерную структуру (рис. 3б).

В качестве материала подложки рентгеношаблона был выбран шлифованный стеклоуглерод толщиной 0.5 мм. Стеклоуглерод обладает высокой радиационной и химической стойкостью, электропроводностью для гальванопластики и высокой степенью пропускания рентгеновского излучения.

Таким образом, разработана технология изготовления рабочих шаблонов на основе двух методов формирования полимерных высокоаспектных заготовок и последующего гальванического формирования золотого слоя на электропроводящей подложке. На рис. 4 представлен фрагмент структуры высотой 370 мкм, сформированной посредством глубокой рентгенолитографии с использованием изготовленного ранее рентгеношаблона. Данная структура, по аналогии с этапом изготовления рентгеношаблона, используется как маска

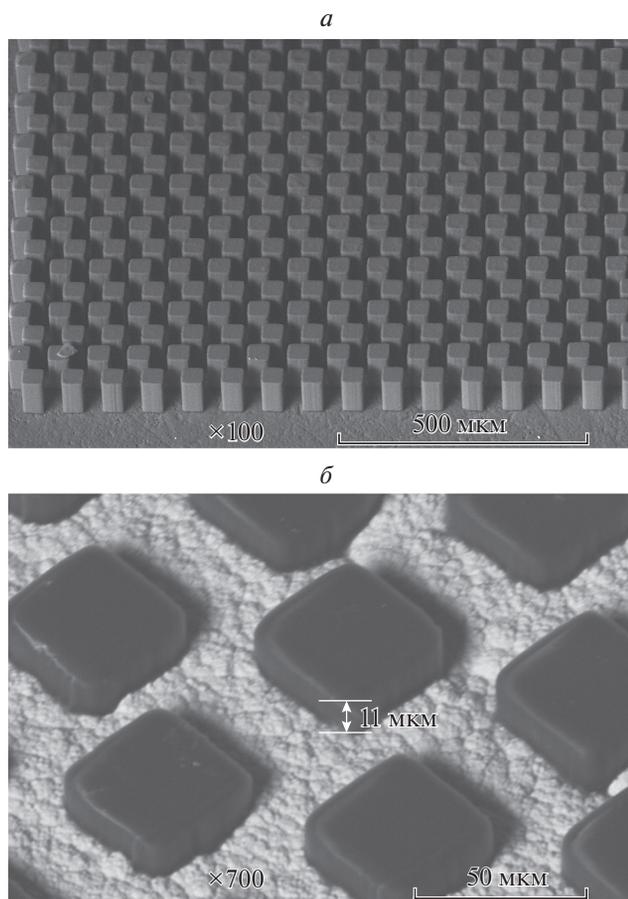


Рис. 3. СЭМ-фотографии этапов изготовления рентгеношаблона. *a* – заготовка шаблона – структура высотой 50 мкм из резиста SU8 на стеклогуглеродной подложке; *б* – готовый рентгеношаблон после осаждения золота в течение 18 ч.

для электролитического осаждения толстого слоя золота. Отработка процессов электролитического формирования бездефектного толстого слоя золота в полимерных микроструктурах в настоящее время продолжается.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ АНТИРАССЕИВАЮЩИХ СЕТОК ДЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ АППАРАТОВ

Предварительные исследования влияния антирассеивающих сеток проводили с использованием созданного по подобной технологии растра из никеля толщиной 1.2 мм.

Для исследования растров выбраны серийно выпускаемые импульсные рентгеновские трубки с взрывной эмиссией: ИМА2-150Д (рис. 5*a*), обладающая, за счет “пинч-эффекта” фокусом с гауссовским распределением яркости, и ИМА6Д, фокус у которой имеет вид кольца из за игольча-

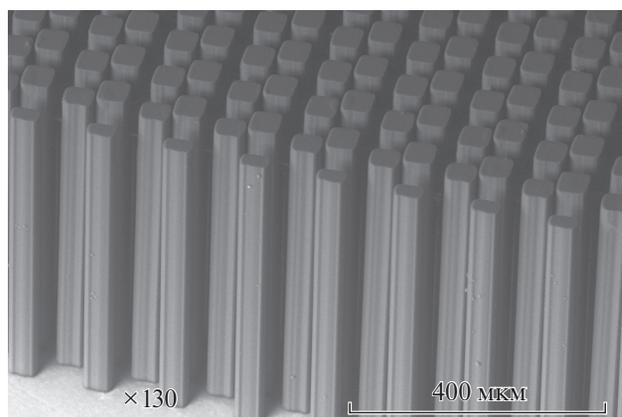


Рис. 4. СЭМ-фотография заготовки гальванического изготовления высокоаспектного антирассеивающего растра – массив столбиков из резиста SU-8 на проводящей подложке.

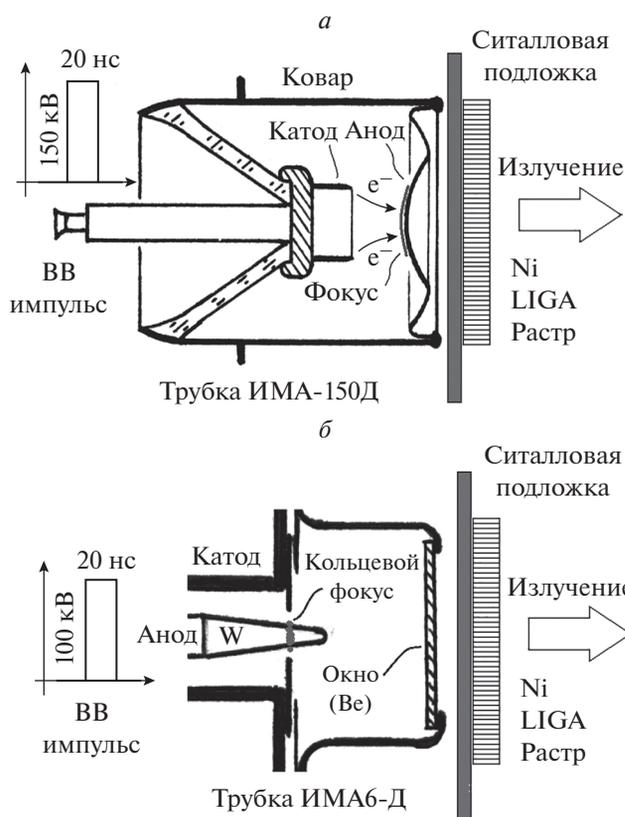


Рис. 5. Расположение растров относительно фокусов рентгеновских трубок.

того анода с углом при вершине конуса 14.25°, и кольцевого катода (рис. 5*б*). Размер фокуса обеих трубок 2.4 мм, но у первой он расположен непосредственно на внутренней поверхности выходного окна, а у второй углублен внутрь относительно выходного окна на 20 мм (рис. 5). В качестве источников наносекундных высоковольтных им-

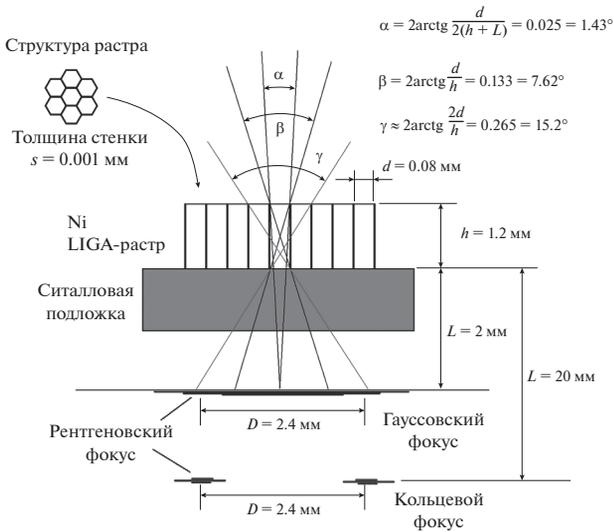


Рис. 6. Характерные апертурные углы раstra.

пульсов с напряжением 100 кВ (для ИМА2-150Д) и 150 кВ (ИМА6-Д) применялись схемы на основе трансформатора Тесла с разрядниками-обострителями [7].

На рис. 5 также показано расположение растров относительно фокусов трубок. Излучение не является монохроматическим, максимум приходится на половину ускоряющего напряжения, также, кроме тормозного, присутствуют пики характеристического излучения рения (для ИМА2-150Д) и вольфрама (для ИМА6-Д).

На рис. 6 показаны характерные апертурные углы для излучения, определяемого растром для эксперимента с трубкой ИМА2-150Д. α – угол, внутри которого рентгеновский пучок из отдельно взятой точки фокуса распространяется без контакта со стенками раstra. Угол β соответствует максимальному раскрытию угла, за пределами

которого начинается перекрытие пучка стенками раstra. $\beta/2$ соответствует первому минимуму яркости в дальней зоне при отсчете от оси отверстий раstra. γ – угол, под которым расположен второй минимум яркости в дальней зоне.

В случае рентгеновской трубки ИМА2-150Д расстояние фокус-растр (L , см. рис. 6), равно 2 мм. Поскольку фокус трубки ИМА6-Д углублен относительно ее выходного окна, минимальное расстояние фокус-растр составляет 20 мм. Соответственно, значение α для трубки ИМА6-Д будет $\alpha = 0.11^\circ$, а также появится угол, связанный с затенением излучения вершиной игольчатого анода.

Принципиальная схема размещения объектов в созданных стендах показана на рис. 7. Эксперименты в ближнем поле проводились нами ранее [8]. В дальнем поле, при $X > \frac{Dh}{d}$, выявляется

структура углового распределения пучков, сформированных при прохождении излучения через растр. Для исследуемого раstra с аспектным отношением $h/d = 1200/80 = 15$ граница между дальним и ближним полями $X = 36$ мм. В дальнем поле съемка ведется на расстоянии 500 мм.

В качестве детектора рентгеновского излучения применяются люминофоры с памятью (ImagePlate, ACD-CR, фотохоромные люминофоры) на основе $BaSrFBrCl:Eu$.

На рис. 8 показано распределение излучения в дальнем поле ($X = 500$ мм) для трубки ИМА2-150Д. Трассировка интенсивности от координаты проведена через центр картины по яркому лучу, что соответствует минимальному контрасту в поле детектирования. Верхняя кривая на графике – трассировка дальнего поля в отсутствие раstra.

Отчетливо видна гексагональная структура излучения, связанная с расположением отверстий в растре. Центральный пик трассировки имеет форму, близкую к треугольной. Разница координат между вершиной и основанием пика составляет

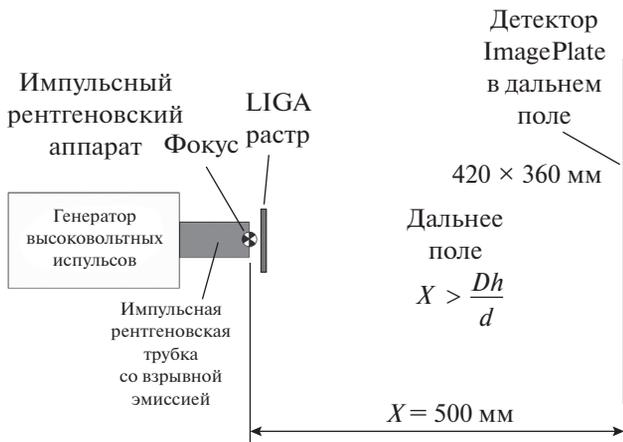


Рис. 7. Схема измерительного стенда.

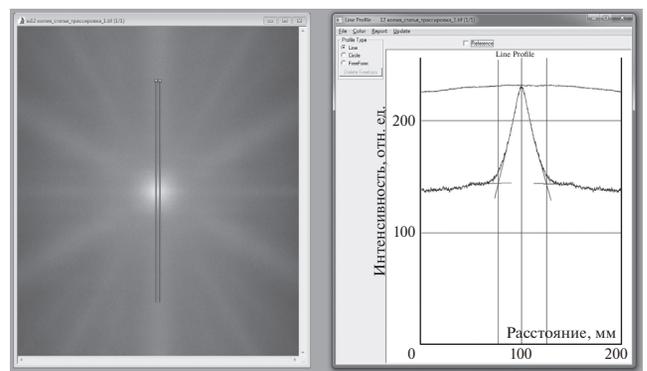


Рис. 8. Распределение излучения в дальнем поле с трассировкой для трубки с гауссовским фокусом.

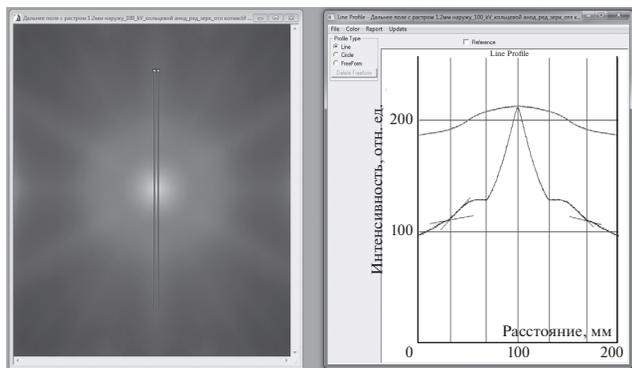


Рис. 9. Распределение излучения в дальнем поле с трассировкой для трубки с кольцевым фокусом.

23.8 мм (отмечено вертикальными линиями), что соответствует углу 0.0506 рад (2.72°). Это значительно больше чем $\alpha/2$, но меньше чем $\beta/2$. Дальнейшее изучение распределения требует точного математического моделирования с учетом поглощения в стенках растра. Тем не менее, можно отметить, что с использованием растра удалось сузить диаграмму направленности излучения рентгеновской трубки с паспортных 150° до 5.5°, то есть более чем в 20 раз.

На рис. 9 приведена трассировка по яркому лучу, расположенному на снимке вертикально и трассировка (верхняя кривая) дальнего поля в отсутствие растра. Видимое темное кольцо связано с особенностями человеческого зрения. Реально трассировка показывает монотонную функцию яркости. В практически монотонной кривой видны особенные точки (отмечены вертикальными линиями). Первая точка перегиба расположена на расстоянии 34 мм (3.87°) от вершины, что соответствует половине угла $\beta - 3.81^\circ$ (33.25 мм). Вторая точка перегиба находится на расстоянии 60 мм (6.81°), что находится в близком соответствии с углом от оси конуса анода трубки ИМАб-Д до образующей – 7.12° (62.5 мм). Остается открытым вопрос насчет совпадения второй точки перегиба с углом $\gamma/2 = 7.6^\circ$. Таким образом, необходимо построение более детальной теоретической модели для всех диапазонов углов, учитывающей спектры поглощения в растре, геометрию пучков и спектры излучения рентгеновских аппаратов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность использования LIGA-растра для увеличения пространственной когерентности излучения импульсных рентгеновских источников.

Показано, что для 100–150 кВ импульсных рентгеновских источников со взрывной эмиссией при помощи никелевого растра с аспектным

отношением 1 : 15 и высотой 1.2 мм угловое распределение пучка снижено со 150° до 5.5° для трубки с гауссовским фокусом и до 7.5° для трубки с кольцевым фокусом. Таким образом, получен квазипараллельный пучок рентгеновского излучения при помощи перпендикулярного растра. Диаметр пучка близок к размеру фокуса рентгеновской трубки в ближнем поле и расходится в дальнем поле под углом 5.5° и 7.5°.

Распределение интенсивности излучения в пьедестале имеет шестой порядок симметрии, что согласуется с формой растра.

Необходимо построение более детальной теоретической модели для всех диапазонов углов, учитывающей спектры поглощения в растре, геометрию пучков и спектры излучения рентгеновских аппаратов.

Вследствие неполного поглощения излучения, проходящего под углом к никелевому растру, при больших углах в диаграмме наблюдается пьедестал, который в случае применения золота вместо никеля должен существенно уменьшиться. Переход на растры из золота наиболее актуален для применения с аппаратом ПИР-600, имеющим более “жесткое” излучение.

При создании антирассеивающих растров используется инфраструктура Центра коллективного пользования “Сибирский центр синхротронного и терагерцевого излучения” (СЦСТИ) на базе накопительного комплекса ВЭПП-3/ВЭПП-4М ИЯФ СО РАН, поддержанного Министерством образования и науки РФ (проект RFMEFI62117X0012). Изучение свойств антирассеивающих растров поддержано грантом РФФИ и Правительства Новосибирской области № 17-42-540396.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. LIGA and Its Applications. V. 7. Eds. Saile V. et al. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.
2. Генцелев А.Н. и др. / Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 9. С. 1351. doi 10.7868/S0367676513090135
3. Генцелев А.Н. и др. // Автометрия. 2018. Т. 54. № 2. С. 20. doi 10.15372/AUT20180202
4. Piminov P.A. et al. // Phys. Proc. 2016. V. 84. P. 19. doi 10.1016/j.phpro.2016.11.005
5. Goldenberg B.G. et al. // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 205. doi 10.1016/j.phpro.2016.11.036
6. Гольденберг Б.Г. и др. // Поверхность. Рентген., синхрот. и нейтр. исслед. 2016. № 1. С. 64.
7. Пальчиков Е.И., Биченков Е.И. // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33. № 3. С. 159.
8. Nazmov V.P., Palchikov E.I., Krivtsov T.S. // Physics Procedia. 2016. V. 84. P. 238.