



Получено: 3.08.2023 г. | Принято: 13.08.2023 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.256.264>

Научная статья

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЕЙ МЕТОДАМИ ВАКУУМНОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

А.И.Арефьев¹, инженер-исследователь специзделий, ORCID: 0009-0002-2317-4698
В.Н.Горнов¹, ведущий инженер-исследователь специзделий, ORCID: 0009-0001-6828-2476
Л.Е.Пешкичева¹, инженер-исследователь специзделий, ORCID: 0009-0004-3483-1176
О.С.Юрченко¹, научный сотрудник, ORCID: 0009-0001-0837-2197
Л.Е.Гусс¹, инженер-исследователь специзделий, ORCID: 0009-0006-3140-9820
А.В.Савельев¹, лаборант физической лаборатории, ORCID: 0009-0006-8123-3982
А.П.Котов¹, лаборант физической лаборатории, ORCID: 0009-0003-2768-9434 / dep5@vniitf.ru

Аннотация. В статье представлены результаты отработки технологии изготовления многослойных тонкопленочных лазерных мишеней. Приведены результаты исследования как исходных материалов, использованных для изготовления мишеней, так и полученных образцов тонких пленок.

Ключевые слова: технология, лазерные мишени, лазерный импульс, вакуумное напыление, тугоплавкие материалы, тонкие пленки, исследование материалов и покрытий

Для цитирования: А.И. Арефьев, В.Н. Горнов, Л.Е. Пешкичева, О.С. Юрченко, Л.Е. Гусс, А.В. Савельев, А.П. Котов. Изготовление лазерных мишеней методами вакуумного нанесения покрытий. НАНОИНДУСТРИЯ. 2023. Т. 16, № 5. С. 256–264. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.256.264>

Received: 3.08.2023 | Accepted: 13.08.2023 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.256.264>

Original paper

FABRICATION OF LASER TARGETS BY VACUUM COATING

A.I.Arefev¹, Special products research engineer, ORCID: 0009-0002-2317-4698
V.N.Gornov¹, Leading research engineer, ORCID: 0009-0001-6828-2476
L.E.Peshkicheva¹, Special products research engineer, ORCID: 0009-0004-3483-1176
O.S.Yurchenko¹, Researcher, ORCID: 0009-0001-0837-2197
L.E.Guss¹, Special products research engineer, ORCID: 0009-0006-3140-9820
A.V.Savelyev¹, Physical laboratory assistant, ORCID: 0009-0006-8123-3982
A.P.Kotov¹, Physical laboratory assistant, ORCID: 0009-0003-2768-9434 / dep5@vniitf.ru

Abstract. The paper presents the results of the development of manufacturing technology for multilayer thin-film laser targets. The study results of both the starting materials used for the manufacture of targets and the obtained samples of thin films are presented.

Keywords: technology, laser targets, laser pulse, vacuum deposition, refractory materials, thin films, investigation of materials and coatings

For citation: A.I. Arefev, V.N. Gornov, L.E. Peshkicheva, O.S. Yurchenko, L.E. Guss, A.V. Savelyev, A.P. Kotov. Fabrication of laser targets by vacuum coating. NANOINDUSTRY. 2023. V. 16, no. 5. PP. 256–264. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.256.264>.

¹ ФГУП "Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина", Снежинск, Россия / Federal State Unitary Enterprise "Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Technical Physics named after academician E.I. Zababakhin", Snezhinsk, Russia



ВВЕДЕНИЕ

В РФЯЦ-ВНИИТФ проводятся эксперименты по исследованию спектральных пробегов излучения на мощных лазерных установках с ультракороткой длительностью импульса. Идея экспериментов заключается в быстром нагреве тонкого (0,1-0,4 мкм) плоского слоя исследуемого вещества (Al, Cu, Au...) ультракоротким лазерным импульсом и измерении спектров рентгеновской эмиссии (поглощения) нагретого слоя. Для предотвращения разлета слоя исследуемого вещества он помещается в обкладки из легкого тугоплавкого материала (B, C, CH, Be) с толщиной от 1 до 4 мкм, который полностью ионизован и прозрачен для выходящего излучения внутреннего заховренного слоя [1]. Для отработки технологии изготовления таких мишеней была выбрана конструкция В-Al-В. Мишени представляют собой многослойную свободновисящую пленку, закрепленную в оправке из нержавеющей стали с отверстием диаметром 1 мм (рис.1). Количество и варианты толщин слоев приведены в табл.1. Для оценки необходимых вариантов мишеней по толщинам слоев использованы работы [2, 3].

ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЕЙ

Получение тонких слоев мишеней производилось с помощью магнетронного распыления (для Al) и электронно-лучевого испарения

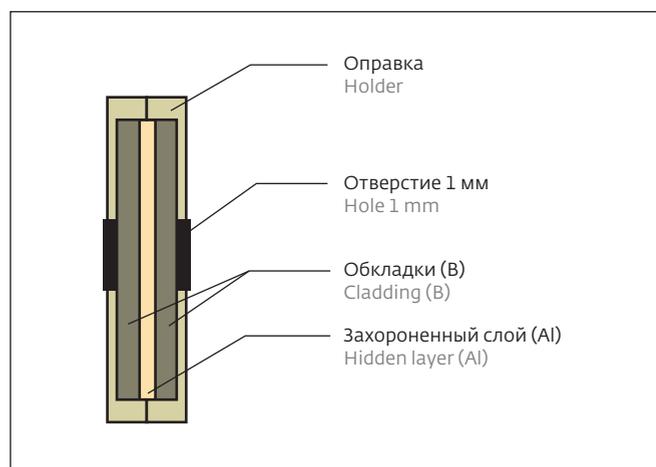


Рис.1. Конструкция мишени Al-B-Al

Fig.1. Al-B-Al target design

INTRODUCTION

At Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Technical Physics experiments are conducted to study spectral runs of radiation on high-power laser installations with ultrashort pulse duration. The idea of the experiments is to rapidly heat a thin (0.1–0.4 μm) flat layer of the substance under study (Al, Cu, Au...) with an ultrashort laser pulse and measure the X-ray emission (absorption) spectra of the heated layer. In order to prevent the studied substance layer from evaporating, it is placed in covers made of light refractory material (B, C, CH, Be) with a thickness from 1 to 4 μm, which is fully ionised and

Таблица 1. Параметры мишеней

Table 1. Parameters of targets

№	Толщина первого обкладочного слоя (B), мкм Thickness of the first cladding layer (B), μm	Толщина исследуемого материала (Al), мкм Thickness of the tested material (Al), μm	Толщина второго обкладочного слоя (B), мкм Thickness of the second cladding layer (B), μm
1	1	0,1	1
2	2	0,1	2
3	4	0,1	2
4	1	0,2	1
5	2	0,2	2
6	4	0,2	2
7	1	0,4	1
8	2	0,4	2
9	4	0,4	2

(для В). Нанесение буферного слоя NaCl выполнялось методом резистивного испарения.

На первоначальном этапе обработки технологии было принято решение о нанесении обкладочного слоя бора на подложку с нанесенным буферным слоем NaCl. Данный способ позволил бы получить свободновисящую пленку бора, на которую в дальнейшем было бы нанесено покрытие из алюминия и второй обкладочный слой бора. Однако, при попытках снятия пленки бора с подложки из стекла методом флотации, происходило ее полное разрушение, предположительно связанное с избыточным напряжением внутри пленки [4].

Поэтому было решено нанести обкладочные слои бора на свободновисящую пленку алюминия. Но при попытках нанесения обкладочных слоев на Al толщиной 0,1 и 0,2 мкм происходила его деформация и частичное разрушение в процессе формирования слоя бора, из-за возникающих напряжений в пленке. Нанесение же обкладочных слоев на свободновисящую пленку Al толщиной 0,4 мкм показало, что данная толщина пленки позволяет наносить на нее бор толщиной более 1 мкм на каждую из сторон без нарушения ее целостности.

В качестве подложки, для изготовления мишеней, использовался диск из стекла КУ. Буферный слой NaCl напылялся резистивным способом на установке вакуумного напыления УВН - 2М. При достижении внутри вакуумной камеры рабочего давления, навеска соли испарялась из испарителя коробчатого типа, изготовленного из молибденовой фольги, при нагреве до температуры испарения соли. Напыление буферного слоя NaCl производилось непосредственно перед нанесением Al на подложку, так как при длительном хранении подложек с напыленным буферным слоем происходит абсорбция молекул воды из атмосферы пленкой NaCl, приводящая к ухудшению структуры поверхности.

Для получения пленки алюминия применялось магнетронное распыление алюминиевой мишени на установке ВУМР-1. Подложка с предварительно нанесенным слоем NaCl устанавливалась в металлическом подложкодержателе непосредственно над зоной распыления мишени. Перед подложкой устанавливалась маска из металлической фольги с отверстиями диаметром 4 мм (диаметр мишени). В качестве рабочего газа использовался аргон. Для исключения перегрева наносимого слоя Al напыление проводилось в несколько этапов

transparent to outgoing radiation of the inner buried layer [1]. The B-Al-B design was chosen to work out the fabrication technology of such targets. The targets are a multilayer free-hanging film fixed in a stainless steel holder with a 1 mm diameter hole (Fig.1). The number and variants of layer thicknesses are summarised in Table 1. The works [2, 3] were used to evaluate the necessary variants of targets by layer thicknesses.

DEVELOPMENT OF MULTILAYER THIN-FILM LASER TARGETS MANUFACTURING TECHNOLOGY

Thin targets layers were obtained by magnetron sputtering (for Al) and electron beam evaporation (for B). The NaCl buffer layer was deposited by resistive evaporation.

At the initial stage of technology development, it was decided to deposit a boron cladding layer on a substrate with an applied NaCl buffer layer. This method would allow to obtain a free-hanging boron film on which the aluminium coating and the second boron cladding layer would be subsequently deposited. However, when attempts were made to remove the boron film from the glass substrate using flotation method, complete destruction occurred, presumably due to excessive stress within the film [4].

Therefore, it was decided to apply boron cladding layers on the free-hanging aluminium film. However, at attempts to apply cladding layers on Al with thickness of 0.1 μm and 0.2 μm it was deformed and partially destroyed in the process of boron layer formation due to the stresses arising in the film. The application of cladding layers on a free-hanging Al film with a thickness of 0.4 μm showed that this film thickness allows to apply boron with a thickness of more than 1 μm on each side of the film without violating its integrity.

A disc of KU glass was used as a substrate for target fabrication. The NaCl buffer layer was sputtered resistively on a vacuum sputtering unit UVN-2M. When the working pressure was reached inside the vacuum chamber, salt suspension was evaporated from a box-type evaporator made of molybdenum foil by heating to the salt evaporation temperature. Sputtering of the NaCl buffer layer was performed immediately before Al deposition on the substrate, because during long-term storage of substrates with a sputtered buffer layer, absorption of water molecules from the atmosphere by the NaCl film occurs, leading to deterioration of the surface structure.

Magnetron sputtering of aluminium target on the VUMR-1 unit was used to obtain aluminium film. A substrate with a pre-applied NaCl layer was installed in a metal substrate holder directly above the target sputtering zone. A metal foil mask with holes of 4 mm diameter (target diameter) was installed in front of the substrate. Argon was used as the working gas. To exclude overheating of the applied Al layer, sputtering was carried out in



с перерывами. Контроль температуры производился термодатчиком, закрепленным на подложкодержателе.

Заключительным этапом изготовления свободновисящей пленки алюминия являлось ее снятие со стеклянной подложки и закрепление в оправке. Для этого подложку с пленкой осторожно погружали в дистиллированную воду, после растворения буферного слоя соли пленка отделялась и всплывала на поверхность. Затем ее вылавливали на одну из частей оправки из нержавеющей стали толщиной 0.1 мм с отверстием по центру 1 мм. Закрепление пленки в оправке проводилось за счет зажимания ее между двумя частями оправки с последующей их точечной сваркой.

Нанесение тонких обкладочных слоев бора производилось на установке ВУ-2М электронно-лучевым способом. Для крепления заготовок мишеней (пленка Al, закрепленная в оправке) на подложкодержателе, размещаемом в камере установки, к ним приваривались точечной сваркой ножки из нихромовой проволоки толщиной 0,8 мм, которые после завершения нанесения обкладочных слоев бора удалялись. Подложкодержатель с мишенями и свидетелями располагался непосредственно над испарителем. В качестве испарителя применялись графитовые тигли с косвенным охлаждением. Так как пленки бора при использовании испарителей из углерода не являются чистыми, необходимо охлаждение тиглей для предотвращения взаимодействия материала тигля с испаряемым веществом [5]. В качестве испаряемого материала использовался порошкообразный бор (чистота 99,99%). Для исключения разбрызгивания материала из тигля в процессе испарения предварительно проводилось его спекание. Для исключения перегрева пленки алюминия напыление бора на каждую сторону проводилось в несколько этапов с перерывами. В процессе нанесения бора скорость напыления и толщина пленки контролировались акустооптическим спектрофотометром AOS-3S.

Нанесение обкладочных слоев бора происходило за два цикла, при одинаковых параметрах на каждую из сторон мишеней. На рис.2 представлен снимок готовой мишени В-Al-B, выполненный на микроскопе MEIJI MC50T с 75-кратным увеличением.

Измерение толщин полученных пленок алюминия и бора производилось по датчикам-свидетелям, которые устанавливались

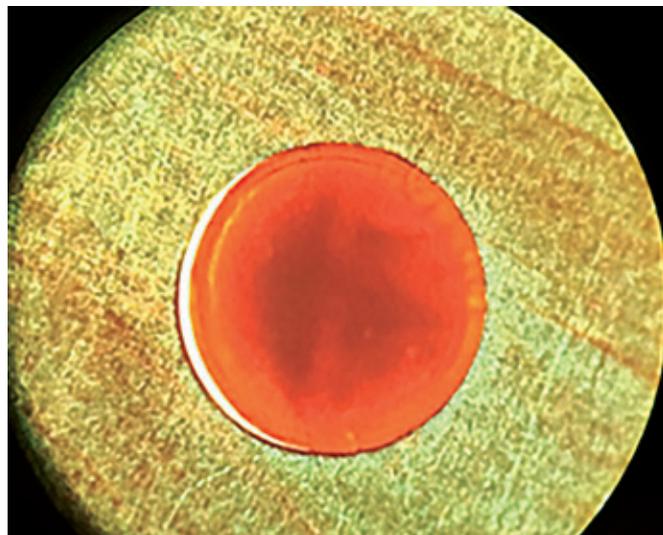


Рис.2. Мишень В-Al-B

Fig.2. Target B-Al-B

several stages with breaks. The temperature was monitored by a thermocouple sensor attached to the substrate holder.

The final step in the fabrication of free-hanging aluminium film was its removal from the glass substrate and fixation in the holder. For this purpose, the substrate with the film was carefully immersed in distilled water, after dissolution of the buffer layer of salt, the film separated and floated to the surface. It was then pulled out onto one part of a 0.1 mm thick stainless steel holder with a 1 mm hole in the centre. The film was fixed in the holder by clamping it between two parts of the holder with subsequent spot welding.

Thin boron cladding layers were applied on the VU-2M unit by electron-beam method. To fix the target blanks (Al film fixed in a holder) on the substrate holder placed in the chamber of the unit, legs made of 0.8 mm thick nichrome wire were spot welded to them, which were removed after completion of application of boron cladding layers. The substrate holder with targets and witnesses was placed directly above the evaporator. Graphite crucibles with indirect cooling were used as the evaporator. Since boron films are not pure when using carbon evaporators, it is necessary to cool the crucibles to prevent interaction of the crucible material with the evaporated material [5]. Powdered boron (99.99% purity) was used as the vaporised material. To exclude splashing of the material from the crucible in the process of evaporation, its sintering was carried out beforehand. To avoid overheating of the aluminium film, boron sputtering on each side was carried out in several stages with breaks. During the boron deposition process, the sputtering rate and film thickness were monitored with an acousto-optical spectrophotometer AOS-3S.

Таблица 2. Параметры изготовленных мишеней

Table 2. Parameters of prepared targets

Материал Material	1-пробная партия мишеней 1 test batch of targets		2-пробная партия мишеней 2 test batch of targets		3-пробная партия мишеней 3 test batch of targets	
	Толщина, нм Thickness, nm	Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	Толщина, нм Thickness, nm	Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	Толщина, нм Thickness, nm	Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³
Бор Boron	897 ±16	2,3±0,2	1457 ±26	2,3±0,2	1840 ±33	2,3±0,2
Алюминий Aluminium	380±7	2,5±0,2	380±7	2,5±0,2	380±7	2,5±0,2
Бор Boron	894±16	2,3±0,2	1480±27	2,3±0,2	1834±33	2,3±0,2

в непосредственной близости от мишеней. В качестве свидетеля использовались стеклянные пластины. Перед свидетелем устанавливалась маска из металлической фольги. Таким образом, на незакрытой поверхности образовывалась ступенька. Сканируя ее высоту на профилометре FRT MicroSpy Profile с вертикальным разрешением 6 нм, определяли толщину получаемых слоев. В табл.2 приведены результаты измерений толщин слоев изготовленных мишеней. Погрешность измерений составила 1,8% для бора и 2% - для алюминия.

Погрешности измерений толщин пленок рассчитаны по формуле:

$$\Delta h = t_{\nu, n-1} \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n-1}}}{\sqrt{n}}, \quad (1)$$

где $t_{\nu, n-1}$ - коэффициент Стьюдента.

Расчеты проводились для доверительной вероятности 0,95.

Измерение плотности полученных пленок проводилось путем взвешивания стеклянного свидетеля до напыления и после и расчета по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2)$$

где $V = \pi \cdot r^2 \cdot h$.

Погрешность измерений составила 9%. Результаты измерений плотности пленок приведены в табл.2.

Погрешности измерений плотности пленок рассчитаны по формуле:

The boron cladding layers were deposited in two cycles, with the same parameters on each side of the targets. Figure 2 shows an image of the finished B-Al-B target, performed on a MEIJI MC50T microscope with 75x magnification.

Thickness of the obtained aluminium and boron films were measured using witness sensors, which were installed in close proximity to the targets. Glass plates were used as a witness. A metal foil mask was placed in front of the witness. Thus, a step was formed on the uncovered surface. Scanning its height on the FRT MicroSpy Profile profilometer with a vertical resolution of 6 nm, the thickness of the resulting layers was determined. Table 2 summarises the results of layer thickness measurements of the fabricated targets. The measurement error was 1.8% for boron and 2% for aluminium.

The errors of film thickness measurements are calculated by the formula:

$$\Delta h = t_{\nu, n-1} \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n-1}}}{\sqrt{n}}, \quad (1)$$

where $t_{\nu, n-1}$ is Student's coefficient.

Calculations were performed for a confidence level of 0.95.

Density of the obtained films was measured by weighing the glass witness before and after sputtering, and calculated according to the formula:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2)$$

where $V = \pi \cdot r^2 \cdot h$.

The measurement error was 9%. The results of film density measurements are given in Table 2.



Таблица 3. Исследуемые образцы

Table 2. Studied samples

№ образца Sample No.	Характеристика Characteristics
1	Сплавленный порошкообразный бор (99,99 %) Fused powdered boron
2	Бор, напыленный электронно-лучевым методом на пластину из нержавеющей стали, толщина покрытия 700 нм Electron-beam sputtered boron on stainless steel plate, coating thickness 700 nm
3	Мишень В-Al-B, толщина слоев 897 нм – 380 нм – 894 нм соответственно B-Al-B target, layer thicknesses of 897 nm – 380 nm – 894 nm respectively
4	Алюминиевая стружка (материал магнетронной мишени) Aluminium chips (magnetron target material)

$$\Delta\rho = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(2 \cdot \frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2} \quad (2)$$

Непосредственно перед напылением проводилась сушка подложек для удаления влаги с поверхности и из пор стекла, значительно влияющей на начальный вес подложки и соответственно на результаты измерений.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОНКИХ ПЛЕНОК И МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ДЛЯ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

Для определения химического состава образцов, указанных в табл.3, был выполнен анализ при помощи сканирующего электронного микроскопа, оснащенного энергодисперсионным спектрометром.

Для определения химического элементного состава из образца № 1 был изготовлен микрошлиф. Характерный снимок микроструктуры материала образца № 1 и рентгеновские спектры с поверхности различных фаз приведены на рис.3. Видно, что образец состоит из двух фаз. В рентгеновском спектре с поверхности темной фазы регистрируются линии, принадлежащие бору (спектр 24); светлой фазы – бор, гафний, титан (спектр 25).

Наличие примесей гафния и титана в образце № 1 обусловлено возможностью их попадания в тигель, в процессе спекания бора, с элементов внутрикамерной арматуры установки ВУ-2М.

Для определения химического элементного состава материала образцов № 2-3 с их поверхности были получены рентгеновские спектры.

The film density measurements errors are calculated by the formula:

$$\Delta\rho = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(2 \cdot \frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2} \quad (2)$$

Immediately prior to sputtering, the substrates were dried to remove moisture from the surface and pores of the glass, which significantly affects onto the initial weight of the substrate and, consequently, the measurement results.

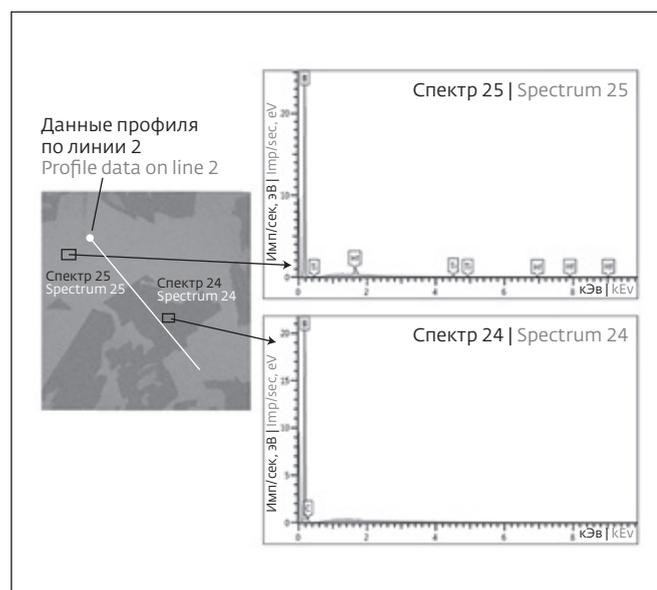


Рис.3. Характерный снимок микроструктуры образца № 1 и рентгеновские спектры с поверхности различных фаз
Fig.3. Characteristic image of microstructure of sample No. 1 and X-ray spectra from the surface of different phases

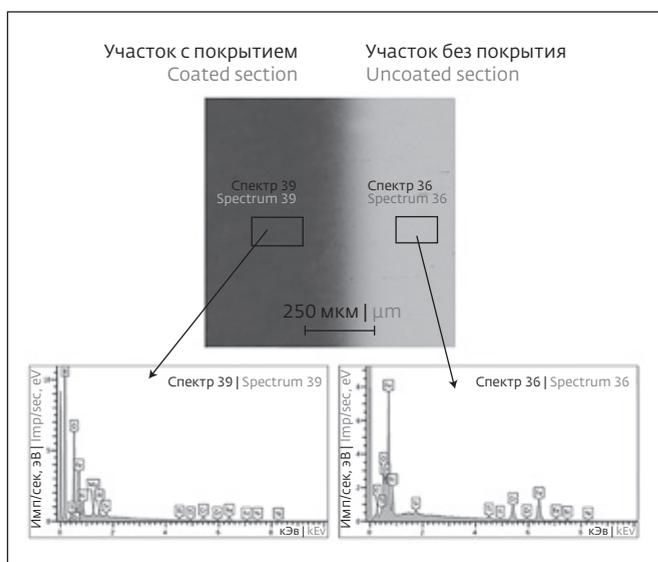


Рис.4. Рентгеновские спектры с поверхности образца № 2
Fig.4. X-ray spectra from the surface of sample No. 2

Погрешность анализа не нормирована. Зона генерации рентгеновского излучения при анализе захватывает всю толщину в образце № 3, в образце № 2 захватывает подложку.

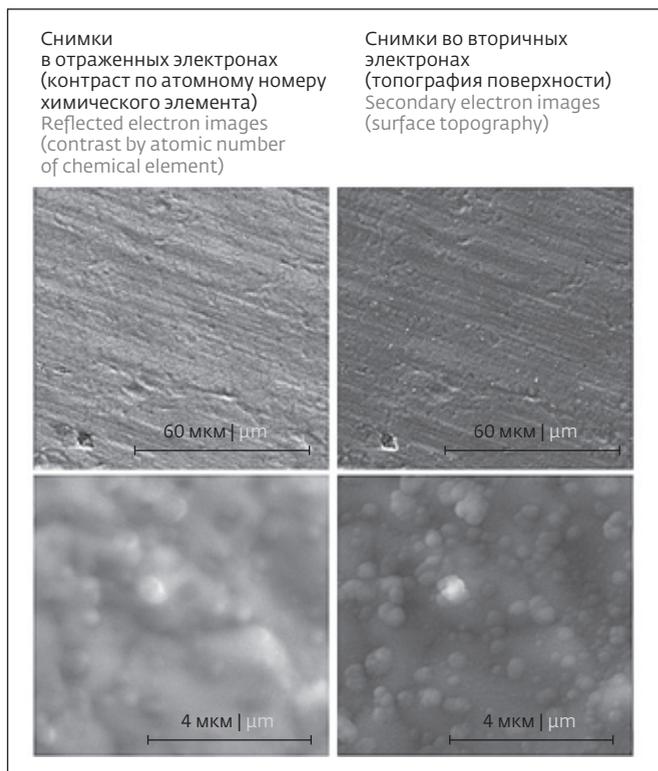


Рис.6. Снимки поверхности материала образца № 2
Fig.6. Images of the surface of the material of sample No. 2

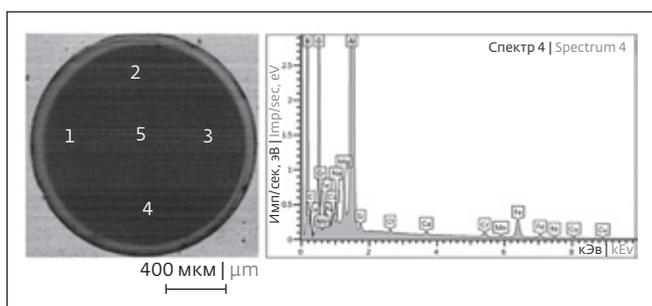


Рис.5. Рентгеновские спектры с поверхности образца № 3
Fig.5. X-ray spectra from the surface of sample No. 3

STUDY OF STRUCTURE AND ANALYSIS OF CHEMICAL COMPOSITION OF THIN FILMS AND MATERIALS USED FOR THEIR FORMATION

To determine chemical composition of the samples listed in Table 3, the samples were analysed using a scanning electron microscope equipped with an energy dispersive spectrometer.

To determine chemical elemental composition, a polishing section was made from sample No. 1. A characteristic photograph of the microstructure of the material of sample No.1 and X-ray spectra from the surface of different phases are shown in Fig.3. It can be seen that the sample consists of two phases. In the

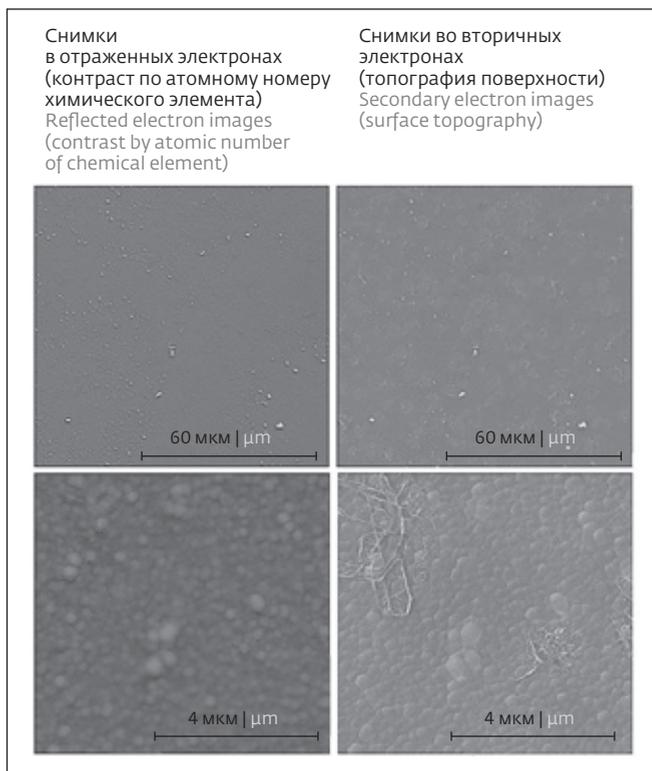


Рис.7. Снимки поверхности материала образца № 3
Fig.7. Images of the surface of the material of sample No. 3



Таблица 4. Химический элементный состав материала образцов, вес. %
Table 4. Chemical elemental composition of sample material, weight %

№	Химический элемент, вес. % Chemical element, weight %													
	B	Al	Mg	Fe	Cr	Si	Ca	Ni	Mn	Cl	Cu	Ti	Na	Hf
1	99,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,1	–	0,5
2	75,2	0,2	0,4	15,9	6,0	0,3	–	0,6	–	–	–	1,1	–	–
3	89,7	9,2	0,2	0,7	0,1	+	+	+	+	+	+	–	+	–
4	–	99,9	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+	–

Примечание: "+" – содержание химического элемента < 0,1 вес.%.
Note: "+" - content of chemical element < 0.1 weight.%.

В рентгеновском спектре с поверхности покрытия в образце № 2 регистрируются линии, принадлежащие бору, алюминию, магнию, кислороду, железу, никелю, хрому, титану, кремнию (спектр 39, рис.4). При этом железо, никель, хром, титан и кремний принадлежат материалу подложки (спектр 36, рис.4). С уверенностью можно сказать, что бор, алюминий, кислород и магний принадлежат только покрытию. Наличие алюминия и магния в покрытии менее 1% (табл.4).

Вид мишени в оправке из нержавеющей стали (образец № 3) и рентгеновские спектры с поверхности мишени приведены на рис.5. Цифрами на снимке обозначены участки сбора спектра. Размер области сбора спектра в каждой точке составил 70 × 50 мкм. Химический элементный состав материала образца № 3 приведен в сводной табл.4 (результаты усреднены по данным с пяти участков).

На рис.6–7 приведены снимки поверхности образцов № 2–3. Поверхность образцов имеет выраженный рельеф, представлена частицами сферической формы. По снимкам в отраженных электронах (контраст по атомному номеру химического элемента) видно, что в структуре нет отдельных включений. Более светлые участки на снимках обусловлены выступами структурных составляющих.

Снимок во вторичных электронах поверхности стружки (образец № 4) и рентгеновские спектры с ее поверхности приведены на рис.8. В химический элементный состав стружки входит алюминий, натрий (табл.4).

X-ray spectrum from the surface of the dark phase, lines belonging to boron are registered (spectrum 24); of the light phase – boron, hafnium, titanium (spectrum 25).

The presence of hafnium and titanium impurities in sample No. 1 is due to the possibility of their penetration into the crucible during boron sintering from the elements of the in-chamber fittings of the VU-2M unit.

To determine chemical elemental composition of the material of samples No. 2-3, X-ray spectra were obtained from their surface. The error of the analysis is not normalised. The zone of generation of X-ray radiation during the analysis captures the whole thickness in sample No. 3, in sample No. 2 captures the substrate.

In the X-ray spectrum from the coating surface in sample No. 2, lines belonging to boron, aluminium, magnesium, oxygen, iron, nickel, chromium, titanium, and silicon are registered (spectrum 39, Fig.4). At the

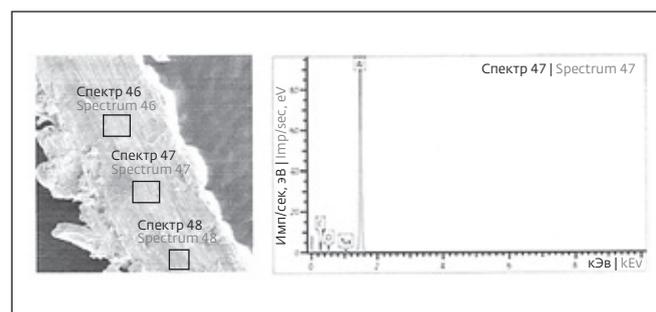


Рис.8. Снимок в отраженных электронах поверхности образца № 4 и спектр с его поверхности
Fig.8. Reflected electron image of the surface of sample No.4 and spectrum from its surface

ВЫВОДЫ

В результате проделанной работы отработана технология изготовления многослойных лазерных мишеней с обкладочными слоями из тугоплавкого материала. Изготовлены пробные партии мишеней. Погрешность изготовления толщин слоев не превысила 10%, погрешность измерений толщин слоев не превысила 2%, погрешность измерений плотности слоев 9%. Проведен химический анализ мишеней и образцов материала.

Дальнейшее направление в развитии работ по изготовлению многослойных лазерных мишеней В-Аl-В видится в подборе оптимальных режимов и параметров напыления, исключающих повреждение свободновисящей пленки алюминия из-за возникающих напряжений в формируемых слоях бора. Данная проблема особенно актуальна при уменьшении толщины пленки алюминия до 100 нм и увеличении толщин обкладочных слоев бора до 4 мкм.

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Потапов А.В., Лобода Е.А., Политов В.Ю. и др. // Физика плазмы. 2007. Т. 33, № 3.
2. Политов В.Ю. Моделирование распространения тепловой волны в мишени в условиях облучения высокоинтенсивным р-поляризованным лазерным излучением // Квантовая электроника. 2013. Т. 43, № 5.
3. London R.A., Castor J.I. Design of short pulse laser driven opacity experiments // High Energy Density Physics. 2013. Vol. 9. PP. 725-730.
4. Майсела Л., Глэнга Р. Технология тонких пленок. М., 1977.
5. Шугуров А.Р., Панин А.В. Механизмы возникновения напряжений в тонких пленках и покрытиях. Томск: Институт физики и материаловедения СО РАН, 2020.

same time iron, nickel, chromium, titanium and silicon belong to the substrate material (spectrum 36, Fig.4). It is safe to say that boron, aluminium, oxygen and magnesium belong only to the coating. The presence of aluminium and magnesium in the coating is less than 1% (Table 4).

The view of the target in a stainless steel holder (sample No. 3) and X-ray spectra from the surface of the target are shown in Fig.5. Numbers on the image indicate the areas of spectrum acquisition. The size of the spectrum acquisition area at each point was $70 \times 50 \mu\text{m}$. The chemical elemental composition of the material of sample No. 3 is given in the summary table 4 (the results are averaged over the data from 5 sites).

Figs 6-7 shows images of the surface of samples No. 2-3. The surface of samples has a pronounced relief, represented by spherical particles. The reflected electron images (contrast by atomic number of chemical element) show that there are no separate inclusions in the structure. The lighter areas on the images are caused by protrusions of structural components.

The secondary electron image of the chip surface (sample No. 4) and X-ray spectra from its surface are shown in Fig.8. The chemical elemental composition of the chips includes aluminium, sodium (Table 4).

CONCLUSIONS

As a result of this work, the multilayer laser targets manufacturing technology with cladding layers made of refractory material has been developed. Trial batches of targets were produced. The manufacturing error of layer thicknesses did not exceed 10%, the error of layer thickness measurements did not exceed 2%, the error of layer density measurements 9%. Chemical analysis of targets and material samples was performed.

The further direction in the development of our work on the fabrication of multilayer В-Аl-В laser targets is indicated in the selection of optimal modes and parameters of sputtering, excluding damage to the free-hanging aluminium film due to stresses in the formed boron layers. This problem is especially relevant when the aluminium film thickness is reduced to 100 nm and the thickness of boron cladding layers is increased to $4 \mu\text{m}$.

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



ТЕРМООБРАБОТКА

Шестнадцатая международная специализированная выставка

Единственная в России выставка
термического оборудования и технологий

12 - 14 сентября 2023

Россия, Москва, ЦВК "Экспоцентр", павильон 7



Основные разделы:

- » Оборудование для термической и химико-термической обработки
- » Промышленные печи и сушильные шкафы
- » Жаропрочная оснастка
- » Индукционное оборудование
- » Огнеупорные и теплоизоляционные материалы
- » Изделия из графита, углеродного волокна и углерод-углеродных композитов
- » Лабораторное и контрольно-измерительное оборудование
- » Вакуумная техника
- » Автоматизация производства

Организатор:



Независимый
выставочный
аудит



В рамках выставки "Термообработка - 2023" 13 сентября пройдёт
**Шестнадцатая международная научно-практическая конференция
"Инновационные технологии термообработки"**
Место проведения: Москва, ЦВК "Экспоцентр", павильон 7, конференц-зал

Информационная поддержка:



Официальный сайт выставки:
www.htexporus.ru

