

## **ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЕ НАПЫЛЕНИЕ ПЛЕНОК ГЕКСАБОРИДА ЛАНТАНА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ АНТИОТРАЖАЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ**

А.А. КУЗАНЯН\*, А.С. КУЗАНЯН, С.И. ПЕТРОСЯН,  
В.С. КУЗАНЯН, Г.Р. БАДАЛЯН

Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

\*e-mail: astghik.kuzanyan@gmail.com

(Поступила в редакцию 20 октября 2019 г.)

Разработка эффективных антиотражающих покрытий электромагнитного излучения является необходимой основой для решения широкого круга фундаментальных и прикладных задач. Мы исследовали условия получения методом электронно-лучевого напыления нанокристаллических пленок гексаборида лантана ( $\text{LaB}_6$ ) на подложках  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{W}$  и покрытиях  $\text{CeB}_6$  и  $\text{W}$ . Исследованы фазовый и элементный состав, микроструктура и оптические характеристики образцов, полученных при различных условиях напыления. Изучена взаимосвязь спектров отражения и шероховатости поверхности образцов. Определена область электромагнитного спектра, в которой полученные пленки могут использоваться в качестве антиотражающих покрытий.

### **1. Введение**

Развитие науки и высоких технологий на современном этапе обусловлено созданием нового поколения измерительных устройств с повышенными характеристиками и созданием новых устройств на основе последних достижений фундаментальной науки. К числу таких устройств относятся однофотонные детекторы (SPD – single photon detector), которые способны регистрировать одиночный фотон и определить его энергию [1]. В последние годы наблюдается экспоненциальное повышение интереса к однофотонным источникам и детекторам видимого и ИК диапазонов из-за ускоренного развития таких областей науки как квантовая оптика [2], квантовая обработка информации и телекоммуникационные системы [3–5]. Одновременно повышается интерес к детекторам УФ и рентгеновского диапазонов в астрофизике и космической астрофизике, лазерной физике, традиционной и квантовой метрологии, физике высоких энергий, медицинском приборостроении, флуоресцентной микроскопии, рентгеновском микроанализе и биолюминесценции [6].

На данном этапе развития однофотонного детектирования наиболее

высокими характеристиками обладают сверхпроводящие нанопроволочные детекторы (SNSPD – superconducting nanowire single photon detector) [7, 8]. Они обладают высоким энергетическим разрешением, большой скоростью счета, низким темновым счетом в широкой области электромагнитного спектра. Одной из важнейших характеристик SPD является эффективность детектирования, а именно, отношение числа зарегистрированных фотонов к числу попавших в детектор [9]. В телекоммуникационных системах, устройствах квантовой обработки информации, использующих излучение ближней ИК области, малая эффективность детектирования недопустима. Именно поэтому в ряде работ рассматривается задача повышения эффективности SPD ИК диапазона. Системная эффективность SNSPD в 2012 г. для длины волны 1550 нм лимитировалась на уровне 36% [10], но позже были предложены конструкции сенсоров с системной эффективностью, превосходящей 90% [11–13]. В этих работах для повышения эффективности детекторов использовались многослойные покрытия с SiO<sub>2</sub> антиотражающим слоем.

Значительно меньше исследований по созданию эффективных SPD в видимой и УФ области. Мало детекторов, способных регистрировать одиночные фотоны с высокой эффективностью, низким уровнем шума и высоким временным разрешением в УФ области ( $\lambda < 400$  нм). Фотоумножители имеют субнаносекундное разрешение, но их эффективность меньше 50%. Недавно были разработаны SNSPD для регистрации фотонов с длиной волны 315 нм [14] и MoSi-детекторы, оптимизированные для 370 нм, с эффективностью детектирования больше 80%, темновым счетом меньше  $10^{-2}$  Гц и рабочей температурой выше 4 К [15].

Конкуренцию SNSPD могут составить термоэлектрические однофотонные детекторы (TSPD – thermoelectric single-photon detector), концепцию которых предложили армянские и американские ученые в 2000 году [16, 17]. Основными преимуществами TSPD по сравнению с другими типами детекторов являются простая конструкция и отсутствие жестких требований к рабочей температуре [18, 19]. Возможность создания чувствительного элемента TSPD с высокой эффективностью детектирования показана методом компьютерного моделирования. В однослойном и трехслойном чувствительном элементе TSPD используется поглотитель из LaB<sub>6</sub> [20, 21], а в конструкции четырехслойного чувствительного элемента LaB<sub>6</sub> используется в качестве антиотражающего покрытия [22].

Законы геометрической оптики обуславливают простейшие подходы к усилению поглощения электромагнитного излучения. При попадании излучения на слой с отличающимся показателем преломления часть излучения проходит в слой, а часть отражается и не может быть поглощена. Для увеличения доли поглощаемой энергии необходимо создать дополнительное рассеяние излучения

вблизи поверхности поглотителя [23]. Достигнуть увеличения поглощения излучения можно подбором материала поглотителя, увеличением шероховатости поверхности и изменением микроструктуры поглотителя [24, 25]. По развитости технологий на первое место можно поставить применение многослойных покрытий [26, 27]. Добиться полного поглощения можно используя метаматериалы и дифракционные решетки [28, 29]. При поглощении излучения с широким спектром важной характеристикой является интегральный коэффициент поглощения. Углеродные нанотрубки являются хорошим широкополосным поглотителем в видимом и инфракрасном диапазонах [30]. Сконструированная определенным образом система из углеродных нанотрубок способна поглотить более 95% солнечного излучения. Поглотители состоящие из наночастиц также перспективны. В [31] теоретически исследована многослойная структура, состоящая из вольфрамовых наночастиц и  $\text{SiO}_2$ . Согласно расчетам в таком поглотителе может поглотиться более 94% излучения в области между 400 и 2500 нм. В обзоре [32] обсуждается структура  $\text{LaB}_6$  и показывается, что уменьшение размера наночастиц меняет атомные вибрации на поверхности и, следовательно, плазмонные полосы поглощения.

В настоящей работе исследуются условия получения электронно-лучевым методом пленок  $\text{LaB}_6$ , а также приводятся результаты исследований их микроструктуры и оптических свойств. Определяется область электромагнитного спектра в которой эти пленки могут использоваться в качестве антиотражающих покрытий.

## 2. Эксперимент

Напыление пленок  $\text{LaB}_6$  проводилось на вакуумной установке ВУ-1А, оснащенной электронной пушкой с энергией электронов 6 кэВ. Начальный вакуум в камере был  $\sim 10^{-5}$  торр. Использовались керамические мишени с 99.99% содержанием основного вещества. Подложки помещались в держателе, расположенном на расстоянии 18 см от мишени и нагревались вольфрамовой печкой. Температура в процессе напыления фиксировалась с помощью платина–платинородиевой термодпары. Пленки напылялись на подложки из сапфира, фианита, кремния, нитрида алюминия и вольфрамовых пластин двух типов с площадью поверхности  $10 \times 10$  мм<sup>2</sup>. Шероховатость подложек (Ra) составляла  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 2–5 нм,  $\text{ZrO}_2$  – 3–6 нм, Si – 4–10 нм, AlN – 19–25 нм, W1 – 100–180 нм, W2 – 400–700 нм. Пленки  $\text{LaB}_6$  напылялись также на полученные ранее пленки вольфрама ( $\text{W}^*$ ) и гексаборида церия ( $\text{CeB}_6^*$ ) с шероховатостью меньше 20 нм.

Толщина пленок и шероховатость образцов измерялась с помощью профилометра Ambios Technology XP-1. Вертикальное разрешение профилометра при перепаде измеряемых высот до 10 мкм составит 0.1 нм. Толщина пленок

определялась по нескольким измерениям с последующим усреднением. Отклонение от среднего значения толщины пленок не превышало  $\pm 5\%$ . Микро-структура поверхности и элементный состав образцов исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) VEGA TS5130MM, оснащенного системой энергодисперсионного рентгеновского микроанализа INCA Energy 300. Максимальная чувствительность аналитической системы составляет 0.1 вес %. Оптические спектры отражения изучались с помощью спектрофотометра СФ-8 с приставкой зеркального отражения. Рентгенодифракционный анализ проводился с помощью дифрактометра ДРОН-2 с использованием излучения  $\text{CuK}\alpha$ .

### 3. Результаты и их обсуждение

В табл.1 приведены параметры процесса напыления пленок  $\text{LaB}_6$ : температура подложки в процессе напыления ( $T$ ), ток эмиссии ( $I_E$ ), ток катода ( $I_C$ ), длительность процесса ( $t$ ) и скорость напыления ( $V$ ).

Табл.1. Параметры напыления пленок  $\text{LaB}_6$

| Процесс напыления | $T$ , °C | $I_E$ , mA | $I_C$ , A | $t$ , мин | $V$ , нм/мин |
|-------------------|----------|------------|-----------|-----------|--------------|
| L1                | 1050     | 95–110     | 25        | 10        | 200          |
| L2                | 550–580  | 85         | 22        | 14        | 33.5         |
| L3                | 650–690  | 85         | 22        | 14        | 35.7         |
| L4                | 750–770  | 85         | 21.5      | 14        | 28.6         |

В держателе подложек располагались по 4 образца в 3 рядах. В результате каждого напыления получались 12 образцов, маркировка которых включает номер процесса напыления (L1–L4), номер образца в ряду держателя (a–d) и номер ряда (1–3). Таким образом, образец с маркировкой L1b3 был получен в результате первого процесса напыления на подложке расположенной второй в третьем ряду держателя.

Рассмотрим результаты профилометрии полученных образцов. На рис.1 представлен профиль поверхности пленки L3d2, напыленной на полученную ранее на подложке AlN пленку вольфрама. Можно видеть, что при длине сканирования 500 мкм и 100 мкм отличаются как характер профиля, так и величина шероховатости поверхности ( $R_a$ ). При большой длине сканирования проявляются (обусловленные особенностями поверхности подложки) неоднородности больших размеров, которые не оказывают существенного влияния на оптические характеристики пленок. Поэтому шероховатость поверхности всех пленок измерялась при стандартной длине сканирования 100 мкм.

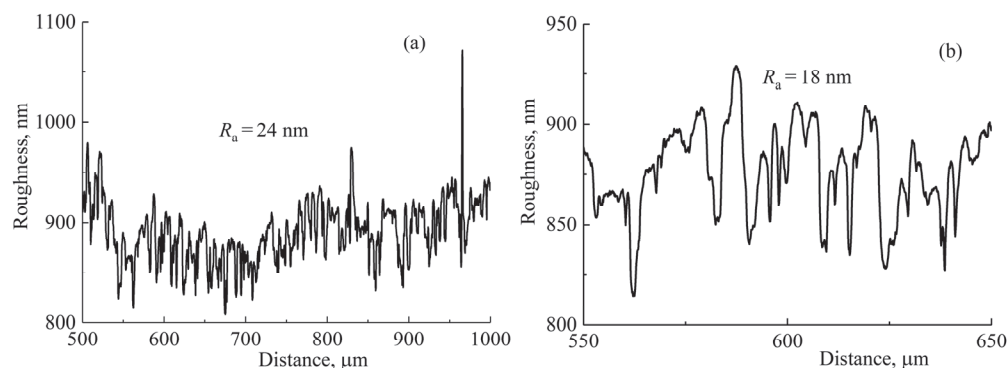


Рис.1. Шероховатость поверхности пленки L3d2 ( $\text{LaB}_6/\text{W}/\text{AlN}$ ) при длине сканирования: (a) – 500 мкм, (b) – 100 мкм.

В табл.2 представлены значения толщины ( $h$ ) и шероховатости поверхности полученных образцов. Общим выводом для всех четырех напылений является то, что толщина пленок, полученных в одном процессе напыления отличается несколько друг от друга, что является следствием угловой зависимости скорости массопереноса испаренного из мишени вещества. Эта особенность свойственна всем методам напыления фокусированным пучком с небольшой площади мишени. Образцы напыления L1 значительно толще, хотя

Табл.2. Толщина и шероховатость поверхности пленок  $\text{LaB}_6$

| Образец/<br>Подложка          | $h$ , нм | $R_a$ , нм | Образец/<br>Подложка          | $h$ , нм | $R_a$ , нм |
|-------------------------------|----------|------------|-------------------------------|----------|------------|
| L1a2/W1                       | 3698     | 49         | L2a1/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 477      | 3.6        |
| L1a3/ $\text{CeB}_6^*$        | 2741     | 14         | L2a2/W1                       | 390      | 106        |
| L1b1/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 2228     | 7.5        | L2b2/W2                       | 470      | 422        |
| L1c1/ $\text{AlN}$            | 2413     | 251        | L2c1/ $\text{AlN}$            | 469      | 23         |
| L1c2/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 2311     | 16.9       | L2d1/Si                       | 401      | 1.3        |
| L3a2/W1                       | 560      | 84.6       | L4a1/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 393      | 1.1        |
| L3b1/Si                       | 453      | 4.5        | L4a3/ $\text{CeB}_6^*$        | 399      | 3.2        |
| L3b2/W2                       | 460      | 235        | L4b2/Si                       | 370      | 1.2        |
| L3c1/ $\text{AlN}$            | 489.6    | 51         | L4c1/ $\text{AlN}$            | 414      | 14.3       |
| L3d2/W*                       | 439      | 18         | L4d1/ $\text{ZrO}_2$          | 422      | 1.2        |
| L3d3/ $\text{Al}_2\text{O}$   | 520      | 2.4        | L4d2/W*                       | 422      | 1.2        |

продолжительность этого процесса была меньше остальных. В процессе напыления L1 использованы высокие токи катода и эмиссии, что обусловило высокую скорость напыления. В трех остальных процессах напыления использовались более низкие токи катода и эмиссии. В результате получены более тонкие пленки при более низкой скорости напыления.

Шероховатость поверхности пленок  $\text{LaB}_6$  обуславливается в основном шероховатостью поверхности использованных подложек и изменяется в пределах от очень гладкой ( $R_a \sim 1.1\text{--}3.2$  нм) на подложках  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Si, до очень шершавой ( $R_a \sim 235\text{--}422$  нм) на подложках W2. Промежуточные значения шероховатости имеют пленки на подложках AlN и W1.

По данным рентгенофазового анализа пленки  $\text{LaB}_6$  имели кристаллическую структуру типа CsCl (пространственная группа  $\text{Pm}\bar{3}\text{m} - \text{O}_h^1$ ). На рентгенограммах пленок присутствовал только пик (100). Такая преимущественная ориентация пленок наблюдалась на всех использованных подложках. Мы имели подобный результат и при напылении ранее электронно-лучевым методом пленок  $\text{CeB}_6$  [33] и  $(\text{La,Ce})\text{B}_6$  [34]. Однако при лазерном напылении пленок  $\text{LaB}_6$  наблюдается несколько иная закономерность. Так по данным представленным в работе [35], пленки  $\text{LaB}_6$  на вольфрамовой фольге имели ориентацию с основными отражениями от плоскостей (110) и (311), а на фольге из рения – от плоскости (200).

Результаты измерения концентрации химических элементов, полученные с помощью микроаналитической системы INCA Energy 300 для многослойных структур, обрабатывались дополнительно программой StrataGem для пленочных образцов. Приведенные в табл. 3 концентрации бора, лантана и кислорода получены непосредственно на анализаторе без дополнительной обработки при энергии электронного зонда 10 кэВ. Посторонних примесей (кроме кислорода) в пленках обнаружено не было. В анализе некоторых образцов в незначительном количестве присутствуют элементы, входящие в состав подложек, т.к. электронный зонд достигал до подложек. Максимальная статистическая ошибка измерения концентрации элементов в атомных процентах составляла:  $\text{B} \pm 1.5$ ,  $\text{O} \pm 0.33$ ,  $\text{La} \pm 0.09$ ,  $\text{Al} \pm 0.07$ ,  $\text{Si} \pm 0.07$ ,  $\text{W} \pm 0.05$ , где Al, Si и W – элементы подложек.

Из данных табл. 3 следует, что во всех образцах присутствует кислород. Причем в образцах напылений L1 и L2 кислорода больше, чем в образцах последующих двух напылений. Среди трех образцов напыления L4 больше кислорода в анализе образца на сапфировой подложке. Возможно, часть обнаруженного в данном образце кислорода находятся не в пленке, а в подложке. Это предположение подтверждается присутствием в анализе образца небольшого количества алюминия.

Табл.3. Данные рентгеновского микроанализа образцов

| Пленка/<br>Подложка                   | Содержание элемента, ат % |       |       | B/La |
|---------------------------------------|---------------------------|-------|-------|------|
|                                       | B                         | La    | O     |      |
| L1b3 / Si                             | 65.35                     | 21.65 | 13    | 3.02 |
| L1b1 / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 67.86                     | 20.37 | 11.78 | 3.33 |
| L1c1 / AlN                            | 62                        | 19.15 | 18.85 | 3.24 |
| L2d1 / Si                             | 75.84                     | 15.29 | 8.87  | 4.96 |
| L2b1 / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 77.17                     | 12.82 | 8.06  | 6.02 |
| L2c1 / AlN                            | 77.53                     | 11.95 | 6.39  | 6.48 |
| L3b1 / Si                             | 81.55                     | 14.59 | 2.95  | 5.59 |
| L3d3 / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 80.58                     | 14.96 | 3.96  | 5.39 |
| L3c1 / AlN                            | 81.59                     | 15.01 | 2.63  | 5.44 |
| L4b2 / Si                             | 81.58                     | 12.44 | 1.04  | 6.56 |
| L4a1 / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 81.15                     | 13.58 | 4.17  | 5.98 |
| L4c1 / AlN                            | 81.34                     | 13.89 | 2.79  | 5.86 |

Соотношение количества атомов бора к количеству атомов лантана (B/La) образцов напыления L1 отличаются от стехиометрического для гексаборидов значения б довольно значительно. Для образцов трех остальных процессов параметр B/La довольно близок к стехиометрическому значению. Наиболее близкие к стехиометрическому значения параметр B/La 6.02 и 5.98 имеют образцы L2b1 и L4a1 на сапфировой подложке.

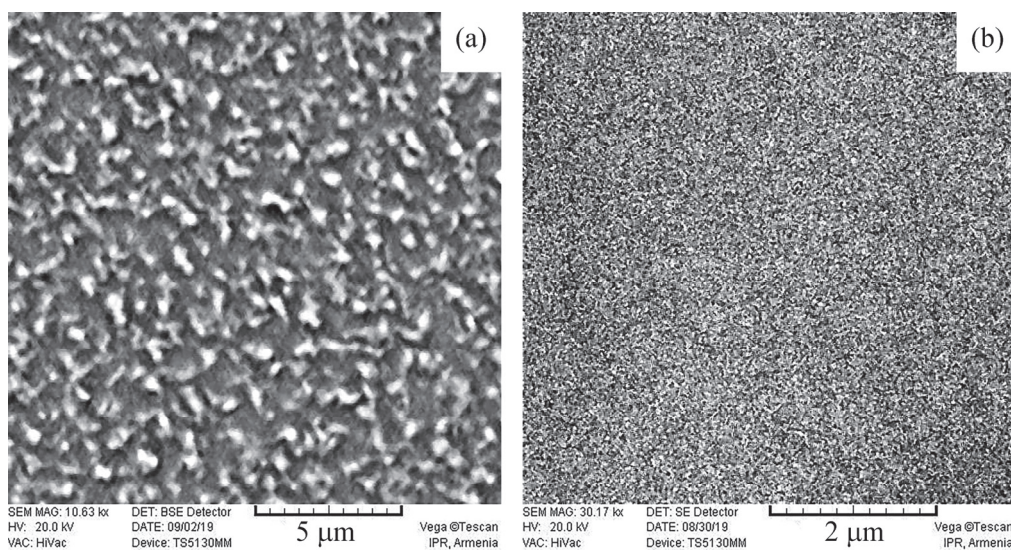


Рис.2. СЭМ изображения поверхности образцов на подложке Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:  
(a) L1c2, увеличение 10 000×; (b) L3d3, увеличение 30 000×.

Пленки, полученные напылением L2–L4, имеют гладкую поверхность с металлическим блеском на всех подложках кроме W2. По данным электронной микроскопии они обладают гранулярной структурой с размером гранул порядка 30 нм. Пленки, полученные напылением L1, имеют матовую поверхность со средним размером гранул около 200 нм. Размеры гранул и характер поверхности образцов обусловлены приведенными в табл. 1 параметрами напыления. На рис. 2 представлены СЭМ изображения поверхности образцов L1 и L3 демонстрирующие различие микроструктуры образцов полученных при больших и малых скоростях напыления. Микроструктура пленок напылений L2–L4 не отличается друг от друга. Это означает, что изменение температуры напыления в интервале 550–750°С не оказывает ощутимого влияния на размер гранул образцов. Таким образом, задача получения пленок LaB<sub>6</sub> с нанокристаллической микроструктурой решается при малых скоростях напыления электронно-лучевым методом.

Монокристаллы LaB<sub>6</sub> в ближней УФ области отражают меньше 40%, но, после минимума обусловленного плазменными колебаниями электронов проводимости, отражение резко возрастает и становится больше 50 % уже при 700 нм [36, 37]. Низкий коэффициент отражения порядка 5% в ближней ИК области имеют покрытия с наночастицами LaB<sub>6</sub> [38]. Для выявления в какой области длин волн полученные нами пленки могут быть использованы в качестве антиотражающих покрытий исследовались спектры отражения в интервале 370–2000 нм. На рис.3 представлены спектры отражения пяти образцов с различной шероховатостью поверхности, полученные напылением L2. Видно, что в исследованной области длин волн отражение образцов зависят от шероховатости их поверхности. Кривые 1 и 2 соответствуют отражению от образцов с малой шероховатостью 1–4 нм. Отражение более 50% наблюдается для длин волн больше 800 нм.

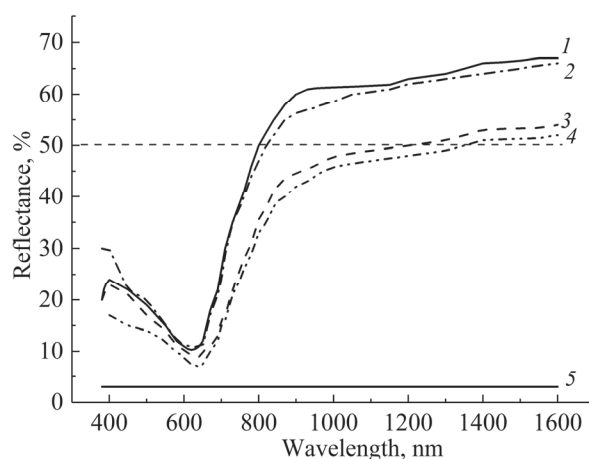


Рис.3. Спектры отражения образцов напыления L2 на подложках: 1 – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2 – Si, 3 – AlN, 4 – W1 и 5 – W2.



Спектры отражения 3 и 4 получены для образцов со средней шероховатостью 23 нм и 106 нм на подложках AlN и W1. Отражение более 50% наблюдается для длин волн больше соответственно 1200 нм и 1400 нм. Образец с шероховатостью более 400 нм на подложке W2 не демонстрирует зеркальное отражение (отражение на уровне фона). Скорее всего, для образцов с такой шероховатостью выполняется критерий Рэлея и имеет место диффузное отражение во всей исследованной области длин волн.

Можно утверждать, что такие покрытия могут быть использованы в устройствах где излучение не должно поглощаться и не должно отражаться зеркально. Однако такие покрытия не могут использоваться в детекторах. Эффективными могут быть детекторы с нанокристаллическим антиотражающим слоем LaB<sub>6</sub> с шероховатостью не превышающей 100 нм для фотонов с длиной волны < 800 нм, т.е. электромагнитного излучения с длиной волны короче красного света.

#### 4. Заключение

Показано, что получение нанокристаллических пленок LaB<sub>6</sub> стехиометрического состава электронно-лучевым методом возможно при малых скоростях напыления. По данным электронной микроскопии пленки LaB<sub>6</sub> имеют гранулярную структуру с размером гранул около 30 нм при скорости напыления 28–36 нм/мин. Шероховатость поверхности полученных образцов определяется в основном шероховатостью использованных подложек.

На основе исследования оптических характеристик образцов сделаны следующие выводы. Нанокристаллические пленки LaB<sub>6</sub> отражают менее 50% на длинах волн меньше 800 нм, следовательно, могут использоваться как антиотражающие покрытия для регистрации УФ и рентгеновских фотонов.

Авторы выражают благодарность А.М. Гуляну за интерес к работе и полезные обсуждения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного комитета по науке МОН РА в рамках научного проекта № 18Т-2F134.

**КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:** Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. J.-C. Besse, S. Gasparinetti, M.C. Collodo, T. Walter, P. Kurpiers, M. Pechal, C. Eichler, A. Wallraff. *Phys. Rev. X*, **8**, 021003 (2018).
2. D. Bouwmeester. *Nature*, **429**, 139 (2004).
3. N. Gisin, G. G. Ribordy, W. Titel, H. Zbinden. *Rev. Mod. Phys.*, **74**, 145 (2002).
4. P.A. Hiskett, D. Rosenberg, C.G. Peterson, R.J. Hughes, S. Nam, A.E. Lita, A.J. Miller,

- J. E. Nordholt. *New J. Phys.*, **8**, 193 (2006).
5. E. Knill, R. Laflamme, G. J. Milburn. *Nature*, **409**, 46 (2001).
6. H. Zhang, L. Xiao, B. Luo, J. Guo, L. Zhang, J. Xie. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **53**, 013001 (2020).
7. R.H. Hadfield. *Nature Photonics*, **3**, 696 (2009).
8. T. Yamashita, S. Miki, H. Terai. *IEICE Trans. on Electronics*, **E100-C**, 274 (2017).
9. D. Rosenberg, A.E. Lita, A.J. Miller, S. Nam, R.E. Schwall. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **15**, 575 (2005).
10. R.E. Correa, E.A. Dauler, G. Nair, S.H. Pan, D. Rosenberg, A.J. Kerman, R.J. Molnar, X. Hu, F. Marsili, V. Anant, K.K. Berggren, M.G. Bawendi. *Nano Lett.*, **12**, 2953 (2012).
11. W.J. Zhang, L.X. You, H. Li, J. Huang, C.L. Lv, L. Zhang, X.Y. Liu, J.J. Wu, Z. Wang, X.M. Xie. *Sci. China-Phys. Mech. Astron.*, **60**, 120314 (2017).
12. I.E. Zadeh, J.W.N. Los, R.B.M. Gourgues, G. Bulgarini, S.M. Dobrovolskiy, V. Zwiller, S.N. Dorenbosz. *ArXiv:1801.06574v1* (2018).
13. M. Caloz, M. Perrenoud, C. Autebert, B. Korzh, M. Weiss, C. Schönenberger, R.J. Warburton, H. Zbinden, F. Bussi eres. *Appl. Phys. Lett.*, **112**, 061103 (2018).
14. D.H. Slichter, V.B. Verma, D. Leibfried, R.P. Mirin, S.W. Nam, D.J. Wineland. *Opt. Express*, **25**, 8705 (2017).
15. E.E. Wollman, V.B. Verma, A.D. Beyer, R.M. Briggs, B. Korzh, J.P. Allmaras, F. Marsili, A.E. Lita, R.P. Mirin, S.W. Nam, M.D. Shaw. *Opt. Express*, **25**(22), 26792 (2017).
16. G.G. Fritz, K.S. Wood, D. Van Vechten, A.L. Gyulamiryan, A.S. Kuzanyan, N.J. Giordano, T.M. Jacobs, H.-D. Wu, J.S. Horwits, A.M. Gulian. *Proc. SPIE, San Diego, CA*, **4140**, 459 (2000).
17. D. Van Vechten, K. Wood, G. Fritz, J. Horwitz, A. Gyulamiryan, A. Kuzanyan, V. Vartanyan, A. Gulian. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., A*, **444**, 42 (2000).
18. K. Wood, D. Van Vechten, G. Fritz, H.-D. Wu, S. Bounak, K. Bussman, K. Winzer, S. Kunii, V. Gurin, C. Mitterer, M. Carlsson, F. Golf, A. Kuzanyan, G. Badalyantz, S. Harutyunyan, S. Petrosyan, V. Vardanyan, T. Paronyan, V. Nikoghosyan, A. Gulian. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, **520**, 56 (2004).
19. V.A. Petrosyan. *J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.)*, **46**, 125 (2011).
20. A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan. *J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.)*, **53**, 242 (2018).
21. A.S. Kuzanyan, A.A. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan. *J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.)*, **53**, 338 (2018).
22. A.A. Kuzanyan, A.S. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan. *J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.)*, **54**, 175 (2019).
23. P. Kowalczewski, M. Liscidini, L. Andreani. *Opt. Lett.*, **37**, 4868 (2012).
24. Y. Hung, S. Hsu, Y. Wang, C. Chang, L. Chen, L. Su, J. Huang. *Nanotechnology*, **22**, 485202 (2011).
25. M. Burresti, F. Pratesi, F. Riboli, D.S. Wiersma. *Adv. Opt. Mat.*, **3**, 722 (2015).
26. M. Kats, R. Blanchard, P. Genevet, F. Capasso. *Nature Materials*, **12**, 20 (2013).
27. H-L. Huang, H. Xia, Z-B. Guo, D. Xie, H-J. Li. *Chin. Phys. Lett.*, **34**, 117801 (2017).
28. N. Landy, S. Sajuyigbe, J. Mock, D. Smith, W. Padilla. *Phys. rev. lett.*, **100**, 207402

- (2008).
29. **E. Popov, D. Maystre, R.C. McPhedran.** Opt. Express, **16**, 609 (2008).
  30. **Z.-P. Yang, L. Ci, J. Bur, S. Lin, P. Ajayan.** Nano Lett., **8**, 446 (2008).
  31. **C. Liu, D. Zhang, Y. Liu, D. Wu, L. Chen, R. Ma, Z. Yu, L. Yu, H. Ye.** Nanoscale Res. Lett., **12**, 601 (2017).
  32. **T.M. Mattox, J.J. Urban.** Materials, **11**, 2473 (2018).
  33. **S.I. Petrosyan, A.A. Kuzanyan, G.R. Badalyan, A.S. Kuzanyan.** J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **53**, 157 (2018).
  34. **A.S. Kuzanyan, S.R. Harutyunyan, V.O. Vardanyan, G.R. Badalyan, V.A. Petrpsyan, V.S. Kuzanyan, S.I. Petrosyan, V.E. Karapetyan, K.S. Wood, H.-D. Wu, A.M. Gulian.** J Solid State Chem., **179**, 2862 (2006).
  35. **D.J. Late, M.A. More, P. Misra, B.N. Singh, L.M. Kukreja, D.S. Joag.** Ultramicroscopy, **107**, 825 (2007).
  36. **V.N. Gurin, M.M. Korsukova, M.G. Karin, K.K. Sidorin, I.A. Smirnov, A.I. Shelykh.** Sov. Phys. Solid State **22**(3), 418 (1980).
  37. **K. Adachi, M. Miratsu.** J. Mater. Res., **25**(3), 510 (2010).
  38. **H. Takeda, H. Kuno, K. Adachi.** J. Am. Ceram. Soc., **91**, 2897 (2008).

#### ELECTRON BEAM DEPOSITION OF LANTANE HEXABORIDE FILMS FOR USAGE AS ANTI-REFLECTIVE COATING

A.A. KUZANYAN, A.S. KUZANYAN, S.I. PETROSYAN,  
V.S. KUZANYAN, G.R. BADALYAN

The development of effective anti-reflective coatings of electromagnetic radiation is a necessary basis for solving a wide range of fundamental and applied problems. We studied the conditions for the preparation of lanthanum hexaboride (LaB<sub>6</sub>) films by electron beam deposition on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlN, ZrO<sub>2</sub>, Si, W substrates, and CeB<sub>6</sub> and W coatings. The phase and elemental composition, microstructure and optical characteristics of samples obtained under various deposition conditions were studied. The relationship between the reflection spectra and surface roughness of the samples was investigated. The region of the electromagnetic spectrum in which the obtained films can be used as anti-reflection coatings is determined. The relationship between the reflection spectra and surface roughness of the samples deposited on various substrates under various conditions was studied. The region of the electromagnetic spectrum in which the obtained films can be used as antireflection coatings is revealed.