

УДК 535.5, 535.016

DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-1-91-100

Модификация оптических свойств поверхностей методом напыления под скользящими углами

И. А. Азаров^{1,2}, К. Э. Купер³, А. Г. Лемзяков^{1,3}
В. В. Поросев³, А. А. Шкляев^{1,2}

¹ Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

² Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
Новосибирск, Россия

³ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

Аннотация

Рассматриваются оптические свойства и структура тонких пленок диоксида титана, сформированных методом напыления под скользящими углами. Было показано, что данный метод позволяет формировать покрытия, имеющие существенно меньший показатель преломления, чем у первоначального материала. Так, экспериментально полученное значение показателя преломления тонких пленок диоксида титана составило ~ 1,2, что почти в два раза меньше, чем у поликристаллического материала. Это позволяет использовать данный метод для нанесения покрытий с переменным показателем преломления с использованием всего одного материала, изменяя только геометрию процесса напыления.

Ключевые слова

напыление под скользящими углами, диоксид титана, оптические параметры, эллипсометрия

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Новосибирской области в рамках научного проекта № 19-42-540009 р_а. В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН, поддержанное проектом RFMEFI62119X0022. Получение СЭМ изображений и эллипсометрические исследования проводились с использованием оборудования ЦКП «ВТАН» НГУ

Для цитирования

Азаров И. А., Купер К. Э., Лемзяков А. Г., Поросев В. В., Шкляев А. А. Модификация оптических свойств поверхностей методом напыления под скользящими углами // Сибирский физический журнал. 2021. Т. 16, № 1. С. 91–100. DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-1-91-100

The Modification of Optical Properties of the Surfaces by the Glancing Angle Deposition Technique

I. A. Azarov^{1,2}, K. E. Kuper³, A. G. Lemzyakov^{1,3}
V. V. Porosev³, A. A. Shklyayev^{1,2}

¹ Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

² Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

³ Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

The paper considers the optical properties and structure of thin films of titanium dioxide formed by the glancing angle deposition method. It was show that this method allows the formation of coatings having a significantly lower refrac-

tive index than that of the initial material. Thus, the experimentally obtained value of the refractive index of thin films of titanium dioxide was ~ 1.2 , which is almost two times less than that of a polycrystalline material. This allows you to use this method to produce the coatings with a variable refractive index using only one material, changing the geometry of the deposition process only.

Keywords

glancing angle deposition, titanium dioxide, optical properties, ellipsometry

Acknowledgements

The reported study was funded by RFBR and Novosibirsk region according to the research project 19-42-540009 r_a. The work was done at the shared research center SSTRC on the basis of the VEPP-4 – VEPP-2000 Complex at BINP SB RAS, using equipment supported by project RFMEFI62119X0022. The SEM and ellipsometry studies were performed on the equipment of CKP “VTAN” in the ATRC department of NSU

For citation

Azarov I. A., Kuper K. E., Lemzyakov A. G., Porosev V. V., Shklyayev A. A. The Modification of Optical Properties of the Surfaces by the Glancing Angle Deposition Technique. *Siberian Journal of Physics*, 2021, vol. 16, no. 1, p. 91–100. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-1-91-100

Введение

Модификация оптических свойств поверхностей широко применяется в оптических приборах, где свет проходит через границу раздела двух прозрачных сред с разными показателями преломления и требуется снизить потери интенсивности или устранить отражение. «Тяжелые» кристаллические сцинтилляторы широко применяются для детектирования различных видов излучений. Энергетическое и временное разрешение сцинтилляционных детекторов во многом определяется статистикой зарегистрированных оптических фотонов. Именно поэтому непрерывно ведутся работы по повышению световых выходов материалов и улучшению динамики этого процесса. Существенным фактором, который ограничивает как временное, так и энергетическое разрешение, является низкая вероятность выхода света из кристалла из-за большой разницы в показателе преломления между сцинтиллятором и окружающими его материалами. Одним из способов решения данной проблемы является модификация свойств оптического перехода между сцинтилляционным кристаллом и окружающими его светоотражающими материалами путем формирования неоднородностей микронного масштаба [1; 2]. Другим способом повышения световых выходов является формирование многослойных просветляющих покрытий с градиентным показателем преломления на основе SiO_2 и TiO_2 [3]. В то же время для решения аналогичной задачи были разработаны методики формирования наноструктурированных покрытий, позволяющих повысить световых выходов светодиодов на 24–28 % [4], а в сочетании с формированием структур микронного масштаба на величину до 60 % [5]. Этот же подход может быть применен и для сцинтилляторов. Целью данной работы являлось исследование метода напыления под скользящими углами (glancing angle deposition, GLAD), позволяющего получить покрытия с заданным показателем преломления с использованием только одного материала.

Описание метода

Эффект формирования пористых колоннообразных структур методом напыления под большими углами известен достаточно давно [6]. Основная идея метода заключается в том, что при напылении перпендикулярно поверхности подложки напыляемый материал формирует отдельные кластеры, которые далее, сливаясь, формируют сплошное покрытие. При наклонном же расположении поверхности, первоначальные кластеры затеяют собой часть поверхности, и нарастание толщины материала происходит в основном за счет роста высоты первоначальных кластеров. Если же к этому процессу еще добавить вращение подложки, то можно добиться формирования сложных колоннообразных структур. Достоинством данного метода является возможность получения различных значений показателя преломления с использованием только одного напыляемого материала. Основными требованиями к процессу являются низкое остаточное давление, что позволяет реализовать прямолинейное распро-

странение частиц напыляемого материала, малый угловой размер источника и низкая температура подложки, менее $0,3 \cdot T_{\text{плавления}}$, для подавления диффузии материала по поверхности [7]. Общая схема метода и фотография изготовленного для работы стенда показаны на рис. 1.

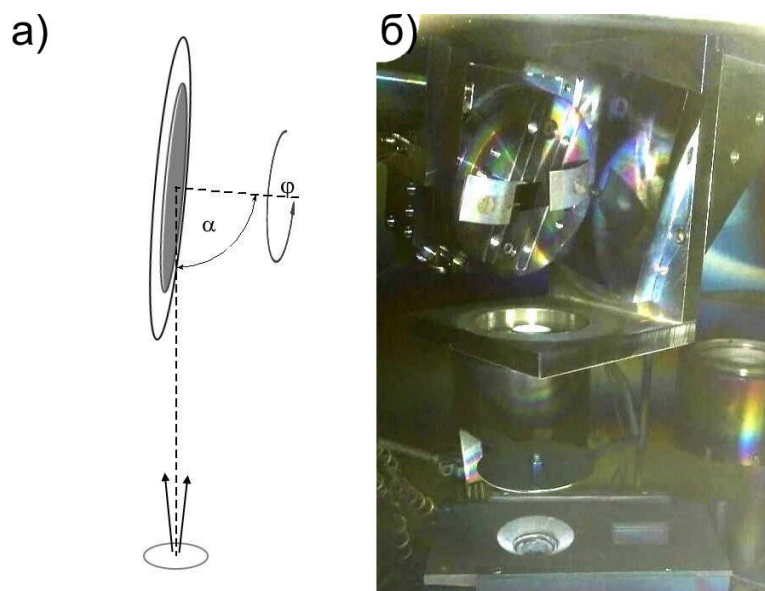


Рис. 1. Общая схема установки (а) и фотография стенда (б)
 Fig. 1. General view of the setup (left) and a photograph of the stand (right)

В данной работе в качестве напыляемого материала был выбран диоксид титана благодаря его большому значению показателя преломления, химической устойчивости и высокой прозрачности в видимой области спектра [8], а также широкому его применению при создании многослойных зеркал в сочетании SiO_2 [9]. В то же время имеющиеся в литературе данные о параметрах получаемых покрытий имеют достаточно большой разброс, отражая существенное влияние технологических параметров экспериментальных установок на результат [10].

Напыление пленок TiO_2 проводилось на подложке из монокристаллического кремния в установке вакуумного напыления ВОО Edwards AUTO 500 посредством электронно-лучевого испарения таблеток TiO_2 . Между образцом и тиглем была дополнительно установлена диафрагма с апертурой 20 мм на расстоянии 74 мм от центра вращения образца. Предварительный вакуум составлял $5\text{E}-6$ мбар. Напыление происходило в атмосфере кислорода при давлении $2\text{E}-4$ мбар. В процессе напыления контролировалась температура держателя образца, которая была в пределах ~ 130 °С. Образец вращался по оси φ со скоростью 1,7 оборота в минуту. Угол наклона α в процессе напыления фиксировался. Скорость испарения оксида титана из тигля контролировалась кварцевыми микровесами ВОО Edwards FTM7 Film Thickness Monitor по изменению частоты колебаний кварцевого резонатора в зависимости от массы вещества, нанесенного на его поверхность. Показания кварцевых весов и результирующая толщина напыленной пленки связаны коэффициентами пересчета, которые зависят от режима напыления и от взаимного расположения элементов установки напыления в целом, а также от угла наклона держателя образцов. Толщины получаемых покрытий измерялись посредством эллипсометрии и на сканирующем электронном микроскопе по изображению скола образца. Скорость напыления при $\alpha = 0$ была в диапазоне 0,2–0,4 нм/с.

Структура покрытий

Для получения изображений поверхности образцов был использован сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) «PIONEER» фирмы Raith. Морфология формируемых пленок, при углах падения 0 , 75 и 85° представлена на рис. 2.

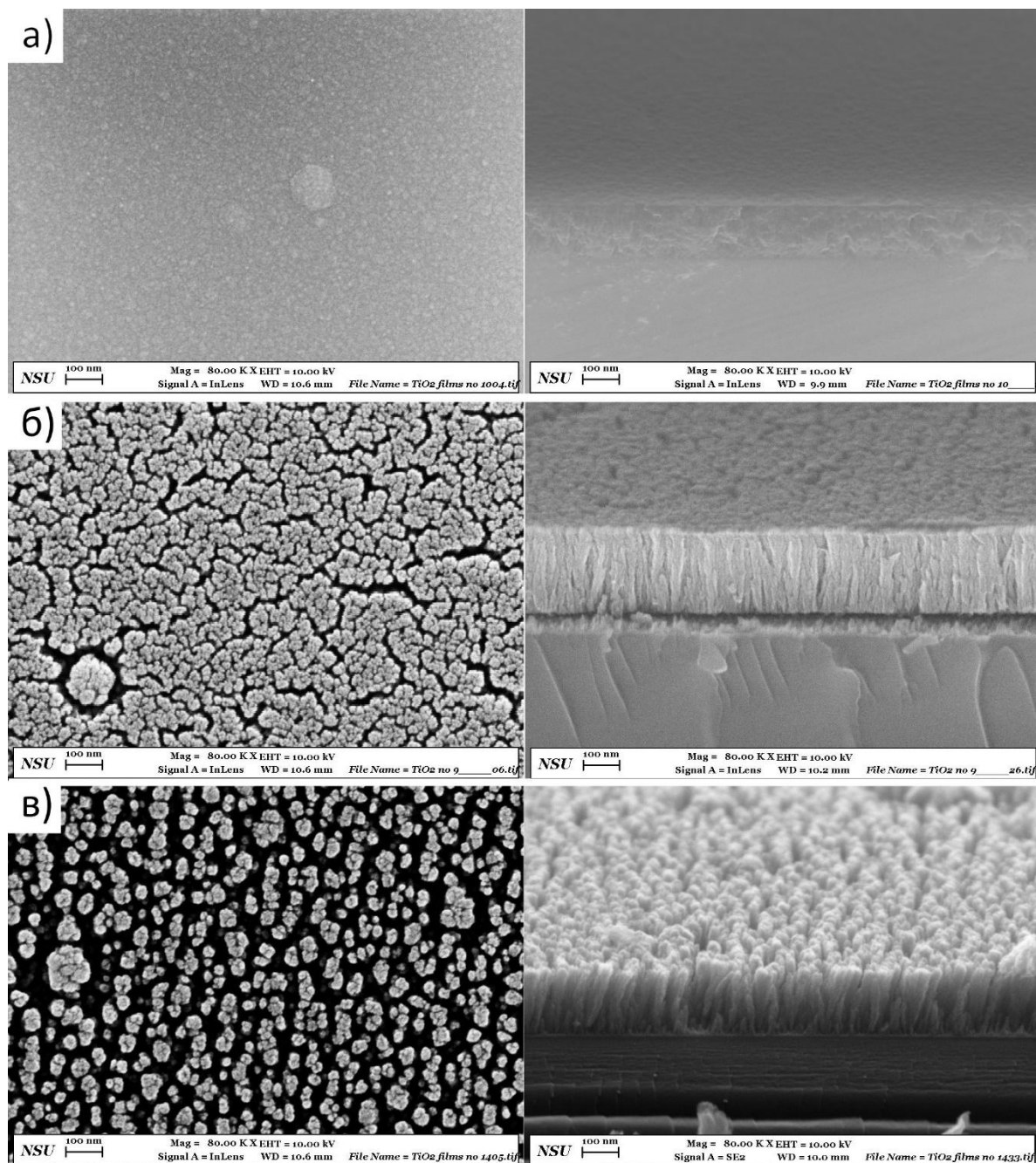


Рис. 2. Изображения (виды сверху и сбоку), снятые с помощью сканирующего электронного микроскопа, образцов с покрытиями, полученными напылением TiO_2 под углами 0° (а), 75° (б) и 85° (в)

Fig. 2. Images (top and side views) taken with the scanning electron microscope of samples with coatings obtained by the TiO_2 deposition at angles of 0° (a), 75° (b) and 85° (c)

Видно, что покрытия имеют существенно различную структуру. Так, при угле падения 75° покрытие формируется из плотно упакованных колонн с сеткой микроразрывов шириной 15–20 нм, а при угле падения 85° оно уже состоит из отдельно стоящих колонн диаметром 20–40 нм.

Оптические свойства покрытий

Оптические константы полученных пленок TiO_2 были исследованы методом спектральной эллипсометрии в диапазоне длин волн 250–1000 нм. Измерения проводились на эллипсометрах разработки ИФП СО РАН [11]. Восстановление оптических констант и толщин пленок включало несколько этапов. Сначала методом эллипсометрии пространственного разрешения проводилось профилирование образца вдоль одной линии. Поскольку на всех образцах наблюдается градиент толщины, то по траектории эллипсометрических углов на номограмме (которая соответствует измерениям с разной толщиной) восстанавливались оптические константы слоя TiO_2 для данного образца на длине волны He-Ne лазера (632,8 нм), и далее определялся профиль толщины пленки вдоль образца. Полученные толщины и оптические константы использовались как начальные данные при восстановлении спектральных диэлектрических функций (дисперсионных кривых) в диапазоне 250–1000 нм. При восстановлении диэлектрических функций использовался метод независимого решения обратной задачи эллипсометрии для каждой длины волны при многоугловых спектральных измерениях (VASE – variable angle spectroscopic ellipsometry) [12]. Пленка считалась однородной по глубине, поэтому восстановленные диэлектрические функции и толщина являются эффективными в случаях неоднородной структуры слоя. Характерные спектры диэлектрических функций нескольких образцов показаны на рис. 3 вместе с литературными данными для дисперсии поликристаллического анатаза [13].

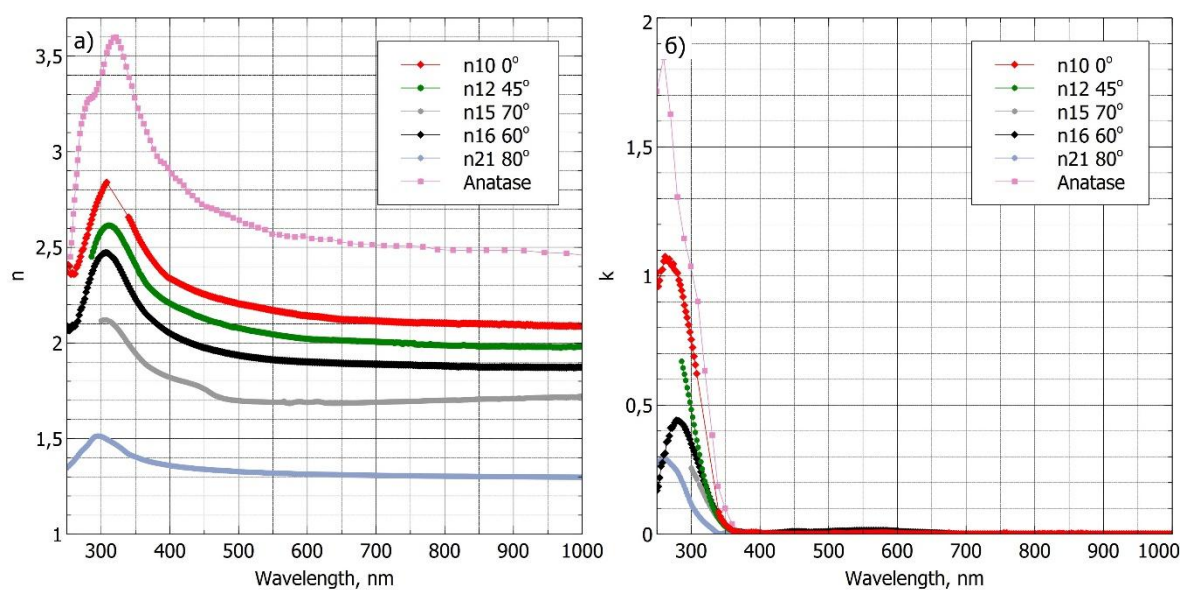


Рис. 3. Зависимость показателя преломления (а) и коэффициентов поглощения (б) от длины волны для нескольких образцов, изготовленных при различных углах наклона подложки

Fig. 3. Plots of refractive indices (a) and extinction coefficients (b) with wavelength for few samples produced at different deposition angles

У образцов наблюдается нормальный ход дисперсионных кривых в видимой области спектра. Ширина запрещенной зоны для различных форм TiO_2 находится в пределах 3–3,5 эВ, что соответствует спектральному положению края поглощения 350–410 нм и согласуется с наблюдаемыми экспериментальными зависимостями. Как и ожидалось, изменение плотности покрытия является основным фактором, влияющим на величину ее показателя преломления [14]. На рис. 4, а показаны результаты измерения зависимости показателя преломления от угла напыления для длины волны 633 нм. Наблюдаемое расхождение в показателе преломления между многоугловой спектральной и лазерной сканирующей эллипсометрией объясняется, по всей видимости, некорректностью описания наносимого покрытия простой моделью однородного слоя, что особенно сильно проявляется для более пористых покрытий. Поэтому для угла напыления 85° использовались данные только для сканирующей эллипсометрии. Сплошными линиями на рисунке представлены результаты подгонки данных моделью, учитывающей колоннообразную структуру нанесенного материала [15]:

$$n_f^2 = \frac{(1-p)n_0^4 + (1+p)n_0^2 n_1^2}{(1+p)n_0^2 + (1-p)n_1^2},$$

а также линейной моделью [16]:

$$n_f = (1-p)n_0 + pn_1,$$

где n_f, n_0, n_1 – показатели преломления получаемого покрытия, материала пор (воздух) и наносимого материала соответственно. Фактор заполнения p – это отношение объема нанесенного материала к общему объему формируемого покрытия. Для определения его величины в процессе подгонки использовалось выражение, связывающее его величину со значением пористости материала – P , согласно модели формирования затенений нанокластерами [16]:

$$P = 1 - p = \frac{\alpha \cdot \tan \alpha}{c + \alpha \cdot \tan \alpha}.$$

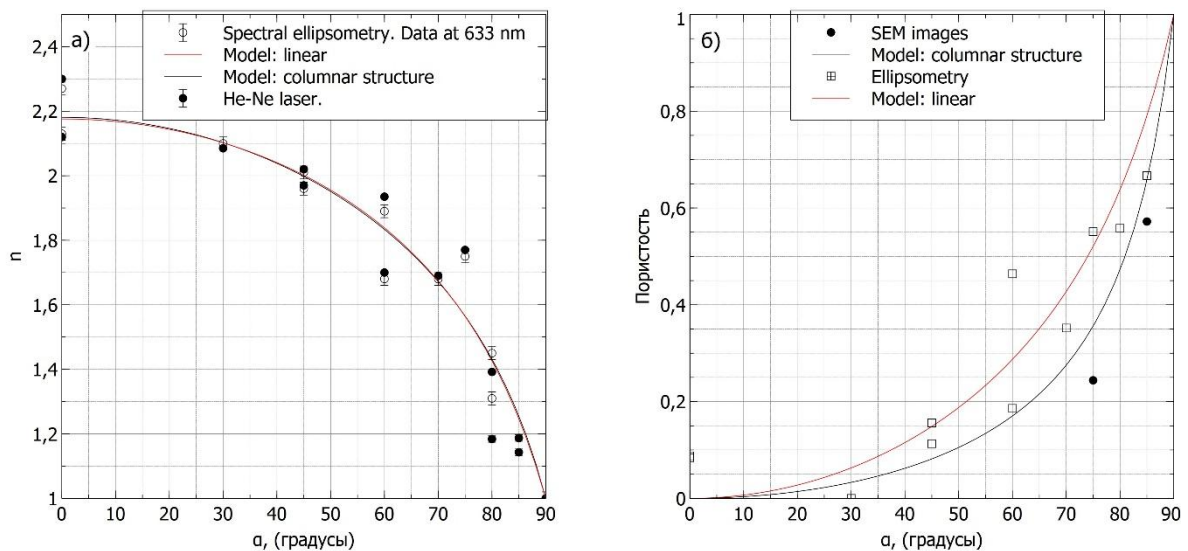


Рис. 4. Значение показателя преломления (а) и расчетное значение пористости покрытия (б) в зависимости от угла напыления

Fig. 4. Refractive indices (a) and calculated film porosity (b) as a function of the deposition angle

Подгонка экспериментальных данных двумя моделями дает близкий результат, при котором величина показателя преломления пленки диоксида титана при угле нанесения 0° составляет $2,17 \pm 0,01$. Однако значение параметра c , описывающего геометрию нанокластера, равно $8,84 \pm 0,33$ при подгонке данных моделью, учитывающей колоннообразную структуру нанесенного материала, и значение параметра c равно $4,50 \pm 0,18$ при подгонке данных линейной моделью. На рис. 4, б сплошными линиями показаны значения пористости покрытия, рассчитанные с использованием полученных значений параметра c , а также представлена оценка пористости, полученная путем бинаризации изображений с электронного микроскопа. На этом же рисунке показаны результаты вычисления величины объемного заполнения пленок на основе данных эллипсометрии. Данные анализа изображений дают несколько меньшее значение, поскольку, по всей видимости, не учитывают сложную внутреннюю структуру формирующихся колонн. Наблюдаемый же разброс экспериментальных данных, полученных с помощью эллипсометрии, свидетельствует о необходимости контроля большего количества параметров установки для формирования более однородных по толщине слоев.

Заключение

В данной работе были представлены результаты анализа оптических покрытий, изготовленных методом напыления под скользящими углами.

Полученные в эксперименте значения показателя преломления покрытий TiO_2 меняются в диапазоне от $2,17 \pm 0,01$ при формировании максимально плотного покрытия (при угле напыления 0°) до $1,15 \pm 0,02$ при скользящем угле 85° для длины волны 633 нм. Это хорошо согласуется с результатами других работ, также использующих электронно-лучевое испарение наносимого материала [18]. Это позволяет использовать данный метод для формирования поверхностных структур с переменным показателем преломления путем изменения только геометрии процесса напыления всего одного наносимого материала.

Список литературы

1. **Berg E., Roncali E.** Optimizing light transport in scintillation crystals for time-of-flight PET: an experimental and optical Monte Carlo simulation study. *Biomed Opt Express*, 2015, vol. 6, no. 6, p. 2220–2230.
2. **Huber J. S., Moses W. W., Andreaco M. S., Loope M., Melcher C. L., Nutt R.** Geometry and surface treatment dependence of the light collection from LSO crystals. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 1999, vol. 437, no. 2–3, p. 374–380.
3. **Fei Tong, Bo Liu, Hong Chen, Zhichao Zhu, Mu Gu.** Enhanced light extraction of $\text{Bi}_3\text{Ge}_4\text{O}_{12}$ scintillator by graded-refractive-index antireflection coatings. *Applied Physics Letters*, 2013, vol. 103, no. 7, p. 071907.
4. **Kim J. K., Chhajed S., Schubert M. F., Schubert E. F., Fischer A. J., Crawford M. H., Cho J., Kim H., Sone C.** Light-Extraction Enhancement of GaInN Light-Emitting Diodes by Graded-Refractive-Index Indium Tin Oxide Anti-Reflection Contact. *Advanced materials*, 2008, vol. 20, no. 4, p. 801–804.
5. **Peng Mao, Mingsheng Xu, Jing Chen, Bo Xie, Fengqi Song, Min Han, Guanghou Wang.** Dual enhancement of light extraction efficiency of flip-chip light-emitting diodes with multiple beveled SiC surface and porous ZnO nanoparticle layer coating. *Nanotechnology*, 2015, vol. 26, no. 18. DOI 10.1088/0957-4484/26/18/185201
6. **Goodman L. A., McGinn J. T., Anderson C. H., DiGeronimo F.** Topography of obliquely evaporated silicon oxide films and its effect on liquid-crystal orientation. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1977, vol. 24, no. 7, p. 795–804.
7. **Hawkeye M. M., Brett M. J.** Glancing angle deposition: Fabrication, properties, and applications of micro- and nanostructured thin films. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2007, vol. 25, no. 5, p. 1317.

8. **Котликов Е. Н., Кузнецов Ю. А., Лавровская Н. П., Тропин А. Н.** Оптические пленкообразующие материалы для инфракрасной области спектра // Научное приборостроение. 2008. Т. 18, № 3. С. 32–37.
9. **Amotchkina T., Trubetskov M., Tikhonravov A., Angelov I. B., Pervak V.** Reliable optical characterization of e-beam evaporated TiO₂ films deposited at different substrate temperatures. *Applied Optics*, 2014, vol. 53, no. 4, p. A8–A15.
10. **Bennett J. M., Pelletier E., Albrand G., Borgogno J. P., Lazarides B., Carniglia C. K., Schmell R. A., Allen T. H., Tuttle-Hart T., Guenther K. H., Saxer A.** Comparison of the properties of titanium dioxide films prepared by various techniques. *Applied Optics*, 1989, vol. 28, no. 16, p. 3303–3317.
11. **Спесивцев Е. В., Рыхлицкий С. В., Швец В. А.** Развитие методов и средств оптической эллипсометрии в институте физики полупроводников СО РАН // Автометрия. 2011. Т. 47, № 5. С. 5–12.
12. **Fujiwara H.** Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications. Chichester, England, John Wiley & Sons, 2007.
13. **Tanemura S., Miao L., Jin P., Kaneko K., Terai A., Nabatova-Gabain N.** Optical properties of polycrystalline and epitaxial anatase and rutile TiO₂ thin films by rf magnetron sputtering. *Applied Surface Science*, 2003, vol. 212–213, p. 654–660.
14. **Macleod H. A.** Structure related optical properties of thin films. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1986, vol. 4, no. 3, p. 418–422.
15. **Harris M., Macleod H. A., Ogura S., Pelletier E., Vidal B.** The relationship between optical inhomogeneity and film structure. *Thin Solid Films*, 1979, vol. 57, no. 1, p. 173–178.
16. **Kinosita K., Nishibori M.** Porosity of MgF₂ Films-Evaluation Based on Changes in Refractive Index Due to Adsorption of Vapors. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 1969, vol. 6, p. 730–733.
17. **Poxson D. J., Mont F. W., Schubert M. F., Kim J. K., Schubert E. F.** Quantification of porosity and deposition rate of nanoporous films grown by oblique-angle deposition. *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 93, p. 101914.
18. **Hawkeye M. M., Brett M.** Controlling the optical properties of nanostructured TiO₂ thin films. *Physica Status Solidi A*, 2009, vol. 206, no. 5, p. 940–943.

References

1. **Berg E., Roncali E.** Optimizing light transport in scintillation crystals for time-of-flight PET: an experimental and optical Monte Carlo simulation study. *Biomed Opt Express*, 2015, vol. 6, no. 6, p. 2220–2230.
2. **Huber J. S., Moses W. W., Andreaco M. S., Loope M., Melcher C. L., Nutt R.** Geometry and surface treatment dependence of the light collection from LSO crystals. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 1999, vol. 437, no. 2–3, p. 374–380.
3. **Fei Tong, Bo Liu, Hong Chen, Zhichao Zhu, Mu Gu.** Enhanced light extraction of Bi₃Ge₄O₁₂ scintillator by graded-refractive-index antireflection coatings. *Applied Physics Letters*, 2013, vol. 103, no. 7, p. 071907.
4. **Kim J. K., Chhajed S., Schubert M. F., Schubert E. F., Fischer A. J., Crawford M. H., Cho J., Kim H., Sone C.** Light-Extraction Enhancement of GaInN Light-Emitting Diodes by Graded-Refractive-Index Indium Tin Oxide Anti-Reflection Contact. *Advanced materials*, 2008, vol. 20, no. 4, p. 801–804.
5. **Peng Mao, Mingsheng Xu, Jing Chen, Bo Xie, Fengqi Song, Min Han, Guanghou Wang.** Dual enhancement of light extraction efficiency of flip-chip light-emitting diodes with multiple beveled SiC surface and porous ZnO nanoparticle layer coating. *Nanotechnology*, 2015, vol. 26, no. 18. DOI 10.1088/0957-4484/26/18/185201

6. **Goodman L. A., McGinn J. T., Anderson C. H., DiGeronimo F.** Topography of obliquely evaporated silicon oxide films and its effect on liquid-crystal orientation. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1977, vol. 24, no. 7, p. 795–804.
7. **Hawkeye M. M., Brett M. J.** Glancing angle deposition: Fabrication, properties, and applications of micro- and nanostructured thin films. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2007, vol. 25, no. 5, p. 1317.
8. **Kotlikov E. N., Kuznetsov Yu. A., Lavrovskaya N. P., Tropin A. N.** The optical film-forming materials for infra-red area of the spectrum. *Nauchnoe Priborostroenie [Scientific Instrumentation]*, 2008, vol. 18, no. 3, p. 32–37. (in Russ.)
9. **Amotchkina T., Trubetskov M., Tikhonravov A., Angelov I. B., Pervak V.** Reliable optical characterization of e-beam evaporated TiO₂ films deposited at different substrate temperatures. *Applied Optics*, 2014, vol. 53, no. 4, p. A8–A15.
10. **Bennett J. M., Pelletier E., Albrand G., Borgogno J. P., Lazarides B., Carniglia C. K., Schmell R. A., Allen T. H., Tuttle-Hart T., Guenther K. H., Saxer A.** Comparison of the properties of titanium dioxide films prepared by various techniques. *Applied Optics*, 1989, vol. 28, no. 16, p. 3303–3317.
11. **Spesivtsev E. V., Rykhliitskii S. V., Shvets V. A.** Development of Methods and Instruments for Optical Ellipsometry at the Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. *Avtometriya*, 2001, vol. 47, no. 5, p. 5–12. (in Russ.)
12. **Fujiwara H.** Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications. Chichester, England, John Wiley & Sons, 2007.
13. **Tanemura S., Miao L., Jin P., Kaneko K., Terai A., Nabatova-Gabain N.** Optical properties of polycrystalline and epitaxial anatase and rutile TiO₂ thin films by rf magnetron sputtering. *Applied Surface Science*, 2003, vol. 212–213, p. 654–660.
14. **Macleod H. A.** Structure related optical properties of thin films. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1986, vol. 4, no. 3, p. 418–422.
15. **Harris M., Macleod H. A., Ogura S., Pelletier E., Vidal B.** The relationship between optical inhomogeneity and film structure. *Thin Solid Films*, 1979, vol. 57, no. 1, p. 173–178.
16. **Kinosita K., Nishibori M.** Porosity of MgF₂ Films-Evaluation Based on Changes in Refractive Index Due to Adsorption of Vapors. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 1969, vol. 6, p. 730–733.
17. **Poxson D. J., Mont F. W., Schubert M. F., Kim J. K., Schubert E. F.** Quantification of porosity and deposition rate of nanoporous films grown by oblique-angle deposition. *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 93, p. 101914.
18. **Hawkeye M. M., Brett M.** Controlling the optical properties of nanostructured TiO₂ thin films. *Physica Status Solidi A*, 2009, vol. 206, no. 5, p. 940–943.

Материал поступил в редколлегию

*Received
27.04.2020*

Сведения об авторах / Information about the Authors

Азаров Иван Алексеевич, инженер, младший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (Новосибирск, Россия); младший научный сотрудник, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия)

Ivan A. Azarov, Engineer, Junior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation); Junior Researcher, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)

azarov_ivan@mail.ru

Купер Константин Эдуардович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

Konstantin E. Kuper, PhD, Senior Scientific Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

k.e.kuper@inp.nsk.su

Лемзяков Алексей Георгиевич, младший научный сотрудник, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия); инженер, младший научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

Aleksey G. Lemzyakov, Junior Researcher, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation); Engineer, Junior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

lemzyakov89@gmail.com

Поросев Вячеслав Викторович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

Vyacheslav V. Porosev, PhD, Senior Scientific Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

porosev@inp.nsk.su

Шкляев Александр Андреевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (Новосибирск, Россия); ведущий научный сотрудник, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия)

Alexander A. Shklyaev, Doctor of Science, Leading Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation); Leading Researcher, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)

shklyaev@isp.nsc.ru