

УДК: 535.525.9

DOI: 10.34824/VKNIRAN.2020.2.2.011

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗЕРКАЛЬНОГО ОТРАЖЕНИЯ В СЕРИИ BSN ПЛЕНОК.**

© **Алиев Ислам Магомедович (а), Умхаева ЗарганСайпудиновна (б), Ковтун Анатолий Павлович (с), Алихаджиев Саидмагомед Хаважаевич (д), Абубакаров Абу Геланиевич (е), Дудаева Малика Ахметовна (ф), Садыков Хизир Амирович (г)**

(а) Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, лаборатория металлов, сплавов и композиционных материалов, с. н. с., к.ф.-м.н. Чеченский государственный университет, Российская Федерация, г. Грозный; кафедра физической электроники, к.ф.-м.н., [ialiew@mail.ru](mailto:ialiew@mail.ru)

(б) Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, лаборатория металлов, сплавов и композиционных материалов, г.н.с., зав. лаб., д.ф.-м.н.

Чеченский государственный университет, Российская Федерация, г. Грозный; кафедра общая физика, д.ф.-м.н., [zargan.umhaeva@yandex.ru](mailto:zargan.umhaeva@yandex.ru)

(с) Южный научный центр Российской академии наук, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону; лаборатория наноактивных сред и материалов, н.с., к.ф.-м.н. [kovtun.ap@mail.ru](mailto:kovtun.ap@mail.ru)

(д) Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, Российская Федерация, г. Грозный; лаборатория экспериментальной физики, м.н.с., к.ф.-м.н., [said366502@mail.ru](mailto:said366502@mail.ru)

(е) Российский государственный аграрный университет-Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, Институт механики и энергетики им. В.П. Горячкина, Российская Федерация, г. Москва; кафедра технического сервиса машин и оборудования, магистр, [abubakarov12@mail.ru](mailto:abubakarov12@mail.ru)

(ф) Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, Российская Федерация, г. Грозный; лаборатория металлов, сплавов и композиционных материалов, м. н. с., [malika478\\_81@mail.ru](mailto:malika478_81@mail.ru)

(г) Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону; отдел интеллектуальных материалов и нанотехнологий, н. с., к.ф.-м.н., [hizir-2010@mail.ru](mailto:hizir-2010@mail.ru)

**Аннотация.** В данной работе приводятся результаты получения и рентгендифракционных исследования серии пленок на основе ниобата -бария -стронция (BSN). Приведены технологические параметры напыления, методика структурных исследований, а также результаты исследования интенсивности зеркально отраженного Н-поляризованного излучения как функция угла зеркального отражения. Показана зависимость угла зеркального отражения от толщины пленки.

**Ключевые слова:** сегнетоэлектрики, пленки, коэффициент преломление.

**INVESTIGATION OF THE INTENSITY OF MIRROR REFLECTION IN A SERIES OF BSN FILMS.**

© **Aliev Islam Magomedovich (a), Umkhayeva Zargan Saipudinovna (b), Kovtun Anatoly Pavlovich.(c), Alikhajiev Saidmagomed Khavazhayevich (d), Abubakarov Abu Gelanievich.(e), Dudaeva Malika Akhmetovna (f), Sadykov Khizir Amirovich (g)**

- (a) Kh. I. Ibragimov complex research Institute of the Russian Academy of Sciences, laboratory of metals, alloys and composite materials, Senior Researcher, Ph. D. Chechen state University, Russian Federation, Grozny; department of physical electronics, Ph. D., ialiew@mail.ru
- (b) Kh. I. Ibragimov complex research Institute of the Russian Academy of Sciences, laboratory of metals, alloys and composite materials, head of laboratory, doctor of science. Chechen state University, Russian Federation, Grozny; department of general physics, PhD, zargan.umhaeva@yandex.ru
- (c) Southern scientific center of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Rostov-on-Don; laboratory of nanoactive media and materials, n. s., Ph. D., kovtun.ap@mail.ru
- (d) Kh. I. Ibragimov complex research Institute of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Grozny; laboratory of experimental physics, M. SC., Ph. D., said366502@mail.ru
- (e) Russian state agrarian University-Moscow Timiryazev agricultural Academy, Goryachkin Institute of mechanics and power engineering, Russian Federation, Moscow; Department of technical service of machinery and equipment, master's degree, abubakarov12@mail.ru
- (f) Kh. I. Ibragimov complex research Institute of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Grozny; laboratory of metals, alloys and composite materials, junior researcher, malika478\_81@mail.ru
- (g) Research Institute of physics of the southern Federal University, Russian Federation, Rostov-on-Don; Department of intelligent materials and nanotechnologies, n. s., Ph. D., hizir-2010@mail.ru

**Abstract.** This paper presents the results of obtaining and x-ray diffraction studies of a series of films based on niobate-barium-strontium (BSN). The technological parameters of sputtering, the method of structural studies, as well as the results of studying the intensity of mirror-reflected H-polarized radiation as a function of the angle of mirror reflection are presented. The dependence of the mirror reflection angle on the film thickness is shown.

**Key words:** Ferroelectrics, films, coefficient refraction.

**Введение**

Кристаллы на основе твердых растворов ниобата бария-стронция, относятся к классу кислородно-октаэдрических сегнетоэлектриков со структурой тетрагональной калий-

вольфрамовой бронзы. Интерес к ниобату бария стронция (BSN) возник еще в 60-е годы в связи с необходимостью создавать кристаллы для управления лазерным излучением. BSN перспективен для использования в электрооптике из-за своего высокого электрооптического коэффициента, который в разы больше, чем у широко распространенного промышленного ниобата лития [5]. Твердые растворы BSN отличаются высокими диэлектрическими параметрами, однако сложны в технологии их изготовления: высокая температура кристаллизации ( $\sim 1440^\circ\text{C}$ ), большой полиморфизм, многоступенчатая технология получения однофазной среды и т.п. [1].

### Методы исследования и получения пленок

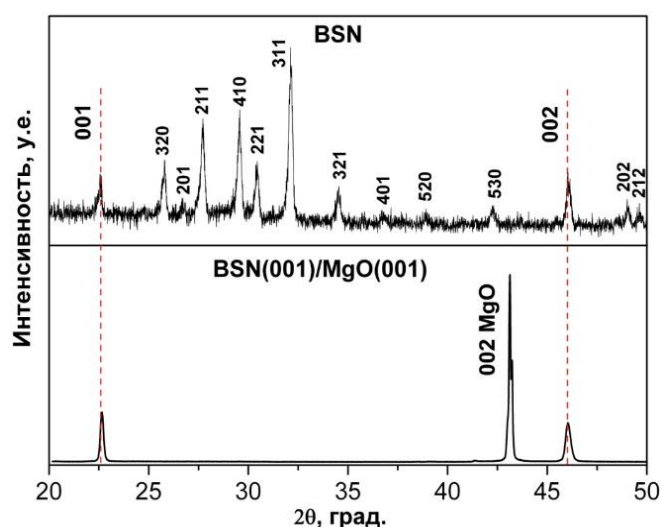
Изготовление BSN – пленок осуществлялось на установке «Плазма-50 СЭ», предназначенной для получения тонких пленок сложных оксидов методом емкостного высокочастотного разрядного (ЕВЧР) распыления. Исходным материалом для напыления пленок ниобата барий стронция послужила керамическая мишень твердого раствора состава  $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$ . Мишень диаметром 50 мм и толщиной 3 мм была изготовлена в отделе «Интеллектуальных материалов и нанотехнологии» НИИ физики ЮФУ [2].

Экспресс рентгеноструктурные исследования выполнялись методом рентгеновской дифракции на модифицированном дифрактометре ДРОН-2 с использованием  $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Сканирование по схеме  $\theta$ - $2\theta$  проводилось с использованием шагового двигателя, аналогово-цифрового преобразователя с управлением по специально разработанной программе на компьютере.

Измерение угловых зависимостей интенсивности зеркального отражения поляризованного излучения, проводились на установке с использованием гониометра ГУР-5 [3]. Сканирование по углу зеркального отражения проводилось с использованием шагового двигателя, аналогово-цифрового преобразователя с управлением по специально разработанной программе на компьютере.

### Рентгеноструктурные исследования

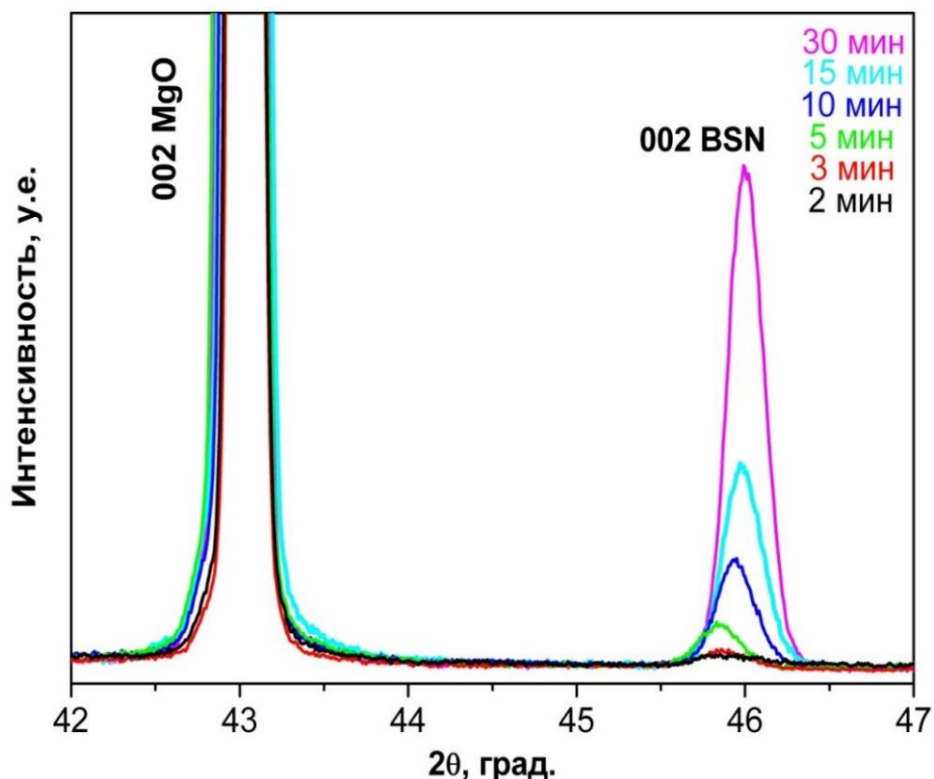
На рисунке 1 представлена типичная рентгенограмма мишени и полученных на её основе пленок BSN(001) на подложке MgO(001).



**Рис. 1.** Рентгенограммы ниобата бария-стронция мишени (вверху), пленки на подложке MgO(001) (снизу)

Отсутствие других рефлексов, соответствующих BSN мишени, свидетельствует о строгой ориентации (001) атомных плоскостей BSN пленки.

На рисунке 2 приведен участок рентгенограммы интенсивности 002 рефлекса структуры BSN(001)/MgO(001) серий пленок. Цветами выделены рентгенограммы пленок с разным временем напыления.

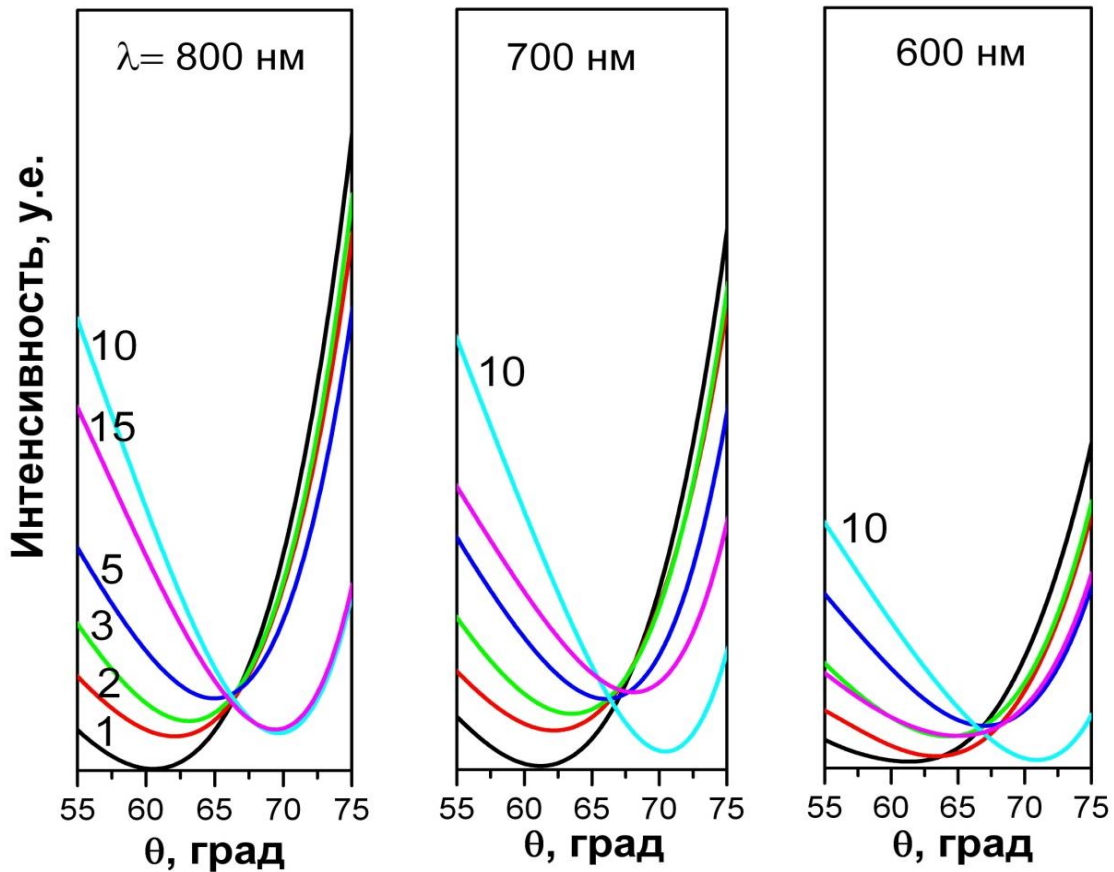


**Рис. 2.** Рентгенограмма интенсивности 002 рефлекса структуры BSN (001)/MgO (001) серий пленок

Как видно из рисунка 2 рефлекс 002 BSN в зависимости времени напыления смещается. В то время как 002 рефлекс подложки MgO (001) практически не меняется от времени напыления. Кристаллическая структура BSN пленки формируется уже при 2..3 минутах напыления.

#### Оптические исследования

На рисунке 3 приведено исследование интенсивности зеркально отраженного Н-поляризованного излучения как функция угла зеркального отражения (ось абсцисс). По оси ординат отложены интенсивности зеркального отражения пленок, полученных при 1, 2, 3, 5, 10, 15 минутах напыления. Представлены отдельно угловые зависимости с длинами волн  $\lambda = 600, 700$  и  $800$  нм от серии BSN пленок.



**Рис. 3.** Интенсивность Н-поляризованного излучения как функция угла зеркального отражения, времени напыления пленки (цифры в минутах) и длины волны (длины волн указаны на рисунках)

Видно, что кривые Н-отражения от разных пленок для длин волн в диапазоне от  $\lambda = 800 \dots 600$  нм для некоторых углов отражения пересекаются в одной точке. Точка пересечения является основным экспериментальным фактом, который обнаружен в настоящей работе. Факт существования угла пересечения позволяет сделать утверждение, согласно которому при угле пересечения интенсивность Н-отраженного сигнала от толщины пленки не зависит. Далекое не для всех серий пленок этот угол нами наблюдался. На рисунке приведены результаты той серии, в которой угол пересечения (узел) наблюдается в явном виде.

В основу интерпретации точки пересечения положена простейшая модель оптически однородной пленки на оптически однородной подложке. Модель хорошо известна, её результаты вошли в учебную литературу[5].

$$r(\theta, \lambda, h) = \frac{r_{12}e^{-2i\psi} + r_{23}}{e^{-2i\psi} + r_{12}r_{23}}$$

В этом выражении:  $\theta$  - угол падения волны от нормали пленки,  $\lambda$  – длина волны,  $h$  – толщина пленки,  $r_{12}(\theta, \lambda)$  – амплитуда отражения от границы раздела 1 – 2,  $r_{23}(\theta, \lambda)$  – амплитуда отражение от границы раздела 2 – 3

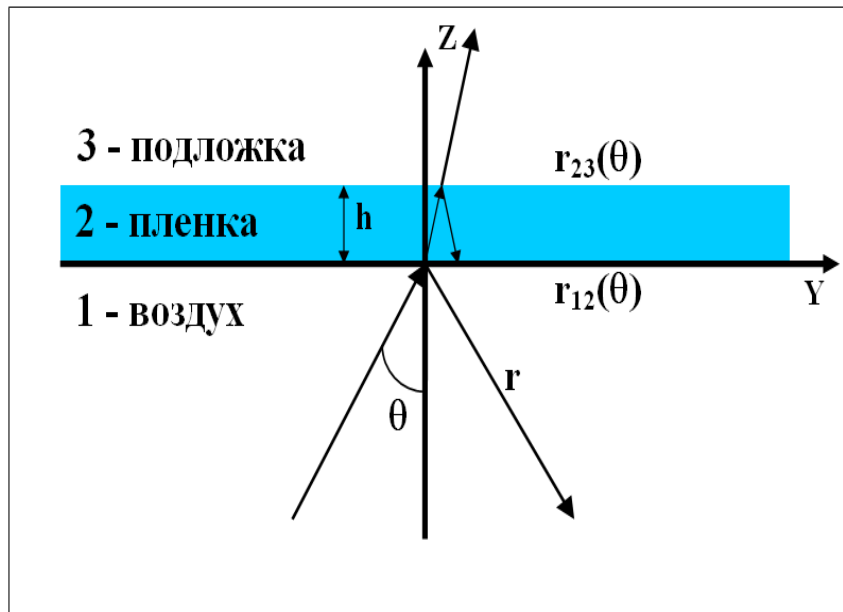
Модель допускает точное решение для амплитуды зеркального отражения. Результат

выражается через две амплитуды отражения:  $r_{12}$  и  $r_{23}$ . Вывод формулы основан на двух положениях:

- 1) модуль волнового вектора определяется материалом пленки и зависит от показателя преломления материала пленки  $\left(k = \frac{2\pi}{\lambda} n_2\right)$ ;
- 2) проекция волнового вектора на ось  $Y$  сохраняется в любом месте пространства и задается углом зеркального отражения  $\left(k_y = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta\right)$ .

Фаза волны,  $\psi$ , есть произведение проекции волнового вектора на ось  $Z$  на толщину пленки.

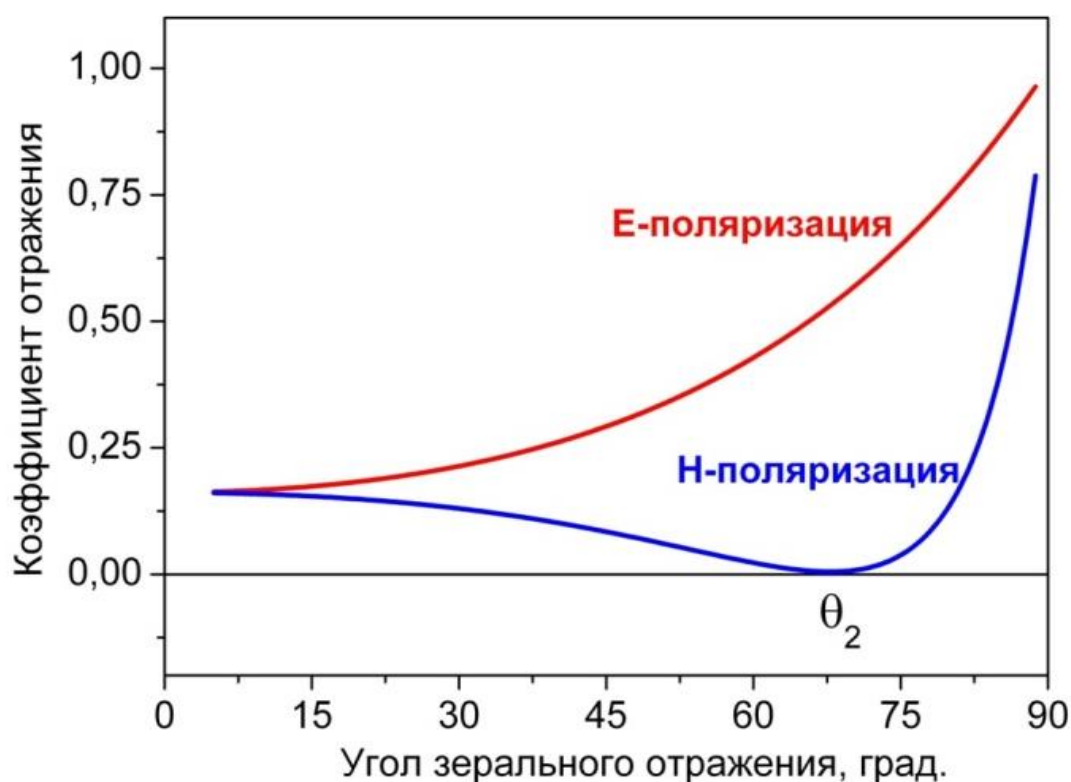
Схема отражения волны от двух границ раздела представлена на рисунке 4. Среда 2 – это пленка толщиной  $h$ , среда 3 – подложка и среда 1 – это воздух. Пленка лежит в плоскости  $XY$ . Ось  $Z$  направлена внутрь подложки. Излучение с длиной волны  $\lambda$  падает под углом  $\theta$  к оси  $Z$ . Ось  $Y$  направлена вдоль падения луча.



**Рис . 4.** Схема отражения волны от двух границ раздела 1-2 (воздух – пленка) и 2-3 (пленка-подложка)

Коэффициент отражения от пленки есть квадрат модуля амплитуды отражения,  $R = |r(\theta, \lambda, h)|^2$ . Измеряемая нами интенсивность отражения пропорциональна коэффициенту отражения.

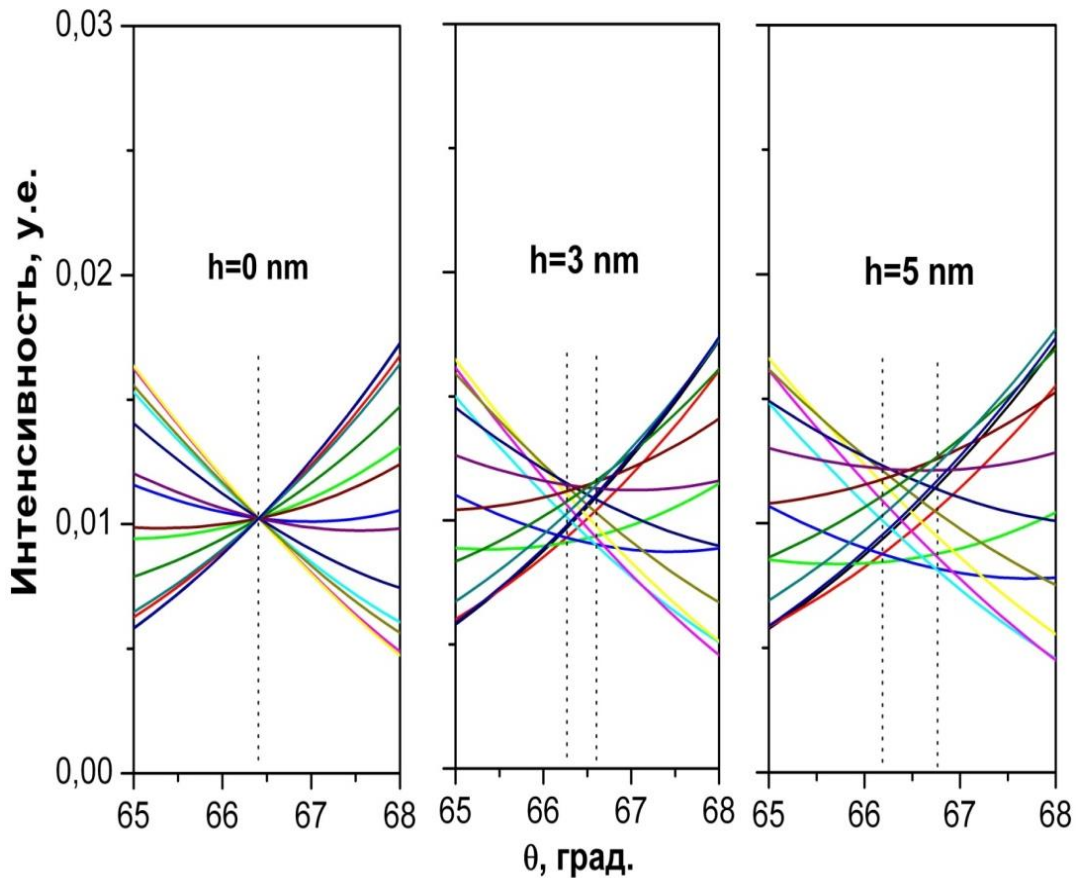
Рассмотрим физику амплитуд отражения. Заметим, что толщина пленки содержится только в фазе волны. В том случае, когда  $r_{12} = 0$ , амплитуда отражения равна  $r = r_{23}e^{2i\psi}$ . При прозрачном материале пленки фаза действительна и, следовательно, квадрат модуля амплитуды равна квадрату модуля  $r_{23}$ , которая от  $h$  не зависит. Это и является причиной возникновению угла пересечения кривых отражений. Условия, при которых  $r_{12} = 0$ . В случае идеальной поверхности пленки и прозрачного материала пленки амплитуда отражения определяется коэффициентом Френеля и эта величина действительна. Поведение Френелевской амплитуды для Н- и Е- поляризации представлено на рисунке 5.



**Рис . 5.** Зависимость коэффициента отражения E- и H-поляризации как функции угла зеркального отражения

Из рисунка видно, что только при H-поляризации существует пересечение амплитуды с нулем. Это пересечение хорошо известно и описывает явление полной поляризации, которое наблюдается при так называемом угле Брюстера. Известно, что тангенс угла Брюстера есть показатель преломления среды. Следовательно, обнаруженный нами угол пересечения кривых отражения совпадает с углом Брюстера материала пленки. Это необходимое условие для угла пересечения. Достаточное условие - если материал подложки в серии пленок одинаковый.

Иллюстрация характера «размытия» угла пересечения от шероховатости на границе раздела 1-2 приведена на рисунке 6. Введем дополнительный слой шероховатости со средним по объему показателем преломления (примем его равным  $n = 1.8$ ) и рассмотрим теоретически поведение коэффициента отражения от толщины этого слоя шероховатости.



**Рис. 6.** «Размытие» узла кривых зеркального отражения тонким поверхностным слоем SL(d) на BSN(h)/MgO модель (кривые принадлежат пленкам h-толщиной в диапазоне 0÷500 нм. Показатель преломления MgO  $n=1.73$ , толщина слоя шероховатости ( $n=1.8$ ,) указана на рисунке  $d=0, 3, 5$  nm)

Из рисунка 6 видно, что влияние дополнительного слоя чрезвычайно сильное. Фактически лежащий на поверхности пленки слой толщиной порядка 5 нм уже размывает узел.

### Заключение

Полученные нами результаты исследования свойств серии BSN плёнок от угла зеркального отражения позволяет предполагать, что оценку качества напыления пленок при данном технологическом процессе получения BSN, можно осуществлять, сортируя плёнки по углу пересечения кривых Н-отражения от разных пленок для длин волн в диапазоне от  $\lambda = 800 \dots 600$  нм для выбранных углов зеркального отражения, то есть выделять семейства плёнок с конкретным показателем преломления и одинаковым интерфейсом плёнка - подложка.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Абубакаров А.Г., 2013. Оптимизация условий изготовления BSN – "мишеней". / А.Г. Абубакаров, Л.А. Резниченко, И.А. Вербенко, Л.А. Шилкина, Г.Н. Толмачев,



- С.Х. Алихаджиев, С.В. Хасбулатов // Сб-к трудов Второго Международного междисциплинарного молодежного симпозиума «Физика бессвинцовых пьезоактивных и родственных материалов. (Анализ современного состояния и перспективы развития)» («LFPM-2013»). Ростов-на-Дону Б. Сочи, 2013. С. 97-105.
2. Абубакаров А. Г. Оптимизация условий получения и свойства бинарной системы  $\text{BaNb}_2\text{O}_6 - \text{SrNb}_2\text{O}_6$  / А.Г. Абубакаров, И.А. Вербенко, А.В. Павленко, Г.Н. Толмачев, Л.А. Резниченко, Л.А. Шилкина, И.М. Алиев, С.Х. Алихаджиев. // Известия РАН. Серия. физическая, 2014. Т. 78. № 8. С. 943-945.
  3. Зинченко С.П. О возможности контроля роста тонких пленок методом угловой рефлектометрии в области угла Брюстера. / Зинченко С.П., Ковтун А.П., Толмачев Г.Н.
  4. // Журнал Технической Физики. 2009. 79(11): С. 128-133.
  5. Кузьминов Ю.С. Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением. М: Наука, 1982. 400 с.
  6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М: Наука, 1982. 616 с.

## REFERENCES

1. Abubakarov AG, 2013. Optimization of the manufacturing conditions of BSN - "targets". / A.G. Abubakarov, L.A. Reznichenko, I.A. Verbenko, L.A. Shilkina, G.N. Tolmachev, S.Kh. Alikhadzhiev, S.V. Khasbulatov // Sb-to the proceedings of the Second International Interdisciplinary Youth Symposium "Physics of Lead-Free Piezoactive and Related Materials. (Analysis of the current state and development prospects)" ("LFPM-2013"). Rostov-on-Don B. Sochi, 2013. Pp. 97-105.
2. Abubakarov A.G. Optimization of production conditions and properties of the binary system  $\text{BaNb}_2\text{O}_6 - \text{SrNb}_2\text{O}_6$  / A.G. Abubakarov, I.A. Verbenko A.V. Pavlenko, G.N. Tolmachev, L.A. Reznichenko, L.A. Shilkina, I.M. Aliev, S.Kh. Alikhadzhiev. // Proceedings of the RAS. Series. Physical, 2014.V. 78. No. 8. Pp. 943-945.
3. Zinchenko S.P. On the possibility of controlling the growth of thin films by angular reflectometry in the region of the Brewster angle. / Zinchenko S.P., Kovtun A.P., Tolmachev G.N.
4. // Journal of Technical Physics. 2009.79 (11): Pp. 128-133.
5. Kuzminov Yu.S. Ferroelectric crystals for controlling laser radiation. M: Nauka, 1982. 200 p.
6. Landau L. D., Lifshits E. M. Electrodynamics of continuous media. M: Nauka, 1982. 616 p.