

УДК 539.23,621.793.18

## РОСТ ТОНКИХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК NiO НА ПОДЛОЖКАХ ИЗ LiNbO<sub>3</sub>

© 2020 г. В. А. Лузанов\*

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
пл. Введенского, 1, Фрязино, Московской обл., 141190 Российская Федерация

\*E-mail: valery@luzanov.ru

Поступила в редакцию 26.06.2020 г.

После доработки 26.06.2020 г.

Принята к публикации 30.06.2020 г.

Впервые сообщается о получении эпитаксиальных (111) NiO-пленок на подложках (0001) LiNbO<sub>3</sub> методом реактивного магнетронного распыления. Рентгеноструктурный анализ полученных пленок проводился в сочетании с послойным плазменным травлением. Показано, что небольшое расогласование кристаллических решеток позволяет получить структурно совершенные тонкие слои NiO на подложках LiNbO<sub>3</sub>. С увеличением толщины пленки структурное совершенство пленки ухудшается из-за накопления дислокаций вследствие ионной бомбардировки во время роста.

DOI: 10.31857/S003384942011011X

Оксид никеля представляет собой широкозонный полупроводник *p*-типа и антиферромагнетик с температурой Нееля 525 К. Он имеет кубическую решетку типа NaCl (пространственная группа *Fm-3m*). По разным данным параметр решетки лежит в диапазоне: 0.41684...0.42100 нм. Благодаря уникальным физическим свойствам оксида никеля, высококачественные пленки NiO представляют большой интерес для использования в электрохромных устройствах [1], системах смещения обмена [2] и ультрафиолетовых детекторах [3].

Ниобат лития (LiNbO<sub>3</sub>) является популярным материалом для использования в качестве электрооптических и электроакустических устройств, преобразователей энергии и т.д. Он имеет тригональную кристаллическую систему, пространственную группу *R3c* и параметры решетки *a* = 0.5148 нм и *c* = 1.3863 нм. Его кристаллическая структура не имеет центральной симметрии, поэтому ниобат лития является сегнето- и пьезоэлектриком. Комбинация пленки оксида никеля с подложкой из ниобата лития представляет несомненный интерес для различных физических исследований.

Кристаллографическая ориентация тонких пленок имеет большое значение в работе современных электронных, магнитных гетероструктур и устройств, особенно когда толщина пленок уменьшается до нанометрового масштаба. Ранее сообщалось об осаждении эпитаксиальных пленок оксида никеля на подложках из сапфира различными методами: импульсное лазерное осаждение

[4], атомно-слоевое осаждение [5], магнетронное распыление [6], химическое осаждение из газовой фазы [7].

В данной работе впервые сообщается об осаждении эпитаксиальных пленок оксида никеля на подложке из ниобата лития методом постоянного магнетронного реактивного распыления.

Подготовка образцов проводилась в модифицированной вакуумной катодно-распылительной системе A550VZK (Leybold-Heraeus GmbH). Система с базовым давлением  $1 \times 10^{-6}$  Торр была оснащена восьмидюймовыми катодами с магнитами для использования в качестве системы магнетронного распыления. В качестве подложки для выращивания пленок оксида никеля использовали монокристалл (0001) LiNbO<sub>3</sub>. Тонкие пленки NiO осаждали в реакционной смеси O<sub>2</sub>–Ag в соотношении 1 : 2 при давлении  $2 \times 10^{-2}$  Торр. Перед напылением подложку нагревали до 400°C.

Полученные пленки были исследованы методом рентгеноструктурного анализа на автоматизированном двухкристальном дифрактометре ДРОН-3, работающем по схеме Брэгга–Брентано. Использовались кварцевый монохроматор и излучение CuK<sub>α1</sub>.

На рис. 1 представлена дифрактограмма от пленки NiO, нанесенной на подложку LiNbO<sub>3</sub>. На дифрактограмме присутствует только одно отражение от пленки (111) NiO. На вставке показан профиль пика (111) NiO.

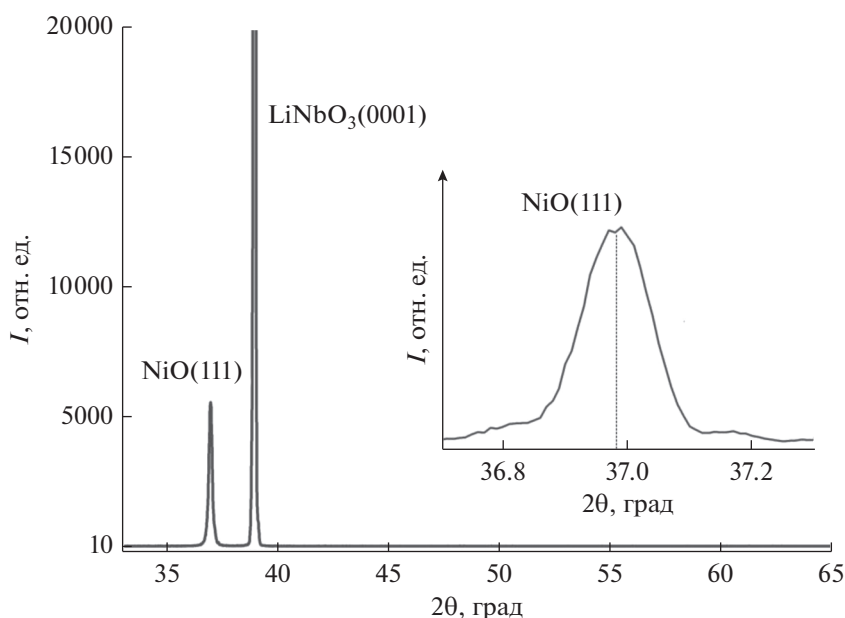


Рис. 1. Рентгеновский спектр пленки NiO, выращенной на подложке из LiNbO<sub>3</sub>; на вставке – профиль пика (111) NiO.

На рис. 2 представлена полюсная фигура плоскостей {113} эпитаксиальной пленки (111) NiO. Можно сделать вывод, что кристаллографические ориентационные соотношения между пленкой и подложкой следующие: (111) NiO||{(0001) LiNbO<sub>3</sub> и {110} NiO||{010} LiNbO<sub>3</sub>. В этом случае рассогласование решеток составляет 0.1%, что на порядок меньше, чем при нанесении пленок NiO на Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Полюсная фигура имеет симметрию шестого порядка, что свидетельствует о наличии 180-градусных двойников в пленке. Это обычно имеет место при гетероэпитаксии пленок с кубической симметрией на подложках с тригональной симметрией [8–10].

Для определения качества полученных пленок были измерены кривые качания от плоскости (111). Обнаружено, что профиль кривой качания отличается от гауссового распределения и представляет собой суперпозицию по меньшей мере двух гауссовых кривых. Это означает, что структура пленки не является однородной.

Для изучения изменений структуры пленки по толщине здесь был использован метод послойного травления пленок в установке радиочастотного плазменного травления Z401S (Leybold GmbH), описанный ранее в [11]. Травление проводилось в чистом аргоне с энергией 300 эВ при плотности мощности 300 мВт на кв. см.

На рис. 3 показаны результаты измерения кривой качания после определенного времени травления пленки. Как видно из рисунка, кривая качания исходной пленки имеет дополнительное уширение в нижней части. После 20 мин травления пленки в аргоне уширение уменьшается, а че-

рез 40 мин практически исчезает. Из этого можно сделать вывод, что в начале осаждения пленка является наиболее совершенной. Полуширина кривой качания составляла 0.05°. С увеличением толщины пленки происходит накопление количества дефектов в пленке вследствие ионной бомбардировки. Это приводит к уширению в нижней части пика.

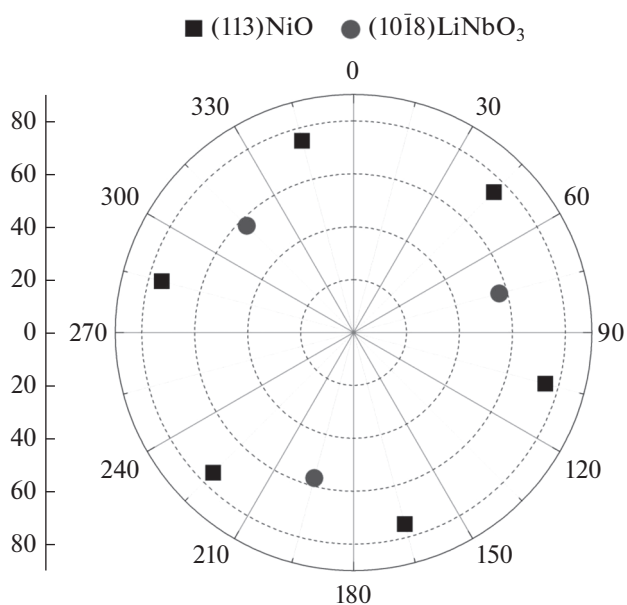


Рис. 2. Полюсная фигура от пленки (111) NiO, выращенной на (0001) LiNbO<sub>3</sub>.

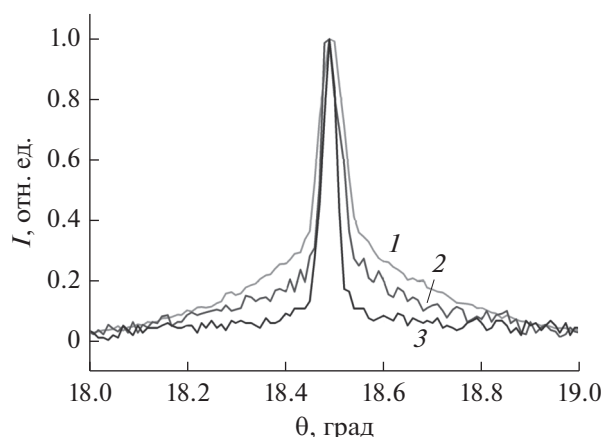


Рис. 3. Кривые качания после различного времени травления пленки: 0 (1), 20 (2) и 40 мин (3).

Таким образом, исследования показали, что с помощью магнетронного реактивного распыления на постоянном токе можно получать высококачественные пленки NiO на подложках LiNbO<sub>3</sub>. Несмотря на наличие ионной бомбардировки в процессе роста пленки, рассогласование решетки на уровне 0.1% допускает гетероэпитаксию тонких слоев с ориентацией (111) на подложки с ориентацией (0001).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания и при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 19-07-00432, 18-29-19047, 20-07-01075).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ren Y., Chim W.K., Guo L. et al. // Solar Energy Mater. and Solar Cells. 2013. V. 116. P. 83.
2. Del Bianco L., Boscherini F., Fiorini A.L. et al. // Phys. Rev. B. 2008. V. 77. № 9. P. 094408.
3. Ohta H., Hirano M., Nakahara K. et al. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. № 5. P. 1029.
4. Kakehi Y., Nakao S., Satoh K., Kusaka T. // J. Crystal Growth. 2002. V. 237–239. Pt. 1. P. 591.
5. Lindahl E., Lu J., Ottosson M., Carlsson J.-O. // J. Crystal Growth. 2009. V. 311. № 16. P. 4082.
6. Wang Y., Ghanbaja J., Boulet P. et al. // Acta Materialia. 2019. V. 164. P. 648.
7. Uchida K., Yoshida Ken-ichi, Zhang D. et al. // AIP Advances. 2012. V. 2. № 4. P. 042154.
8. Лузанов В.А., Котелянский И.М., Шустин Е.Г. // РЭ. 2017. Т. 62. № 7. С. 714.
9. Lee J.H., Kwon Y.H., Kong B.H. et al. // Cryst. Growth and Design. 2012. V. 12. № 5. P. 2495.
10. Yamauchi R., Hamasaki Y., Shibuya A. et al. // Sci. Rep. 2015. V. 5. P. 14385.
11. Лузанов В.А. // РЭ. 2019. Т. 64. № 7. С. 728.