

Стогний А. И., Серокурова А. И., Новицкий Н. Н.

## СТОЙКОСТЬ ПЛЕНОЧНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР Be/BeO, Al/AlO<sub>x</sub> К РАСПЫЛЕНИЮ МЕДЛЕННЫМИ ИОНАМИ O<sup>+</sup>: МАСКИ НА ИХ ОСНОВЕ ДЛЯ ГЛУБОКОГО АНИЗОТРОПНОГО ТРАВЛЕНИЯ

ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь

В работе исследованы сравнительные процессы распыления слоев бериллия и алюминия пучками ионов кислорода, энергия которых варьировалась от 300 до 600 эВ. Предложена феноменологическая модель, объясняющая полученные результаты исходя из разности масс и химической активности бериллия и алюминия. Разработаны двухслойные маски для анизотропного травления р-слоев GaN, Si, Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>. Данные структуры составляют основу магнетронных и магнитоплазменных кристаллов для формирования дискретных элементов средств современной информатики СВЧ диапазона частот.

Интерес к магнетронным структурам и наличие новых возможностей, позволяющих создавать более сложные – трёхмерные структуры, обеспечивает приоритетный характер полученных результатов исследований, проведённых в работе.

Для сравнительного анализа стойкости наноразмерных структур, а также определения перспектив использования их в качестве масок для получения анизотропных профилей травления металлические маски были получены распылением ионами аргона мишеней соответствующего состава и чистотой лучше 99,9%, а BeO и AlO<sub>x</sub> – пучком ионов кислорода в раздельных вакуумных процессах. Метод ионно-лучевого распыления металлических мишеней ионами аргона широко используется для получения изотропных и анизотропных профилей травления структур магнетроники и магнитоплазмоники [1–5]. Особенностью ионно-лучевого метода является получение высокооднородных металлических пленок с плоскопараллельными интерфейсными границами независимо от химической природы интерфейсной границы.

Распыление металлических мишеней пучком ионов кислорода с энергией от 300 до 600 эВ показало, что Be, который легче атома кислорода и Al, сравнимый с ним по массе, распыляются в разы медленнее, чем более тяжелые металлические мишени при плотности тока пучка положительных ионов кислорода менее 0,4 мА/см<sup>2</sup>, рабочее давление кислорода менее 3×10<sup>-4</sup> Тор и предельном вакууме менее 2×10<sup>-5</sup> Тор. Было установлено, что основной причиной этого факта является формирование «затеняющего» процессы распыления поверхностного слоя BeO и AlO<sub>x</sub> толщиной порядка нанометра (не превышающего длину пробега атома кислорода в мишени) и направленность движения атомов легких металлов вглубь мишени поле прямого столкновения с налетающим атомом кислорода.

Полученные результаты поясняет предложенная ниже феноменологическая модель. Качественная модель ускоренного распыления Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> по сравнению с Al, Be медленными ионами кислорода может быть представлена следующим образом. Процесс распыления ионами кислорода мишеней Al/AlO<sub>x</sub>, Be/BeO и Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> протекает в условиях прямых механических столкновений, включающих в идеальных условиях абсолютно упругие и абсолютно неупругие удары как крайние случаи. Воспользуемся известным выражением  $E_i^E = eU\gamma_i^E \cos \theta$ , где  $\gamma_i^E = 4 \frac{M_0 M_i}{(M_0 + M_i)^2}$  – параметр, характеризующий обмен энергией при упругом ударе, здесь  $M_{Be} = 9 \text{ а.е.}$ ,  $\gamma_{Be} = 0.92$ ,  $M_O = 16 \text{ а.е.}$ ,  $M_{Al} = 27 \text{ а.е.}$ ,  $\gamma_{Al} = 0.94$ ,  $M_Y = 89 \text{ а.е.}$ ,  $\gamma_Y = 0.52$ ,  $M_{Fe} = 56 \text{ а.е.}$ ,  $\gamma_{Fe} = 0.69$ . В случае неупругого удара доля переданной энергии характеризуется параметром  $\alpha_i = \frac{M_i}{M_0 + M_i}$  – где  $\alpha_{Be} = 0.36$ ,  $\alpha_{Al} = 0.63$ ,  $\alpha_{Ni} = 0.80$ ,  $\alpha_Y = 0.85$ ,  $\alpha_{Fe} = 0.78$  для бериллия, алюминия, никеля, иттрия и железа, соответственно. Заметим, что в рассматриваемых условиях  $eU \leq 10E_{пор} \approx 500 \dots 600$  эВ, где E – пороговая энергия, необходимая для распыления атома из мишени, а плотность ионов кислорода в потоке

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

$n_{O^+} \ll \rho_{\text{пов}} \sim 10^{16} \text{ см}^{-2}$  существенно меньше поверхностной концентрации атомов, т.к.  $n_{O^+} < 10^{12} \text{ см}^{-2}$  при плотности тока пучка  $j < 0.5 \text{ мА/см}^2$ .

Таким образом, при столкновении с более легкими Al и Be ионы кислорода сравнительно больше энергии расходуют на упругие столкновения, чем с более тяжелыми Y и Fe. При неупругих столкновениях наблюдается обратное. Это является основанием для более интенсивного протекания процессов прямого вбивания атомов Be и Al вглубь маски по сравнению с более тяжелыми атомами мишени. В мишени, наоборот, в поверхностном слое более интенсивно накапливается энергия при торможении ионов кислорода, которая в дальнейшем расходуется на процессы распыления. Данная модель демонстрирует, что при облучении ионами кислорода в результате процессов торможения при налете и перемешивании формируются поверхностные слои условного состава  $\text{MeO}_x$ . Их толщина в основном определяется в данных условиях массой и химической активностью металла. Бериллий является самым легким и наиболее химически активным в данном ряду, его слой имеет относительно большую толщину, но и является относительно более рыхлым. С другой стороны, как следует из представленных выше качественных рассуждений, наименьшую скорость распыления имеет бериллий и слой Be/BeO, но при его распылении формируется сильно шероховатый рельеф, поэтому данный слой перспективен для получения неглубоких профилей травления. Пара Al/ $\text{AlO}_x$  занимает промежуточное положение ввиду его однородности и наиболее легких условий получения толстых слоев ионным распылением, наиболее перспективен для получения глубоких профилей травления.

Это позволило разработать двухслойные маски для анизотропного травления Be/BeO толщиной до 100 нм для анизотропного травления р-слоев GaN, а также наноразмерных слоев Au и  $\text{V}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  при изготовлении двухрешеточных магнитоплазмонных кристаллов (рисунок 1).

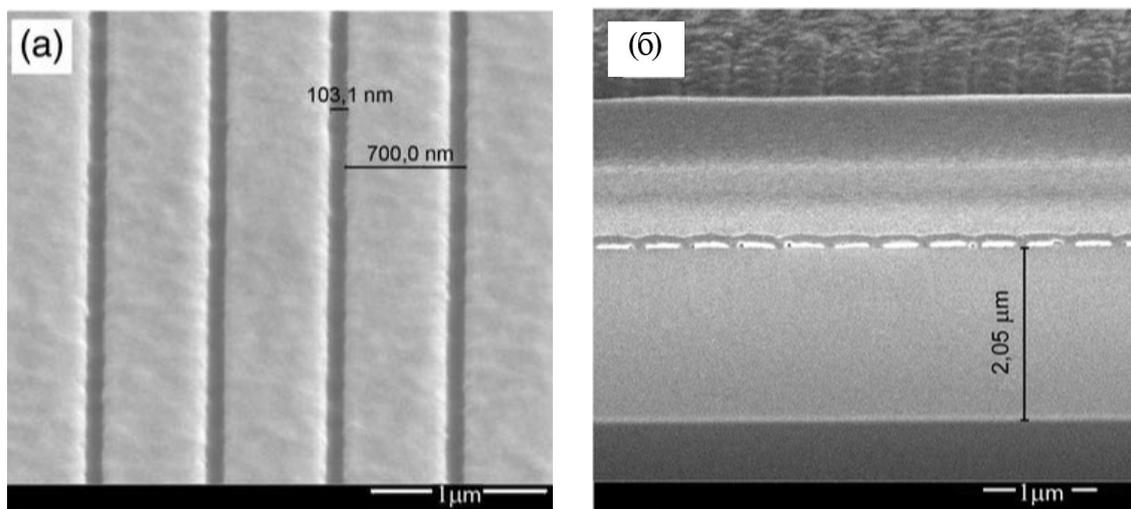


Рисунок 1 – РЭМ-изображения а) вида сверху и б) поперечного сечения инкапсулированных плазмонных кристаллов с периодом 700 нм

В работе получены маски Al/ $\text{AlO}_x$ /Al, где толщина слоев Al не превысила 0,4 мкм, а  $\text{AlO}_x$  – 0,1 мкм для травления на глубину до 2 мкм слоев на основе GaN и изготовления анизотропных профилей травления до 4 мкм в феррит-гранатах (рисунок 2).

Селективность процесса распыления составляла 6-8 нм/мин при использовании масок Be/BeO и 4-6 нм/мин при использовании масок Al/ $\text{AlO}_x$ /Al. Процесс распыления GaN протекал путем формирования и откачки летучих комплексов  $\text{NO}_x$  и образования тонкого слоя  $\text{GaO}_x$ , а атомы Ga ( $M=69,7$  а.е) при ударе медленными атомами кислорода ( $M=16$  а.е) приобретают преимущественно импульс в направлении от поверхности мишени.

Процесс распыления феррит-гранатов  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  для исследования СВЧ-процессов и с замещениями редкоземельными элементами для исследования магнитооптических свойств

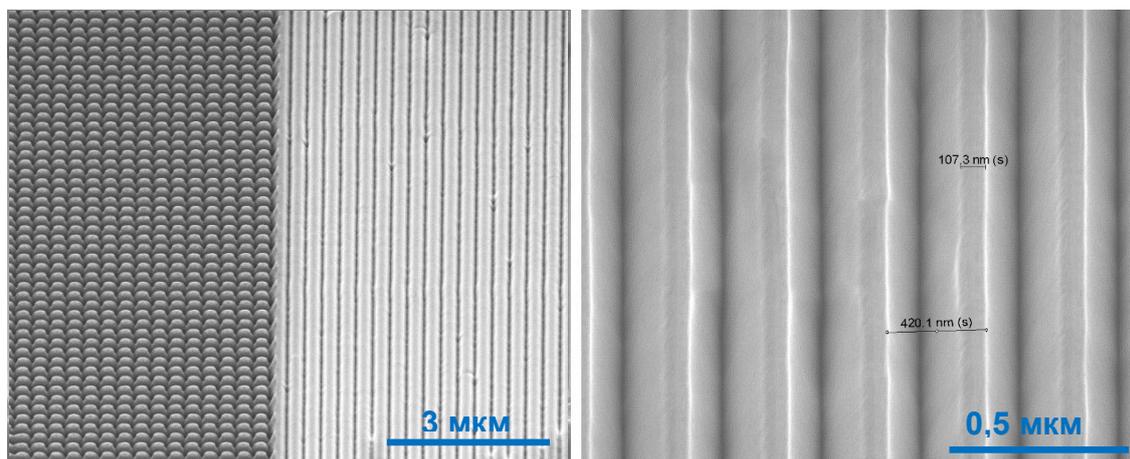


Рисунок 2 – РЭМ-изображения дискретных гетероструктур YIG /Si

происходил почти в два раза быстрее (0,2-0,25 мкм/ч), чем GaN (0,1 мкм/ч) благодаря более тяжелому весу металлов в составе гранатов.

На основе совокупного анализа представленных экспериментальных данных и феноменологической модели были сформированы 1D и 3D периодические структуры (рис. 1-2) в виде слоев представленных металлов, их комбинаций и комбинаций их тонких окисленных слоев. В докладе будут представлены данные оптической, электронной и атомно-силовой микроскопии, включая профили поперечного сечения, электронно-зондового микроанализа, иллюстрирующие представленные результаты. Особенное внимание в докладе будет уделено получению тонких слоев масок без проколов и структурных образований в виде гранул и столбцов, которые при длительных процессах распыления способствуют неравномерному по толщине уходу маски и формированию на рабочей поверхности шероховатого рельефа.

Исследование выполнено за счёт гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований Т23РНФ-010 и Российского научного фонда №23-43-10004

#### Список литературы

1. R. Gieniusz, P. Gruszecki, M. Krawczyk, U. Guzowska, A. Stognij & A. Maziewski The switching of strong spin wave beams in patterned garnet films // *Scientific Reports* | 7: 8771
2. G.P. Yablonskii, A.L. Gurskii, V.N. Pavlovskii, E.V. Lutsenko, V.Z. Zubialevich, T.S. Shulga, A.I. Stognij, H. Kalisch, A. Szymakowski, R.H. Jansen, A. Alam, B. Schineller, M. Heuken, Carrier diffusion length measured by optical method in GaN epilayers grown by MOCVD on sapphire substrates // *Journal of Crystal Growth*, Volume 275, Iss. 1–2, 2005, Pp e1733-e1738
3. V. K. Sakharov, E. N. Beginin, Y. V. Khivintsev, A. V. Sadovnikov, A. I. Stognij, Y. A. Filimonov and S. A. Nikitov // *Spin waves in meander shaped YIG film: Toward 3D magnonics* *Appl. Phys. Lett.* 117, 022403 (2020);
4. Artsiom Kazlou, Alexander L. Chekhov, Alexander I. Stognij, Ilya Razdolski, Andrzej Stupakiewicz. Surface Plasmon-Enhanced Photomagnetic Excitation of Spin Dynamics in Au/YIG:Co Magneto-Plasmonic Crystals // *ACS Photonics* 2021, 8 2197-2202.
5. A. I. Stognij, L. Lutsev, N. N. Novitskii, A. V. Bepalov, O. N. Golikova, V. A. Ketsko, R. Gieniusz and A. Maziewski, Synthesis, magnetic properties and spin-wave propagation in thin Y3Fe5O12 films sputtered on GaN-based substrates // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 48 (2015) 485002-8.