

Научная статья

УДК 539.231

DOI 10.18101/2306-2363-2024-3-41-47

ОСОБЕННОСТИ ВЫРАЩИВАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НИТРИДОВ

© Халтанов Василий Эдуардович

студент,

Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова

Россия, 670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а

gangsterman318@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены условия выращивания тонких пленок нитридов (TiN, Si₃N₄ и AlN) ионно-лучевым методом получения слоев, что предполагает наличие трех этапов: распыление мишени ионами химически активного компонента или его смеси с инертным газом; перенос распыленных частиц на поверхность подложки; формирование тонкой пленки на поверхности подложки. Проведено моделирование первого этапа роста нитридных пленок по теории Зигмунда с использованием математической программы MathCad. Осуществлены расчеты коэффициентов распыления мишеней Ti, Si и Al пучками ионов Ar⁺ и N₂⁺, а также смесью газов Ar⁺ и N₂⁺ различного состава в интервале энергий распыляющих ионов от 1 до 10 кэВ. Результаты расчетов позволили предложить оптимальные режимы выращивания покрытий.

Ключевые слова: моделирование, тонкие пленки, нитриды, ионные пучки, распыление.

Для цитирования

Халтанов В. Э. Особенности выращивания тонкопленочных покрытий на основе нитридов // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2024. Вып. 3. С. 41–47.

Введение

Интерес к нитридам обусловлен их уникальными физико-химическими свойствами. Нитридные покрытия обладают повышенной химической инертностью, высокой твердостью, тугоплавкостью, прочностью, пластичностью, износостойкостью, термической стабильностью, превосходными механическими свойствами. Тонкопленочные защитные покрытия на основе нитридов титана, кремния и алюминия являются материалами с высокими эксплуатационными характеристиками, что предопределило их широкий спектр применения в различных областях техники и технологий.

Среди различных методов получения нитридных слоев перспективной технологией является ионно-лучевой метод [1]. Данная технология примечательна тем, что область горения тлеющего разряда и рабочая камера, где происходит рост слоев, отделены друг от друга, что обеспечивает чистоту эксперимента. Также возможен контроль важных ростовых параметров.

Результаты и обсуждение

В работе рассмотрено распыление мишеней Ti, Si и Al пучками ионов Ar⁺ и N₂⁺, а также смесью газов Ar⁺ и N₂⁺ различного состава в интервале энергий рас-

пыляющих ионов от 1 до 10 кэВ. В расчетах по теории Зигмунда [2] была использована математическая программа MathCad.

Проведено исследование первого этапа роста нитридных пленок по теории Зигмунда, а именно распыление поверхности мишеней при бомбардировке потоками ионов. На рис. 1 изображено распыление мишени потоками ионов.

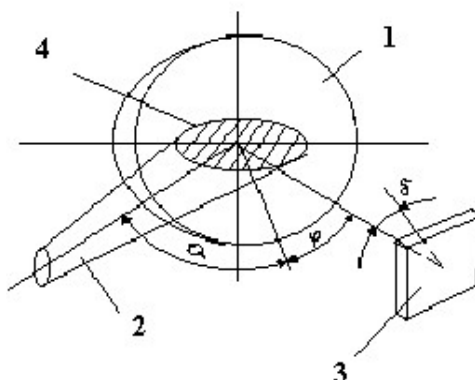


Рис. 1. Распыление мишени потоком ионов: 1 — мишень; 2 — пучок ионов; 3 — подложка; 4 — след ионного пучка на поверхности мишени

В теории Зигмунда [2] рассматривается распыление поверхности мишени как процесс, происходящий в приповерхностных слоях, характеризующийся атомными столкновениями. Был введен коэффициент распыления S — количество атомов мишени, выбитых одним распыляющим ионом. На значение S влияют многие факторы: характеристики разряда, энергии частиц, кристаллическая решетка, рельеф поверхности, углы падения ионов. Оптимальными являются углы падения от 60° до 70° . Коэффициент распыления S изменяется от угла падения ионов по формуле:

$$S(\alpha) = S(0^\circ) / \cos \alpha. \quad (1)$$

S прямо пропорционально зависит от энергии ионов. Коэффициенты распыления рассчитывались из соотношения:

$$S = 0,042 \cdot \alpha \cdot S_n(E) / U_0, \quad (2)$$

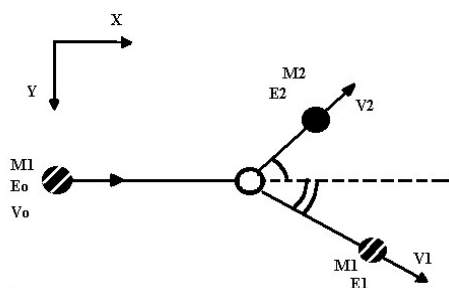


Рис. 2. Упругое соударение двух частиц

где U_0 — энергия связи атома; α -фактор — функция отношения M/m (M — масса иона, m — масса атома); $S_n(E)$ — энергия упругого торможения; $S_n(E) = 4 \cdot \pi \cdot Z \cdot z \cdot e^2 \cdot a \cdot S_n(\varphi) \cdot m / (m+M)$; (Z — заряд ядра иона, z — заряд ядра атома мишени); $a = 0,885 \cdot r \cdot (Z^{2/3} + z^{2/3})^{-1/2}$, r — боровский радиус; $S_n(\varphi)$ — функция от φ .

На рис. 2 показано упругое соударение налетающей частицы 1 и покоящейся 2.

Были осуществлены расчеты коэффициентов распыления мишеней Ti, Si и Al при бомбардировке ионами Ar^+ и N_2^+ , а также смесью ионов Ar^+ и N_2^+ в разных концентрациях при энергиях ионов от 1 до 10 кэВ.

На рис. 3 представлены зависимости коэффициентов распыления титановой мишени пучками ионов аргона и азота.

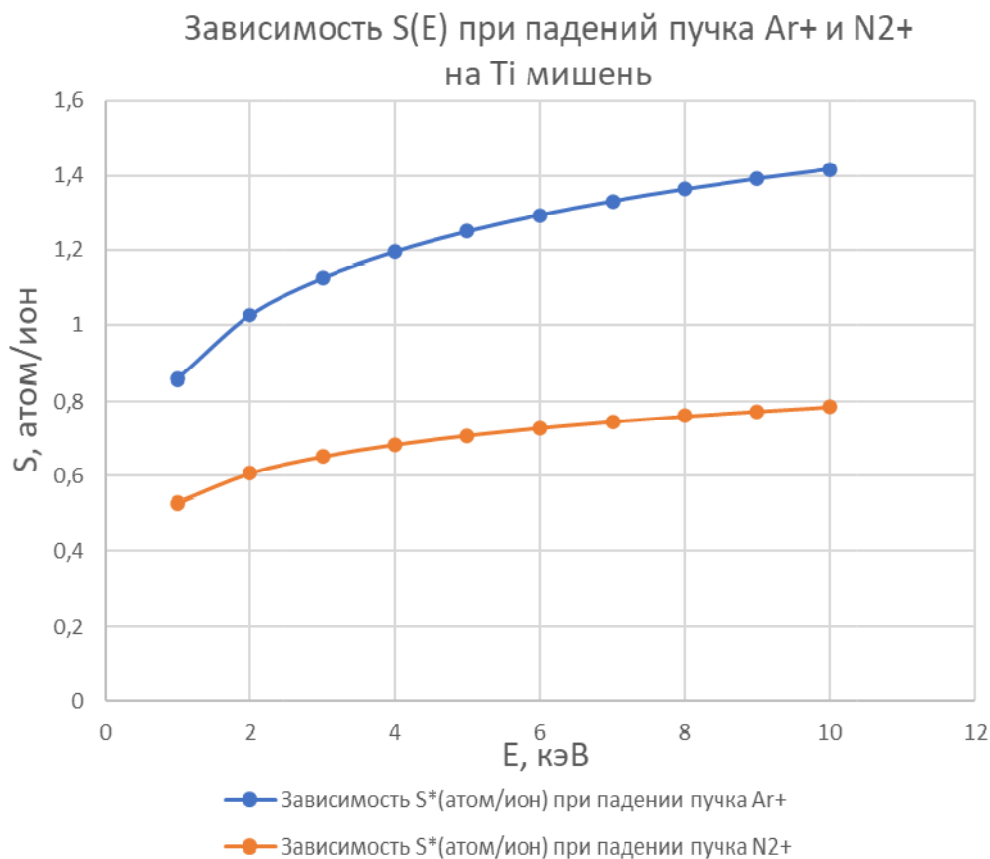


Рис. 3. Зависимость коэффициентов распыления S титановой (Ti) мишени под воздействием пучков ионов аргона (Ar^+) и азота (N_2^+) в диапазоне энергий от 1 до 10 кэВ

Анализ зависимостей $S(E)$ показывает, что коэффициенты распыления мишени ионами аргона значительно превышают коэффициенты распыления ионами азота. Это объясняется тем, что молекулы аргона тяжелее по сравнению с молекулами азота. Конечно, возможна технология получения пленок нитрида титана путем распыления титановой мишени пучком ионов аргона с последующим осаждением азота на поверхность подложки, где и произойдет формирование покрытия TiN.

Но наиболее целесообразным представляется облучение титановой мишени пучком ионов, состоящим из смеси газов Ar^+ и N_2^+ , а также определить оптимальные их соотношения. В связи с этим были проведены расчеты коэффициен-

тов распыления титана при различных концентрациях ионов: 50% Ar^+ и 50% N_2^+ ; 75% Ar^+ и 25% N_2^+ ; 95% Ar^+ и 5% N_2^+ (рис. 4).

Расчеты коэффициентов распыления титана при распылении потоком ионов смеси разных составов показывают, что наиболее эффективным является использование смеси 95% Ar^+ и 5% N_2^+ . А этого количества распыленных молекул титана и азота достаточно для формирования на подложке тонкой пленки нитрида титана согласно реакции: $2\text{Ti} + \text{N}_2 = 2\text{TiN}$.

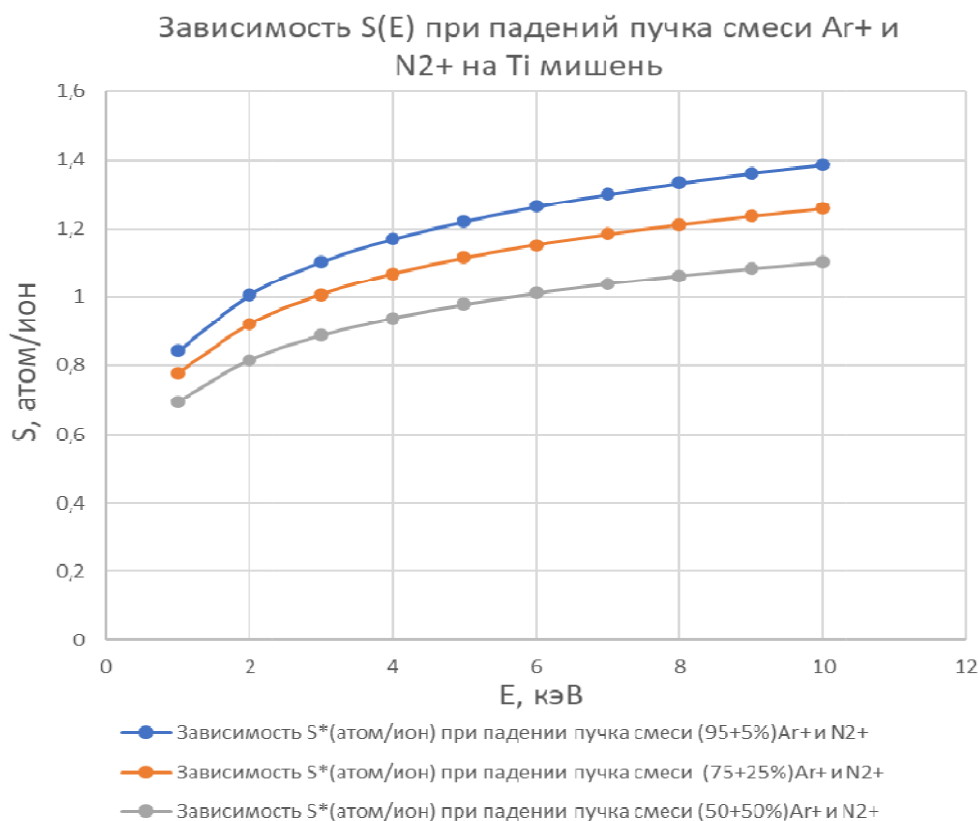


Рис. 4. Зависимость коэффициентов распыления S титановой (Ti) мишени под воздействием пучков ионов различных смесей газов аргона (Ar^+) и азота (N_2^+) в диапазоне энергий от 1 до 10 кэВ

Осуществлены расчеты для распыления Si -мишеней. На рис. 5 показаны зависимости коэффициентов распыления Si -мишени пучками ионов аргона Ar^+ и азота N_2^+ ; на рис. 6 показаны зависимости коэффициентов распыления Si -мишени при бомбардировке потоками ионов аргона и азота различных концентраций. Анализ результатов расчетов показывает, что также достаточно использовать минимальное содержание азота в газовой смеси (5%) для получения максимальных коэффициентов распыления титана для осуществления на подложке химической реакции: $3\text{Si} + 2\text{N}_2 = \text{Si}_3\text{N}_4$.

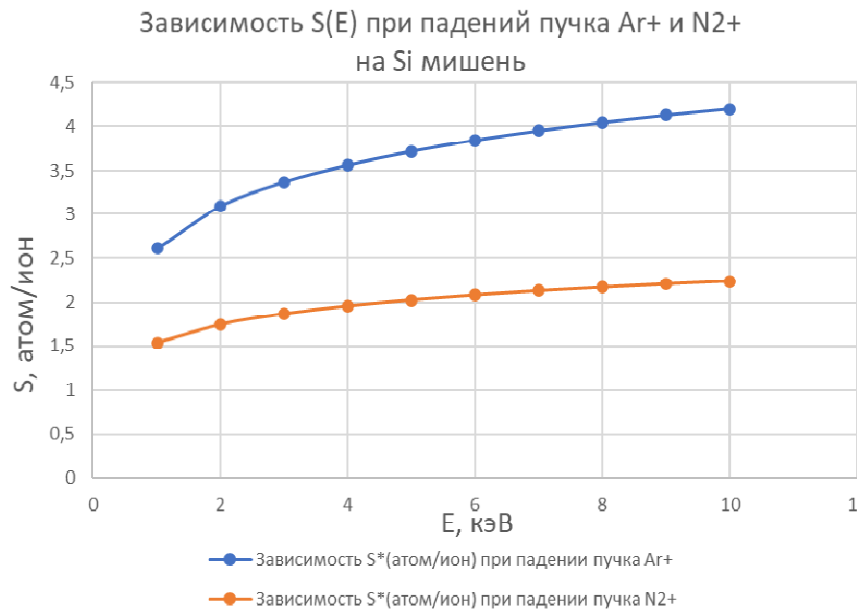


Рис. 5. Зависимость коэффициентов распыления S кремниевой (Si) мишени под воздействием пучков ионов аргона (Ar^+) и азота (N_2^+) в диапазоне энергий от 1 до 10 кэВ

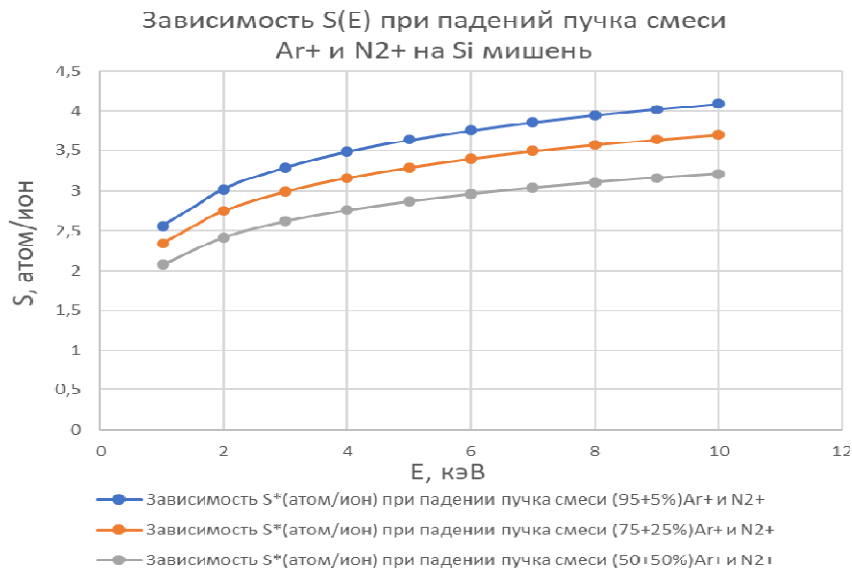


Рис. 6. Зависимость коэффициентов распыления S кремниевой (Si) мишени под воздействием пучков ионов различных смесей газов аргона (Ar^+) и азота (N_2^+) в диапазоне энергий от 1 до 10 кэВ

Были осуществлены расчеты для распыления мишеней из алюминия, которые подтвердили расчеты, полученные при распылении титана и кремния. На рис. 7 показаны зависимости коэффициентов распыления Al-мишени потоками ионов

аргона и азота, а на рис. 8 — зависимости коэффициентов распыления Al-мишени при бомбардировке потоками ионов аргона и азота различных концентраций. Наиболее предпочтительным является минимальное содержание азота в газовой смеси (5%) для получения максимальных коэффициентов распыления алюминия для осуществления на подложке химической реакции: $2Al + N_2 = 2AlN$.

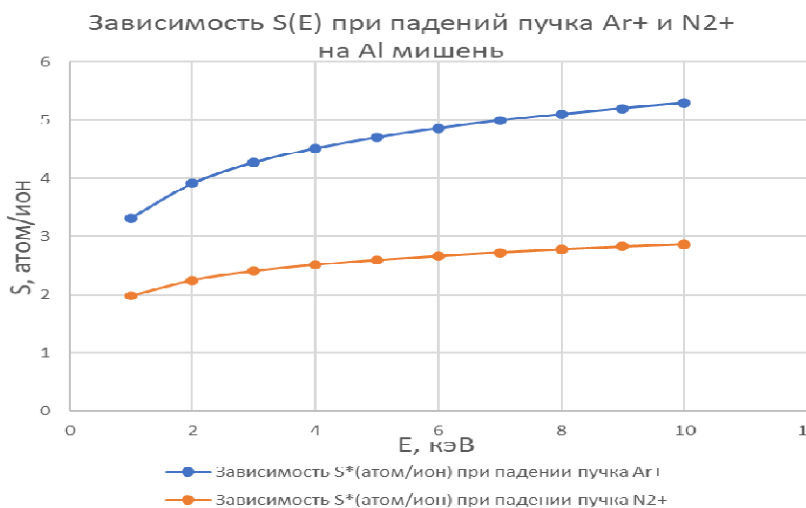


Рис. 7. Зависимость коэффициентов распыления S титановой (Ti) мишени под воздействием пучков ионов аргона (Ar^+) и азота (N_2^+) в диапазоне энергий от 1 до 10 кэВ

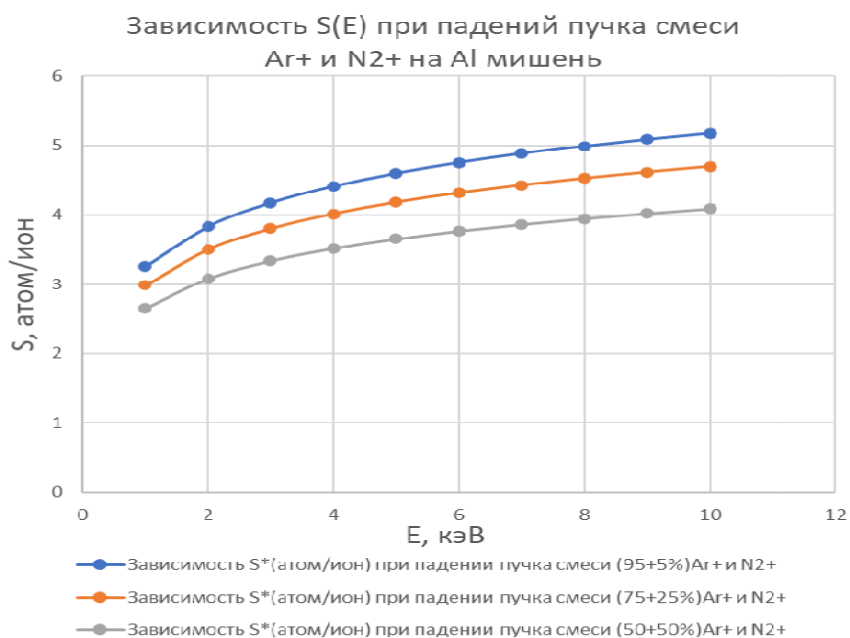


Рис. 8. Зависимость коэффициентов распыления S титановой (Ti) мишени под воздействием пучков ионов различных смесей газов аргона (Ar^+) и азота (N_2^+) в диапазоне энергий от 1 до 10 кэВ

Таким образом, проведенное моделирование особенностей выращивания тонкопленочных покрытий на основе нитридов титана, кремния и алюминия (TiN, Si₃N₄, AlN) показывает, что для улучшения ростовых процессов нитридных слоев целесообразно использование смеси газов Ar⁺ и N₂⁺, причем оптимальным является минимальное содержание азота в газовой смеси (5%). Полученные теоретические расчетные данные хорошо коррелируют с экспериментальными результатами [3].

Литература

1. Семенов А. П. Пучки распыляющих ионов: получение и применение. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1999. 207 с. Текст: непосредственный.
2. Sigmund P. Theory of Sputtering. *Phys. Rev.* 1969; 184(2): 383–416.
3. Belyanin A. F., Semenov A. P., Haltanova V. M. AlN thin film deposition by ion beam sputtering. *Diamond and Diamond-Like Film Applications*. Lancaster-Basell, USA. 1998: 388–402.

Статья поступила в редакцию 27.09.2024; одобрена после рецензирования 23.10.2024; принята к публикации 28.10.2024.

FEATURES OF GROWING THIN FILM NITRIDE-BASED COATINGS

Vasily E. Khaltanov

Student,

Dorzhi Banzarov Buryat State University

24a Smolina St., Ulan-Ude 670000, Russia

gangsterman318@gmail.com

Abstract. The article considers the conditions for growing thin films of nitrides (TiN, Si₃N₄ and AlN) by ion-beam sputtering. The ion-beam method for obtaining layers involves three stages: sputtering of the target with ions of a chemically active component or its mixture with an inert gas; transfer of sputtered particles to the substrate surface; formation of a thin film on the substrate surface. Using the MathCad mathematical program we have simulated the first stage of nitride film growth according to Sigmund's theory. We have calculated the sputtering coefficients of Ti, Si and Al targets by beams of Ar⁺ and N₂⁺ ions, as well as by a mixture of Ar⁺ and N₂⁺ gases of various compositions in the range of sputtering ion energies from 1 keV to 10 keV. The calculation results allowed us to propose optimal coating growth modes.

Keywords: simulation, thin films, nitrides, ion beams, sputtering.

For citation

Khaltanov V. E. Features of Growing Thin Film Nitride-Based Coatings. *Bulletin of Buryat State University. Chemistry. Physics.* 2024; 3: 41–47 (In Russ.).

The article was submitted 27.09.2024; approved after reviewing 23.10.2024; accepted for publication 28.10.2024.