

PACS numbers: 34.50.-s, 41.20.Gz, 52.25.Tx, 52.77.Dq, 81.15.Cd, 84.40.Fe, 85.70.Ay

Осаждение двухкомпонентного состава, содержащего магнитный материал, при помощи магнетронной распылительной системы

О. М. Бевза, С. Б. Сидоренко, А. В. Мумладзе

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,
просп. Победы, 37,
03056 Киев, Украина*

При разработке магнетронной распылительной системы для осаждения двухкомпонентной плёнки заданного состава с одного источника, где один из компонентов — магнитный материал, необходимо решить ряд задач: разработать конструкцию магнетрона, которая позволит решить проблему шунтирования магнитного поля материалом мишени; обеспечить необходимое соотношение материалов в осаждаемой плёнке. В работе проанализированы способы решения проблемы шунтирования магнитного поля материалом мишени. Разработана конструкция магнетронной распылительной системы, которая позволяет распылять одновременно магнитный и немагнитный материалы. Разработан простой метод определения соотношения материалов в осаждаемой плёнке при осаждении их с одной магнетронной распылительной системы. Представлены результаты моделирования и экспериментального исследования разработанной магнетронной распылительной системы.

При розробці магнетронної розпоршувальної системи для осадження двокомпонентної плівки заданого складу з одного джерела, де один з компонентів — магнетний матеріал, необхідно вирішити ряд завдань: розробити конструкцію магнетрона, яка уможливить розв'язати проблему шунтування магнетного поля матеріалом мішені; забезпечити необхідне співвідношення матеріалів у плівці, що осаджується. В роботі проаналізовано способи розв'язання проблеми шунтування магнетного поля матеріалом мішені. Розроблено конструкцію магнетронної розпоршувальної системи, яка уможливорює розпоршувати одночасно магнетний і немагнетний матеріали. Розроблено просту методу визначення співвідношення матеріалів у плівці, що осаджується, при їх осадженні з однієї магнетронної розпоршувальної системи. Представлено результати моделювання й експериментального дослідження розробленої магнетронної розпоршувальної системи.

To create a two-component magnetron sputtering system, where one component of it is a magnetic material, it is necessary to solve the following tasks: to develop the design of the magnetron sputtering system with shunted magnetic field lines by the target material; to provide the necessary ratio of materials in the deposited film. This paper analyses the ways to solve a problem of shunting the magnetic field lines by the target material. A design of the magnetron sputtering system, which allows sputtering the magnetic and nonmagnetic materials, is developed. A simple determination method for the ratio of materials in the deposited film is suggested. The simulation results and experimental research of developed magnetron sputtering system are presented.

Ключевые слова: шунтирование магнитного поля, магнетронная распылительная система, зона эрозии, алюминид.

Ключові слова: шунтування магнетного поля, магнетронна розпорошувальна система, зона ерозії, алюмінід.

Key words: shunting the magnetic field lines, magnetron sputtering system, erosion zone, aluminide.

(Получено 1 декабря 2016 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных материалов, применяемых в авиа- и ракетостроении и других высокотехнологичных областях науки и техники являются интерметаллиды на основе алюминия и никеля. Данные соединения имеют высокие коррозионную устойчивость и износостойкость, а также относительно высокую твердость и низкую плотность. Особую ценность эти соединения представляют для изделий, предназначенных для эксплуатации при повышенных температурах, так как у некоторых из них предел текучести не уменьшается, как у большинства металлов и сплавов.

В то же время свойства алюминида сильно зависят от его структуры и состава. Так, поликристаллический алюминид никеля Ni_3Al , в отличие от монокристаллического, имеет низкую пластичность, а также низкую стойкость к образованию трещин при комнатных температурах.

Для изучения влияния состава алюминида на его структуру и свойства необходимо было обеспечить осаждение двухкомпонентного состава из одного магнетронного источника. Осаждение алюминия из магнетронной распылительной системы (МРС) является ординарной задачей, в отличие от осаждения никеля, который является магнитным материалом. Мишень из такого материала шунтирует магнитное поле, что делает невозможным распыление мишени.

2. РАСПЫЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОМОЩИ МРС

Для решения подобных задач существует несколько способов. Так для эффективного распыления мишени из магнитного материала толщиной до 10 мм, используют магнетроны с комбинированной магнитной системой. Для увеличения магнитного потока под мишенью по оси основного магнитного блока размещают центральный магнит и дополнительный магнитный блок, имеющий наклонный вектор намагниченности (рис. 1). Подобного рода мощные магнитные системы насыщают материал мишеней из магнитного материала магнитным потоком и создают магнитное поле необходимой индукции для поддержания разряда над распыляемой поверхностью. Однако встраивание дополнительного магнитного поля существенно усложняет конструкцию магнетрона и систему охлаждения, не позволяя распылять мишени толщиной более 10 мм. [1]. Для повышения эффективности распыления мишеней с большим запасом магнитного материала создают более мощное магнитное поле над их распыляемой поверхностью за счёт уменьшения шунтирующего действия материала мишени на магнитный поток. Для этого в зоне эрозии мишени выполняют сквозные прорезы (щели), перпендикулярные к направлению шунтирующего магнитного потока (рис. 2).

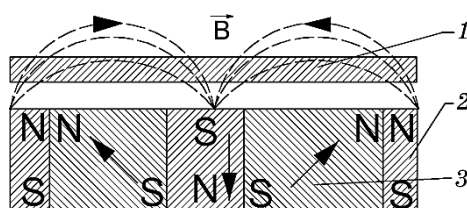


Рис. 1. Катодный узел и магнитная система для распыления магнитных материалов с тонкослойной мишенью. 1 — мишень; 2 — основной магнитный блок; 3 — дополнительный магнитный блок [1].¹

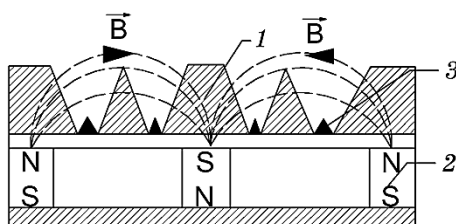


Рис. 2. Катодный узел и магнитная система для распыления магнитных материалов с увеличенным запасом материала мишени. 1 — мишень; 2 — основной магнитный блок; 3 — треугольные керамические вкладыши [2].²

Однако конструкция многощелевой мишени имеет ряд недостатков: 1) узкие щели в мишени требуют сложной механической обработки; 2) необходимо надёжное припаивание плоских четырёхугольных рамок из материала мишени к охлаждаемому катоду; 3) керамические вкладыши на дне щели со временем покрываются распыляемым магнитным материалом, что приводит к шунтированию магнитного потока.

Для того чтобы исключить загрязнение плёнок за счёт частичного распыления керамической пластины, зону её прямой видимости перекрывают частью распыляемой мишени (рис. 3). Плазма разряда генерируется у открытой поверхности диэлектрического кольца, где магнитная индукция наибольшая. Такую конструкцию магнетрона можно применять для распыления магнитных и немагнитных мишеней большой толщины, причём часть мишени, расположенная на внешнем полюсном наконечнике,

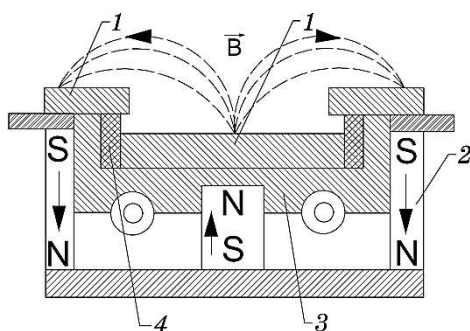


Рис. 3. Катодный узел и магнитная система для распыления магнитных материалов с одной щелью между мишенями. 1 — мишень; 2 — основной магнитный блок; 3 — водоохлаждаемый корпус; 4 — диэлектрическое кольцо из керамики [2].³

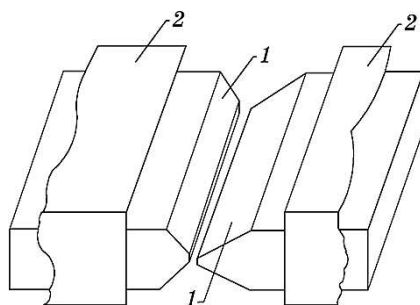


Рис. 4. Катодный узел и магнитная система для распыления магнитных материалов с двусторонним распылением мишени. 1 — мишень; 2 — экран [2].⁴

может состоять из нескольких секторов, которые перемещаются к центру по мере их распыления.

На рисунке 4 приведена схема магнетрона с мишенью, состоящей из двух плоских частей с симметричными скосами, между которыми имеется щель. Каждая часть мишени соединена с противоположным полюсом магнитной системы и закрыта экраном (кроме скошенных частей), находящимся под потенциалом анода. Линейное расположение частей мишени позволяет автоматически перемещать их по направлению к щели по мере распыления, сохраняя при этом прежние размеры щели. Благодаря этому ВАХ разряда в процессе распыления мишени не изменяется.

Для распыления магнитных материалов успешно используют мишени, которые одновременно являются магнитопроводом магнитной системы. На рисунке 5 приведена схема магнетрона, в котором магнитный блок создан на основе радиальных постоянных магнитов [2]. Конструкция катодного узла, приведённая на рис. 6, минимизирует магнитное шунтирование межэлектродного промежутка.

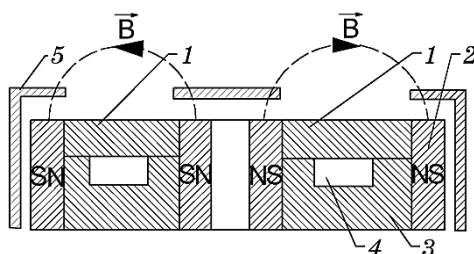


Рис. 5. Катодный узел и магнитная система для распыления магнитных материалов с мишенью, являющейся частью магнитопровода. 1 — мишень; 2 — основной магнитный блок; 3 — магнитопровод; 4 — полость для подачи воды; 5 — экран [2].⁵

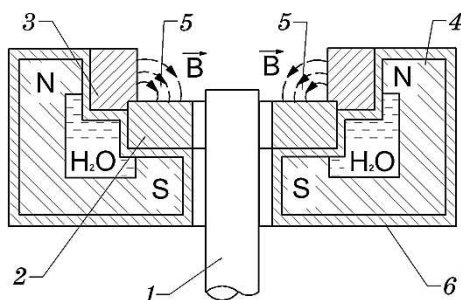


Рис. 6. Катодный узел и магнитная система для распыления магнитных материалов с мишенью, являющейся частью магнитопровода. 1 — анод; 2 — нижний концевик; 3 — верхний концевик; 4 — постоянный магнит; 5 — разрядный промежуток; 6 — герметичная оболочка [3].⁶

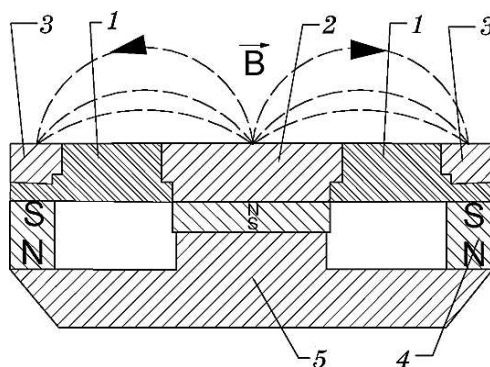


Рис. 7. Катодный узел и магнитная система для совместного распыления магнитного и немагнитного материалов. 1 — мишень из немагнитного материала; 2 — центральный полюсный наконечник из распыляемого магнитного материала; 3 — боковой полюсный наконечник из распыляемого магнитного материала; 4 — основной магнитный блок; 5 — нижний магнитопровод.⁷

ка, ступенчатая форма катода-мишени приводит к образованию большого магнитного поля рассеивания в разрядном промежутке [3].

Также для распыления магнитных материалов можно использовать предварительный нагрев и поддержание их температуры выше точки Кюри на 10–15°C в процессе распыления, что приводит к полной потере мишенью своих магнитных свойств.

Чтобы обеспечить осаждение двухкомпонентного состава, состоящего из магнитного (Ni) и немагнитного (Al) материалов, за основу была взята конструкция, приведённая на рис. 3. Для обеспечения распыления немагнитного материала, из которого изготовлено кольцо 4, были внесены некоторые изменения в вышеприведённую конструкцию. Керамическое кольцо было заменено алюминиевой вставкой, а внешняя часть мишени из магнитного материала установлена так, чтобы обеспечить распыление алюминиевой части мишени (рис. 7).

3. РАСЧЁТ СООТНОШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В ОСАЖДАЕМОЙ ПЛЁНКЕ

На данный момент существует несколько способов моделирования зоны эрозии. В самых простых из них рассчитывается положение силовых линий магнитного поля над поверхностью мишени. Область максимальной эрозии определяют или областью, где силовые линии параллельны поверхности, — эта область обычно меньше реальной зоны эрозии, или границей, где силовые линии магнитного поля перпендикулярны поверхности мишени, что иногда суще-

ственно больше реальной зоны эрозии [4, 5]. Она также может быть определена как проекция области ионизации рабочего газа [6, 7], для вычисления которой может применяться метод моделирования движения частиц Монте-Карло [8]. Данный метод базируется на математическом моделировании движения отдельных частиц. Точность метода зависит от числа рассчитанных траекторий, — чем больше траекторий, тем точнее модель. Поэтому для получения достаточно точных моделей требуются большие вычислительные мощности и значительные затраты времени.

В данной статье предложен простой метод, который позволяет определить соотношение материалов в осаждённой плёнке при распылении мишени магнетрона и полюсных наконечников, изготовленных из магнитного материала с погрешностью не более 20%. Он позволяет достаточно быстро провести вычисления границы зоны эрозии и соответственно подбор геометрических размеров мишени и полюсных наконечников для получения необходимого соотношения материалов в осаждаемой плёнке.

Для различных конструкций планарных магнетронов высота области скрещённых электрического и магнитного полей обычно располагается на высоте 5–10 мм над поверхностью мишени [9]. Было предположено, что зона эрозии мишени является проекцией на плоскость мишени области, где отношение тангенциальной составляющей (B_x) к нормальной составляющей (B_y) магнитного поля на этой высоте больше или равно 1.

При выполнении опытно-конструкторских работ были изготовлены 3 комплекта полюсных наконечников и мишеней магнетрона, имеющих различные соотношения их геометрических размеров. Размеры мишеней и полюсных наконечников приведены в табл. 1.

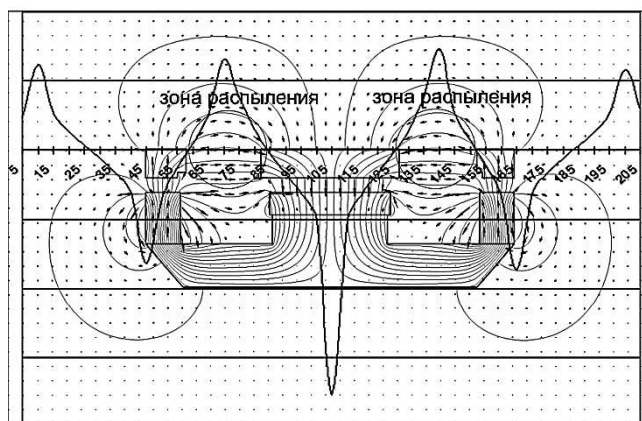


Рис. 8. Зона распыления в магнетроне с комплектом полюсных наконечников и мишени №1.⁸

ТАБЛИЦА 1. Размеры полюсных наконечников.⁹

	Магнетрон 1		Магнетрон 2		Магнетрон 3	
	Внешний размер	Внутренний размер	Внешний размер	Внутренний размер	Внешний размер	Внутренний размер
Размер распыляемой области мишени, мм	100×66	48×20	76×52	48×20	76×52	56×32
Размер прижима (центрального полюсного наконечника), мм	48×20		48×20		56×32	
Размер обоймы (крайнего полюсного наконечника), мм	132×98	100×66	132×98	76×52	132×98	76×52

В пакете ELCUT были рассчитано распределение магнитного поля для магнетрона с этими комплектами полюсных наконечников и мишеней.

Используя результаты расчётов и исходя из условия $B_x / B_y \geq 1$ на высоте 5–10 мм от поверхности мишени, были определены границы зоны распыления для этих магнетронов. На рисунках 8–10 приведены результаты расчётов магнитного поля для 3-х комплектов полюсных наконечников и мишеней, а также результаты расчётов границы зоны распыления для выполнения вышеприведённого условия на высоте 10 мм.

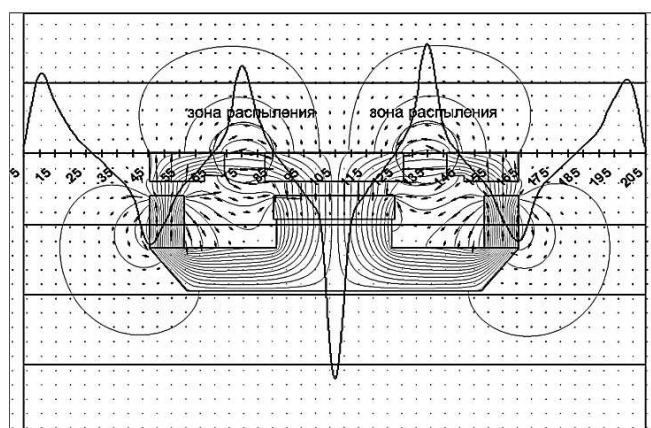


Рис. 9. Зона распыления в магнетроне с комплектом полюсных наконечников и мишени №2.¹⁰

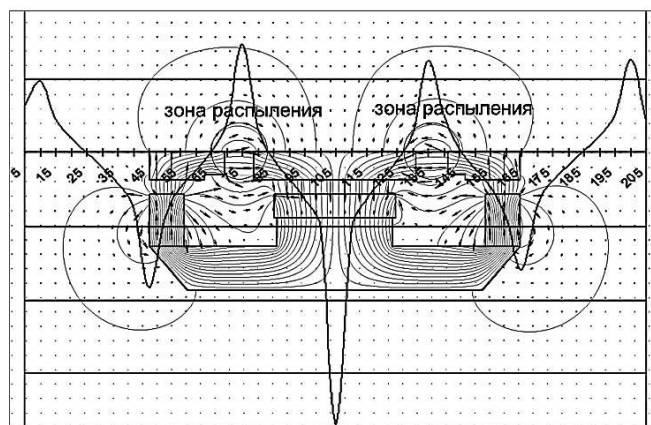


Рис. 10. Зона распыления в магнетроне с комплектом полюсных наконечников и мишени №3.¹¹

Для определения соотношения количества Ni и Al в осаждённой плёнке использовалась формула

$$\frac{N(\text{Al})}{N(\text{Ni})} = \frac{S(\text{Al}) \cdot k(\text{Al})}{S(\text{Ni}) \cdot k(\text{Ni})},$$

де $S(\text{Al})$ и $S(\text{Ni})$ — площади распыления Al и Ni соответственно, $k(\text{Al})$ и $k(\text{Ni})$ — коэффициенты распыления для Al и Ni соответственно. Для энергий ионов характерных для магнетронного распыления 600 эВ, $k(\text{Al})$ был принят равным 1,2, а $k(\text{Ni}) = 1,5$ [10].

Используя данные полученные из рассчитанных моделей, было определено соотношение Al и Ni в осаждённой плёнке. Результаты расчётов приведены в табл. 2.

Для экспериментальной проверки теоретических расчётов были проведены напыление образцов с использованием наконечников и мишеней магнетрона трёх типов.

Эксперимент проводился при следующих параметрах: ток разряда — 3 А, давление Ar в камере 0,61 Па — для первого и второго типа и 0,76 Па для третьего типа, что обусловлено большим шунтированием магнитного поля в третьем типе полюсного наконечника в сравнении с первыми двумя типами полюсных наконечников, ситалловая подложка с размерами 48×60 мм² находилась на расстоянии 80 мм от мишени напротив её центра и располагалась параллельно её поверхности, время напыления составило 5 мин.

В таблице 3 приведены результаты анализов полученных плёнок.

Анализ полученных результатов показывает, что предложен-

ТАБЛИЦА 2. Соотношение Ni и Al в расчётных моделях магнетронов 1–3.¹²

Модель	Al, ат. %	Ni, ат. %
1-й тип	91,4–98,8	8,60–1,2
2-й тип	49,3–71,7	50,7–28,3
3-й тип	34,5–55,2	65,5–44,8

ТАБЛИЦА 3. Соотношение Ni и Al в экспериментальных плёнках при распылении магнетронов с комплектом полюсных наконечников 1–3.¹³

Модель	Al, ат. %	Ni, ат. %
1-й тип	96,9–98,6	3,1–1,4
2-й тип	56,5–58,8	41,3–43,5
3-й тип	48,5–49,7	51,5–50,3

ный метод позволяет с погрешностью не более 20% определять границу зоны распыления мишени магнетрона и соответственно соотношение материалов в осаждённой плёнке при распылении комбинированной мишени.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была разработана конструкция МРС, которая позволяет одновременное распыление немагнитного материала, с которого изготовлена мишень магнетрона (Al), а также магнитного материала (Ni), с которого изготовлены распыляемые магнитные полюсные наконечники.

Для определения геометрических размеров распыляемых элементов конструкции магнетрона (мишень и магнитные полюсные наконечники) был разработан простой метод определения соотношения материалов в осаждаемой плёнке при их распылении. Метод базируется на качественном определении зоны распыления. Её можно определить, рассчитав распределение магнитного поля и определив область, где соотношение $B_x/B_y \geq 1$ на высоте 5–10 мм над поверхностью мишени.

Для практической проверки результатов моделирования было изготовлено и проверено в работе три экспериментальных комплекта мишень–магнитные полюсные наконечники.

В результате проведённых исследований установлено, что предложенный метод обеспечивает прогнозирование состава осаждённой плёнки при распылении мишени и магнитных полюсных наконечников, с погрешностью не более 20%, что позволяет использовать данный метод для подбора геометрических размеров мишени и полюсных наконечников для получения необходимого соотношения материалов в осаждаемой плёнке.

Всё это позволило разработать и изготовить МРС для изучения влияния состава алюминидов на их структуру и свойства, минимизировав затраты времени и материалов на его изготовление.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА—REFERENCES

1. V. E. Minaichev, V. V. Odinkov, D. D. Spivakov, and G. P. Tyufaeva, *Obzory po Elektronnoy Tekhnike. Ser. 7.M. CNII 'Elektronika'*, No. 14: 1138 (1985) (in Russian); В. Е. Минайчев, В. В. Одинокоев, Д. Д. Спиваков, Г. П. Тюфаева, *Обзоры по электронной технике. Сер. 7.М. ЦНИИ «Электроника»*, вып. 14: 1138 (1985).
2. B. S. Danilin, *Primenenie Nizkotemperaturnoy Plazmy dlya Naneseniya Tonkikh Plyonok* (Moscow: Energoatomizdat: 1989) (in Russian); Б. С. Данилин, *Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок* (Москва: Энергоатомиздат: 1989).

3. A. I. Kuz'michev and V. I. Lobanov, *Ustroistvo dlja Raspyleniya Magnitnykh Materialov v Vvakuume* (Patent 1707994 A1 SSSR, zayavl. 14.02.90; Zayavitel' i patentoobladatel' — Kievskiy politekhnicheskii institut im. 50-letiya Velikoi Oktyabr'skoi sotsialisticheskoi revolyutsii) (in Russian); A. И. Кузьмичев, В. И. Лобанов, *Устройство для распыления магнитных материалов в вакууме* (Пат. 1707994 А1 СССР, заявл. 14.02.90; заявитель и патентообладатель — Киевский политехнический институт им. 50-летия Великой Октябрьской социалистической революции).
4. R. Stelter et al., *Proceedings of the Annual Technical Conference—Society of Vacuum Coaters 2004. Conf. 47* (2004), p. 418.
5. S. Powell, *CAD for Electromagnetic Devices. One-Day Seminar* (2006), p. 1.
6. C. Feist, A. Plankensteiner, and J. Winkler, *Excerpt from the Proceedings of the 2013 COMSOL Conference in Rotterdam* (Rotterdam: 2013), p. 1.
7. *Sputter Target Erosion and Its Effects on Long Duration DC Magnetron Sputter Coating: A Thesis Submitted in Partial Satisfaction of the Requirements for the Degree of Master of Science in Engineering Sciences (Mechanical Engineering)* (Michael Elliot Schoff.: 2009).
8. I. Kolev and A. Bogaerts, *IEEE Transactions on Plasma Science*, **34**, No. 3: 866 (2006).
9. A. I. Kuz'michev, *Magnetronnyye Raspylitel'nyye Sistemy* (Kiev: Avers: 2008) (in Russian); A. И. Кузьмичев, *Магнетронные распылительные системы* (Киев: Аверс: 2008).
10. N. Matsunami, Y. Yamamura et al., *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, **31**: 1 (1984).

*National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute',
Peremogy Ave., 37,
UA-03056 Kyiv, Ukraine*

¹ Fig. 1. The cathode assembly and the magnetic system for sputtering a magnetic-material thin-layer target. 1—target; 2—main magnet block; 3—additional magnetic block [1].

² Fig. 2. The cathode assembly and the magnetic system for sputtering magnetic materials with an increased reserve of the target material. 1—target; 2—main magnet block; 3—ceramic triangle inserts [2].

³ Fig. 3. The cathode assembly and the magnetic system for sputtering magnetic materials with a gap between the targets. 1—target; 2—main magnet block; 3—water-cooled case; 4—dielectric ceramic ring [2].

⁴ Fig. 4. The cathode assembly and the magnetic system for sputtering magnetic materials with double-sided target sputtering. 1—target; 2—shield [2].

⁵ Fig. 5. The cathode assembly and the magnetic system for sputtering magnetic materials with a target, which is part of the magnetic circuit. 1—target; 2—main magnet block; 3—magnetic circuit; 4—hollow for the water supply; 5—shield [2].

⁶ Fig. 6. The cathode assembly and the magnetic system for sputtering magnetic materials with a target, which is part of the magnetic circuit. 1—anode; 2—bottom pole piece; 3—top pole piece; 4—permanent magnet; 5—discharge gap; 6—hermetic shell [3].

⁷ Fig. 7. The cathode assembly and the magnetic system for co-sputtering of the magnetic and non-magnetic materials. 1—target of non-magnetic material; 2—central pole piece of magnetic sputtering material; 3—side pole piece of magnetic sputtering material; 4—main magnet block; 5—bottom pole piece.

⁸ Fig. 8. The magnetron-sputtering zone with a set target and pole pieces #1.

⁹ TABLE 1. The dimensions of the pole pieces.

¹⁰ Fig. 9. The magnetron-sputtering zone with a set target and pole pieces #2.

¹¹ Fig. 10. The magnetron-sputtering zone with a set target and pole pieces #3.

¹² TABLE 2. The ratio of Ni and Al in the calculated models of magnetrons with a set of pole

pieces 1–3

¹³ **TABLE 3.** The ratio of Ni and Al in experimental films at sputtering magnetrons with a set of pole pieces 1–3.