

К. Э. Уткин, С. И. Торгашин, А. В. Хосhev

УПРАВЛЯЕМЫЙ СИНТЕЗ ТОНКИХ ПЛЕНОК, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

К. E. Utkin, S. I. Torgashin, A. V. Khoshev

CONTROLLED SYNTHESIS OF THIN FILMS OBTAINED BY MAGNETRON SPUTTERING TECHNIQUE

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. В настоящее время интенсивно развивается метод магнетронного распыления, обеспечивающий контролируемое распыление тонких слоев с требуемыми параметрами. При многократном использовании мишени на ней образуется зона эрозии (канавка), непосредственно влияющая на скорость распыления материала (толщину пленки). Уменьшение толщины тонкой пленки приводит к увеличению удельного электрического сопротивления, т.е. к невозможности требуемых характеристик и параметров. Цель работы – напыление тонких пленок требуемых параметров и характеристик с использованием мишени длительного и многократного использования. **Материалы и методы.** Проведено определение зависимости толщины и сопротивления пленки от глубины эрозии мишени. Определена зависимость толщины пленки от времени распыления, исходя из глубины эрозии мишени. **Результаты.** Возможно производить управляемый синтез тонких пленок с заданными электрофизическими параметрами методом магнетронного распыления, улучшить воспроизводимость требуемых параметров при длительном и многократном использовании мишени. **Выводы.** Управляемый синтез тонких пленок, полученных методом магнетронного напыления, позволит получить заданные параметры и характеристики с использованием мишени длительного и многократного использования.

A b s t r a c t. Background. Recently the magnetron sputtering technique providing controlled thin-layers sputtering with the required parameters has been rapidly developing. When a target is used multiple times a zone of erosion (groove) is formed on it having a direct impact on material sputtering rate (film thickness). Reduction of thin film thickness causes the electrical resistivity increase, i.e. non-repeatability of the required response and parameters. The work objective is sputtering of thin films with the required parameters and response by means of long-term or multiple use target. **Materials and methods.** Relation between film thickness and resistance and target erosion depth has been defined. Dependence of film thickness on sputtering time on the basis of target erosion depth has been defined as well. **Results.** It is possible to perform controlled synthesis of thin films with the given physical parameters by magnetron sputtering technique, to improve the required parameters repeatability under long-term and multiple use of a target. **Conclusions.** The controlled synthesis of thin films obtained by magnetron sputtering technique will provide the given parameters and characteristics by means of long-term or multiple use target.

К л ю ч е в ы е с л о в а: металлопленочные датчики давления, синтез тонких пленок, образование канавки при напылении тонких пленок, метод магнетронного распыления, время напыления тонких пленок.

К e y w o r d s: metal-film pressure sensors, thin film synthesis, grooving while thin-film sputtering, magnetron sputtering technique, groove (erosion), target, film thickness, time of thin-film sputtering.

Повышение качества и надежности ракетно-космической, авиационной и другой специальной техники неразрывно связано с совершенствованием датчиков различных физических величин. Рассмотрим чувствительные элементы тонкопленочных датчиков механических величин, которые представляют собой сложные гетерогенные структуры, состоящие из тонких пленок защитных, проводящих, диэлектрических и резистивных материалов. Параметры и характеристики тонких пленок во многом определяют технические характеристики датчиков.

Для напыления тонких пленок проводящих, резистивных и диэлектрических материалов широко используется магнетронное распыление. Данный метод позволяет проводить контролируемое распыление тонких слоев с требуемыми параметрами. В АО «НИИФИ» метод магнетронного распыления применяется для формирования контактных слоев из никеля (Ni) на акселерометрах АЛЕ – 048, АЛЕ – 037, АЛЕ – 055, создания защитного покрытия из ванадия (V) на акселерометрах АЛЕ – 057, напыления диэлектрических и резистивных пленок на чувствительные элементы (ЧЭ) ряда поставочных изделий (Вт 212 А1, Вт 206 Б, ДАВ-084, ДАВ-085, ДАВ-088, ДАВ-089).

Важной характеристикой магнетронной системы является скорость распыления материалов. Она больше там, где линии магнитной индукции параллельны мишени, а линии напряженности электрического поля перпендикулярны мишени. В этом месте происходит наиболее интенсивная бомбардировка мишени ионами аргона, что вызывает образование V-образной канавки. Форма канавки характеризует коэффициент использования материала мишени. При малом коэффициенте использования мишени канавка узкая, увеличивающаяся в глубину после каждого процесса распыления. При достижении глубины канавки, равной толщине мишени, требуется замена мишени. Образование глубокой канавки характерно для мишени никеля [1] (рис. 1).

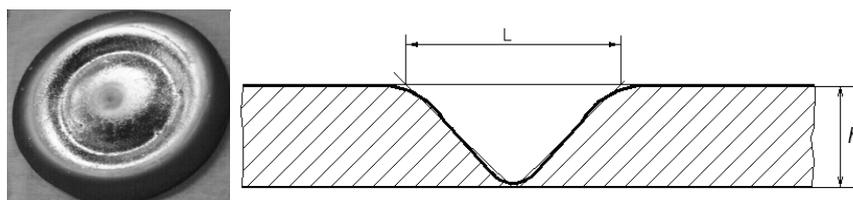


Рис. 1. Вид зоны эрозии мишени никеля:
L – ширина зоны эрозии; h – глубина эрозии

Как показала практика, при многократном использовании мишени глубина эрозии оказывает непосредственное влияние на скорость распыления материала. На рис. 2, а представлена зависимость толщины тонких пленок Ni, полученных с использованием одной и той же мишени за 180 технологических циклов магнетронного распыления, от глубины эрозии мишени. Толщина тонких пленок Ni определялась кварцевыми микровесами (методом пьезоэлектрического микровзвешивания) с погрешностью 0,5 %.

Время распыления материала мишени в каждом цикле составляло 10 мин при токе 1 А.

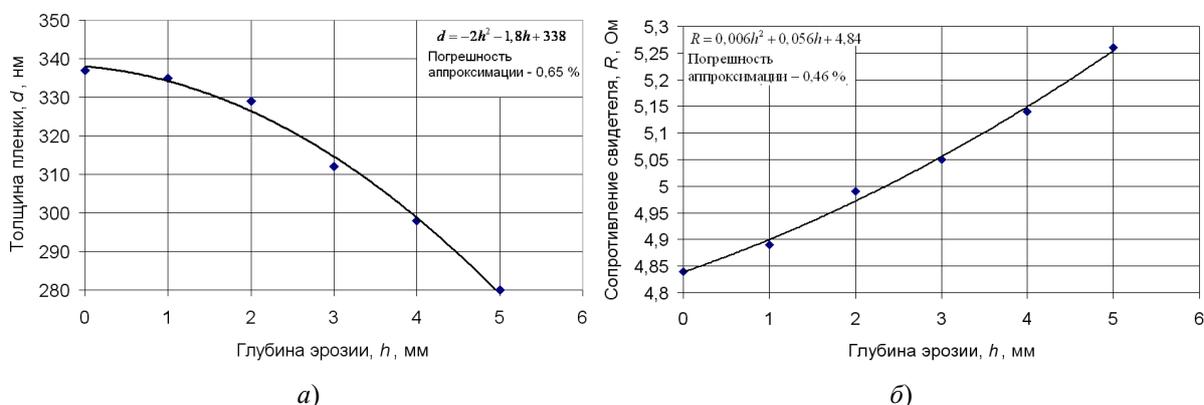


Рис. 2. Зависимость: а – толщины пленки Ni от глубины эрозии мишени;
б – зависимости сопротивления пленки Ni от глубины эрозии мишени;
♦ – эксперимент; – – аппроксимация

Из рис. 2 следует, что с увеличением глубины эрозии на мишени Ni толщина тонких пленок, полученных при одинаковых режимах распыления, уменьшается. Изменение толщины приводит к изменению удельного электрического сопротивления пленок [2, 3]. На рис. 2,б представлена зависимость сопротивлений тонких пленок Ni от глубины эрозии на мишени. Замер сопротивлений проводился по «свидетелям» – ситалловым пластинам, которые крепились на карусель установки магнетронного распыления рядом с подложкой (упругим элементом), на который происходит осаждение материалов. Замер электрического сопротивления свидетеля проводился после процесса напыления с помощью омметра Ф-30. Уменьшение толщины тонкой пленки приводит к увеличению удельного электрического сопротивления.

Из зависимостей, представленных на рис. 2, видно, что увеличение глубины зоны эрозии ведет к изменению параметров тонких пленок. При использовании одной мишени из резистивного материала наблюдается уменьшение толщины пленки, что влияет на изменение электрических параметров тензорезисторов. В случае совместного распыления материалов, входящих в состав тензорезистора, из двух отдельных источников наблюдается избыток одного из материалов и недостаток другого вследствие разных коэффициентов распыления материалов мишеней и, следовательно, разной скорости заглабления канавки.

Изменения параметров тонких пленок объясняются следующим образом: с увеличением глубины эрозии напряженность электрического потенциала плазмы уменьшается. В заглабленных зонах мишени ток магнетронного разряда меньше, так как границы плазмы находятся на уровне самой высокой вдоль магнитной силовой линии точки мишени. В направлении углубления плотность плазмы n быстро убывает, поскольку электроны плазмы замагничены и могут отклоняться от границы на величину ларморовского радиуса [4]:

$$r_L = \frac{m_e V_e}{eB},$$

где m_e – масса электрона; V_e – скорость электрона; e – заряд электрона; B – индукция магнитного поля.

Ионы могут отклоняться на величину радиуса Дебая:

$$r_d = \sqrt{\frac{kT}{4\pi n e^2}},$$

где k – постоянная Больцмана; T – температура плазмы.

Расстояние убывания плотности плазмы может быть оценено как

$$r_0 = r_L + r_d.$$

При достижении глубины эрозии равной r_0 распыление прекращается.

Вследствие ослабления плотности плазмы в заглабленной зоне скорость распыления снижается, что приводит к уменьшению толщины и увеличению сопротивления тонкой пленки. При формировании тонких наноразмерных резистивных пленок с использованием мишени или совместного распыления материалов мишеней из двух отдельных источников изменение скорости распыления ведет к невоспроизводимости параметров тонких пленок.

В табл. 1 показаны изменения (в %) толщин и сопротивлений пленок, полученных при времени напыления 10 мин, при токе 1 А, путем распыления мишени никеля с разным значением глубины эрозии.

Таблица 1

Изменения параметров пленок Ni в зависимости от глубины эрозии

Номер «свидетеля»	1	2	3	4	5	6
Время напыления, сек	600					
Глубина зоны эрозии, мм	0	1	2	3	4	5
Толщина пленок, нм	337	335	329	312	298	280
Сопротивление свидетеля, Ом	4,84	4,95	5,03	5,11	5,2	5,26
Разброс толщины на свидетелях	16,9 %					
Разброс сопротивления на свидетелях	8,68 %					

На рис. 3 представлены зависимости толщины и сопротивлений тонких пленок Ni от глубины эрозии в относительных единицах (%).

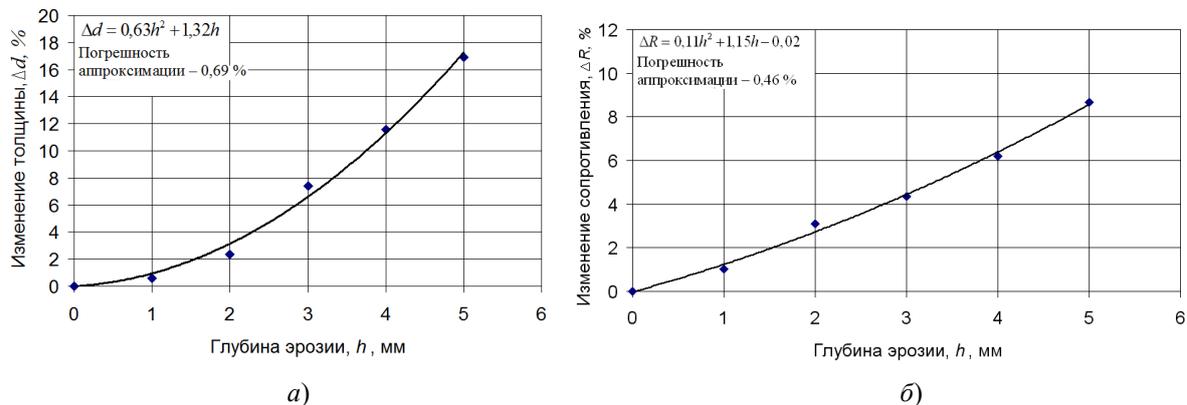


Рис. 3. Изменение толщины (а) и сопротивления (б) пленки Ni от глубины эрозии мишени:
◆ – рассчитанные значения; – – аппроксимация

Для получения заданных параметров и улучшения воспроизводимости резистивных слоев необходимо при задании режимов распыления учитывать влияние убывания плотности плазмы в зоне эрозии – $n(h)$, где h – глубина эрозии мишени. Замер плотности плазмы в зоне эрозии – трудоемкая задача, связанная с использованием дополнительных приборов, однако, зная функцию зависимости толщины пленки от времени распыления, можно определить приращение времени Δt , необходимое для получения требуемых параметров. Полученная экспериментальным путем зависимость толщины пленки Ni от времени распыления t при токе магнетронного разряда 1 А представлена на рис. 4,а. Она имеет линейный вид и описывается функцией

$$d = 3,03t. \quad (1)$$

Из выражения (1) легко вычислить t_0 (время, необходимое для напыления 1 нм материала) = 1,75 с. Изменение толщины Δd при различных значениях глубины эрозии можно определить из выражений

$$\begin{cases} \Delta d_1 = d - d_1 = 2 \text{ нм} \\ \Delta d_2 = d - d_2 = 8 \text{ нм} \\ \Delta d_3 = d - d_3 = 25 \text{ нм} \\ \Delta d_4 = d - d_4 = 39 \text{ нм} \\ \Delta d_5 = d - d_5 = 57 \text{ нм} \end{cases}$$

где d – требуемое значение, получаемое при глубине эрозии $h = 0$; d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 – толщины пленок, получаемые при глубине эрозии $h = 1, 2, 3, 4, 5$ мм соответственно.

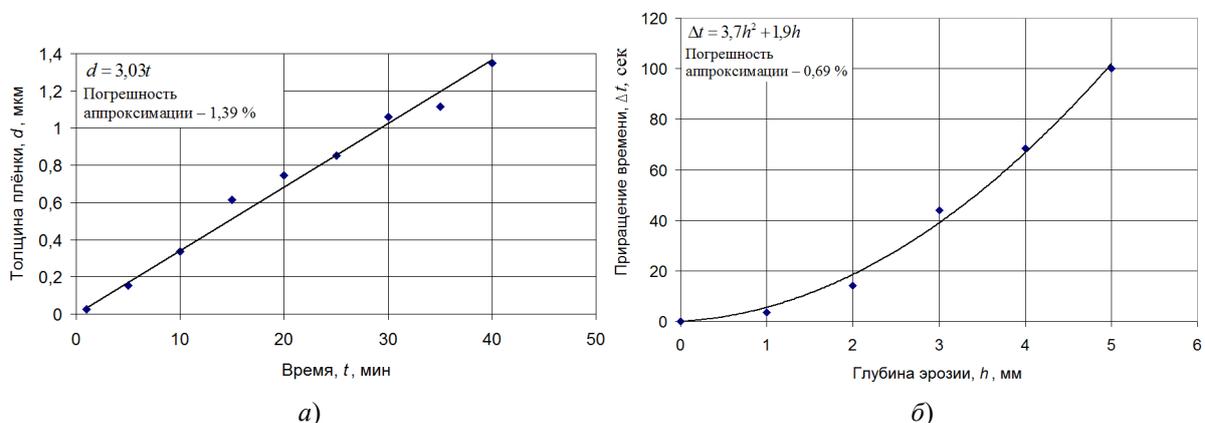


Рис. 4. Зависимость толщины пленки Ni от времени распыления t :
◆ – эксперимент; – – аппроксимация

Таким образом, умножив время, необходимое для получения 1 нм на изменение толщины, определим приращение времени Δt для каждого значения глубины эрозии (рис. 4,б):

$$\begin{cases} \Delta t_1 = \Delta d_1 t_0 = 3,5 \text{ с} \\ \Delta t_2 = \Delta d_2 t_0 = 14 \text{ с} \\ \Delta t_3 = \Delta d_3 t_0 = 43,9 \text{ с} \\ \Delta t_4 = \Delta d_4 t_0 = 68,4 \text{ с} \\ \Delta t_5 = \Delta d_5 t_0 = 100 \text{ с} \end{cases}$$

Приращение времени Δt показывает, насколько нужно увеличить время распыления, исходя из глубины эрозии, для получения требуемых воспроизводимых параметров тонких резистивных пленок. Например, для того чтобы получить требуемое значение толщины и сопротивления тонкой пленки Ni при глубине эрозии на мишени 5 мм, необходимо увеличить время распыления на 100 с. При любом другом значении глубины эрозии приращение времени можно определить из выражения

$$\Delta t = 3,7h^2 + 1,9h.$$

Еще один способ получения заданных значений параметров пленок при различных значениях заглубления канавки на мишени заключается в увеличении тока магнетронного разряда. Функции зависимости толщины пленки от тока магнетронного разряда описываются более сложными и нелинейными выражениями.

Результаты расчета позволяют производить управляемый синтез тонких пленок с заданными электрофизическими параметрами методом магнетронного распыления с улучшением воспроизводимости требуемых параметров при длительном и многократном использовании мишени.

Библиографический список

1. Хошев, А. В. Экспериментальное исследование характеристик магнетронного распыления / А. В. Хошев, С. В. Тимаков // Датчики и системы : сб. докл. 29 науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов. – Пенза : ОАО «НИИФИ», 2010. – С. 148–159.
2. Технология тонких пленок (справочник) / под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга ; пер. с англ. под ред. М. И. Елинсона, Г. Г. Смолко. – Нью-Йорк, 1970. – М. : Сов. радио, 1977. – Т. 1. – 664 с.
3. Смирнова, К. И. Тонкие пленки в микроэлектронике : учеб. пособие / К. И. Смирнова. – Томск : ТУСУР, 2007. – 91 с.
4. Получение и свойства композиционных покрытий на основе металл – углерод с нанокристаллической структурой / С. А. Ширяев, М. В. Атаманов, М. И. Гусева, Ю. В. Мартыненко, А. В. Митин, В. С. Митин, П. Г. Московкин // Журнал технической физики. – 2002. – Вып. 2, т. 72. – С. 99–104.

Уткин Кирилл Эдуардович

заместитель начальника цеха микроэлектроники,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: niifi@sura.ru

Utkin Kirill Eduardovich

deputy chief of the microelectronics department,
Scientific-research Institute
of Physical Measurement
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Торгашин Сергей Иванович

кандидат технических наук,
заместитель генерального директора
по производству и технологиям,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: niifi@sura.ru

Torgashin Sergey Ivanovich

candidate of technical sciences,
depute general director for production
and technologies,
Scientific-research Institute
of Physical Measurement
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Хошев Александр Вячеславович

кандидат технических наук, инженер,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: niifi@sura.ru

Khoshev Aleksandr Vyacheslavovich

candidate of technical sciences, engineer,
Scientific-research Institute
of Physical Measurement
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 621.793.7

Уткин, К. Э.

Управляемый синтез тонких пленок, полученных методом магнетронного распыления /
К. Э. Уткин, С. И. Торгашин, А. В. Хошев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. –
№ 2 (24). – С. 41–46. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-6.