

4. Ташлыкова-Бушкевич, И. И. Нанорельеф поверхности тонких пленок сплавов Al-Mn и Al-Ni при ионно-ассистированном осаждении на стекло / И. И. Ташлыкова-Бушкевич, И. А. Столяр // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2023. – № 3. [В печати]
5. Ташлыков, И. С. Способ нанесения покрытий. Патент РБ № 2324 / И. С. Ташлыков, И. М. Белый // Офиц. бюл. гос. пат. Ведомства Республики Беларусь. – 1999. – № 1. – С. 30.
6. Sigmund, P. Energy density and time constant of heavy-ion-induced elastic-collision spikes in solids / P. Sigmund // Applied Physics Letters. – 1974. – Т. 25. – №. 3. – С. 169-171.
7. Измайлов, В. В. Топография поверхности стали после лазерного воздействия / В.В. Измайлов, Л. Е. Афанасьева, М. В. Новоселова // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. – 2020. – № 13. – С. 4–10.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК МЕДИ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРЯМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Е. В. Телеш, Н. Д. Гутенко

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
П. Бровки 6, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: etelesh@bsuir.by*

Проведено исследование влияния энергии ионов меди и аргона на скорость нанесения, удельное объемное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления наноразмерных медных пленок. Установлено, что скорость нанесения снижалась при увеличении напряжения на диафрагме. У пленок, нанесенных на кремниевые подложки при $U_d > 50\text{--}60$ В, имел место резкий рост удельного объемного сопротивления. Наблюдалось монотонное снижение температурного коэффициента сопротивления при увеличении энергии ионов в пучке, что объясняется наличием диэлектрической прослойки на границах зерен меди.

Ключевые слова: ионный пучок; энергия ионов; медные пленки; электрофизические характеристики.

CHARACTERISTICS OF NANOSIZED COPPER FILMS PRODUCED BY DIRECT DEPOSITION FROM ION BEAMS

E. V. Telesh, N. D. Gutenko

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P. Brovki 6, 220013 Minsk, Belarus
Corresponding author: E. V. Telesh (etelesh@bsuir.by)*

A study of the influence of the energy of copper and argon ions on the deposition rate, volume resistivity, and temperature coefficient of resistance of nanosized copper films was made. It was found that the deposition rate decreased with an increase of diaphragm voltage. Films deposited on silicon substrates at $U_d > 50\text{--}60$ V exhibited a sharp increase in volume resistivity. A monotonic decrease in the temperature coefficient of resistance was observed with an increase in the energy of ions in the beam, which is explained by the presence of a dielectric layer at the boundaries of copper grains.

Key words: ion beam; ion energy; copper films; electrophysical characteristics.

ВВЕДЕНИЕ

Наноразмерные медные пленки находят применение в качестве металлизации СБИС [1], для полупрозрачных электродов в гибких ЖК дисплеях [2], органических светодиодах [3], сенсорных экранах [4]. Перспективным направлением является также замена серебряных низкоэмиссионных слоев на медные в архитектурных стеклах и полимерных покрытиях [5]. Для нанесения медных пленок в основном применяют магнетронное распыление, химическое и электрохимическое осаждение. Недостатки этих методов связаны с низкой энергией ($< 2\text{--}5$ эВ) осаждаемых частиц, что не позволяет обеспечить высокие адгезию и плотность пленок при низких температурах подложки. Осаждение пленок непосредственно из пучков ионов дает возможность управления энергией осаждаемых ионов, позволяет изменять адгезию пленок к подложке, структуру и состав растущей пленки, а, следовательно, и ее свойства [6]. Пленки из меди были получены на подложке из Si (100) при комнатной температуре путем частично ионизованного лучевого осаждения [1]. Пленки имели текстуру в плоскости (111) и (200). Значительное увеличение размера зерна пленок происходило при напряжении анода U_a до 1 кВ. Удельное сопротивление пленок Cu уменьшалось с увеличением U_a . Адгезия пленки меди к кремнию, осажденной при $U_a = 3$ кВ, была в пять раз больше, чем адгезия пленки Cu, осажденной при $U_a = 0$ кВ. Метод прямого осаждения из ионного пучка был применен для получения медной металлизации. Когда энергия ионного пучка увеличивалась с 25 до 75 эВ, удельное сопротивление уменьшалось с 6,21 до 2,09 мкОм·см [7].

Авторами ранее был применен новый метод для нанесения тонких медных пленок, исследовано влияние параметров ионного пучка на электрофизические характеристики пленок. Задачей настоящей работы являлось исследование влияния энергии ионов меди и аргона на удельное объемное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления наноразмерных медных пленок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования осуществляли с использованием ускорителя с анодным слоем, работающего в режиме ионно-пучкового фокуса. Схема проведения экспериментов представлена на рисунке 1, а. Ускоритель 1 генерировал первичный пучок из ионов аргона 6, который распылял медную диафрагму 2. Магнитное поле, создаваемое дополнительным магнитом 5, способствовало формированию вторичного плазменного разряда 4, состоящего из ионов меди и аргона. Вторичный ионный пучок через отверстие в диафрагме попадал на подложку 3. Энергия ионов вторичного пучка зависела от величины положительного напряжения на диафрагме U_d , которое могло варьироваться путем изменения сопротивления переменного резистора 7 (рис. 1, б).

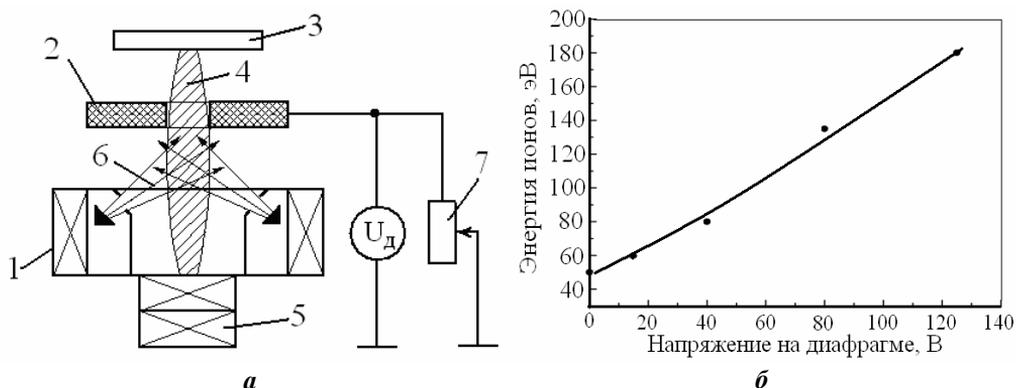


Рисунок 1. Схема проведения экспериментов (а) и зависимость энергии ионов во вторичном пучке (б) от напряжения на диафрагме

Толщину покрытий измеряли с использованием микроскопа-микроинтерферометра МИИ-4. Удельное поверхностное сопротивление измерялось с применением прибора ИУС-3. Покрытия наносили на подложки из кремния и окисленного кремния.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

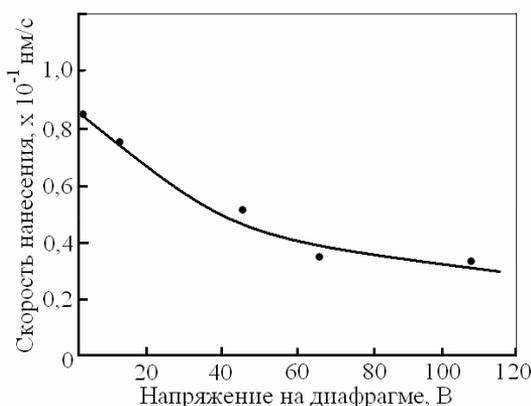


Рисунок 2. Зависимость скорости нанесения от напряжения на диафрагме

Установлено, что скорость нанесения снижалась при увеличении напряжения на диафрагме (рис. 2). Это можно объяснить торможением пучка положительно заряженных ионов меди электрическим полем диафрагмы, а также более эффективным распылением конденсирующейся пленки ионами вторичного пучка с энергией 120–160 эВ. В статье [8] также было установлено снижение скорости осаждения почти в два раза при увеличении энергии ионов с 25 до 150 эВ.

Удельное объемное сопротивление медных пленок толщиной 50–80 нм зависело не только от величины напряжения на диафрагме, но и вида подложки (рис. 3). Установлено, что у пленок, нанесенных на кремниевые подложки при $U_d > 50-60$ В, наблюдался резкий рост удельного объемного сопротивления ρ_v в 8–9 раз. При использовании подложек из окисленного кремния сопротивление увеличивалось лишь в два раза. При нанесении на монокристаллическую подложку последняя может оказывать значительное влияние на образование зародышей и, соответственно, на микроструктуру пленки. Хотя поверхность кремниевой подложки и была покрыта тонким слоем естественного оксида, эпитаксиальное влияние подложки приводило к формированию упорядоченной структуры конденсатов. Увеличение энергии ионов во вторичном пучке вызывало радиационные повреждения в медной пленке, аморфизацию ее структуры, что способствовало

росту ρ_v . С другой стороны повышенная энергия ионов стимулирует протекание химического взаимодействия между медью и кислородом, азотом, парами воды, т.е. с газами остаточной атмосферы в вакуумной камере, что также приводит к увеличению ρ_v . Похожие зависимости были получены в работе [7].

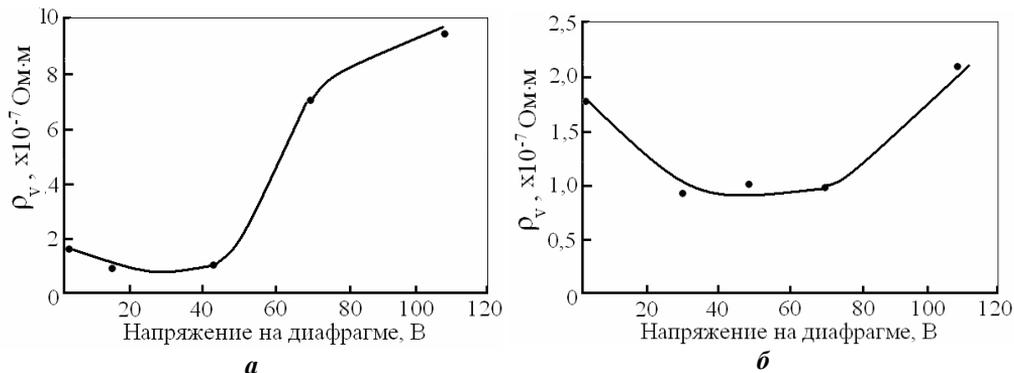


Рисунок 3. Зависимость удельного объемного сопротивления пленок меди, осажженных на подложки из кремния (а) и окисленного кремния (б)

На рисунке 4 представлены зависимости температурного коэффициента сопротивления α от напряжения на диафрагме. Наблюдалось монотонное снижение α при увеличении энергии ионов в пучке.

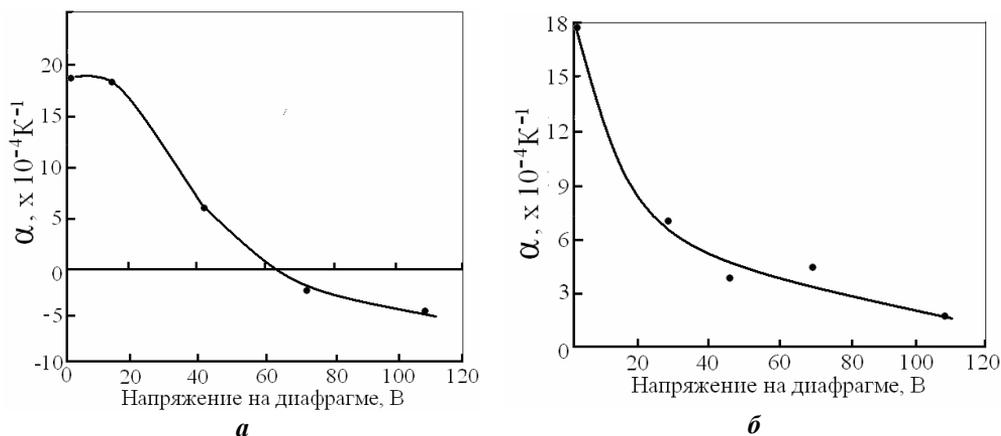


Рисунок 4. Зависимость температурного коэффициента сопротивления пленок меди, осажженных на подложки из кремния (а) и окисленного кремния (б)

Пленки, нанесенные на подложку из кремния при $U_d > 60 \text{ В}$, имели отрицательные значения α . Причиной снижения температурного коэффициента сопротивления является появление диэлектрической прослойки на границах зерен меди (оксиды, нитриды и оксинитриды меди). В этом случае токоперенос в пленках будет в большей степени осуществляться туннелированием электронов через диэлектрический барьер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования показали, что энергия ионов меди и аргона оказывает существенное влияние на скорость нанесения и электрофизические

характеристики наноразмерных пленок меди. Установлено влияние материала подложки на удельное объемное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления пленок. Для получения медных покрытий с оптимальными электрофизическими характеристиками энергия ионов не должна превышать 100 эВ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Kim, K.-H. Cu films by partially ionized beam deposition for ultra large scale integration metallization / K.-H. Kim et al. // Journal of Materials Research. – 1998. – V. 13. – No 5. – P. 1158 – 1163.
2. Kim, D.-J. Properties of ITO/Cu/ITO multilayer films for application as low resistance transparent electrodes / D.-J. Kim et al. // Trans. on electrical and electronic materials. – 2009. – V.10. – No 5. – P. 185–186.
3. Kang, M.-G. Semitransparent Cu electrode on a flexible substrate and its application in organic light emitting diodes / M.-G. Kang, L.G. Guo // J. of Vac. Sci. and Technol. B. – 2007. – V.25. – No 6. – P. 2637–2641.
4. Kim, D.-J. Indium-free, highly transparent, flexible Cu₂O/Cu/Cu₂O mesh electrodes for flexible touch screen panels/ D.-J. Kim et al. // Sci. Rep. – 2012. – V.5, 16838; doi: 10.1038/srep16838.
5. Zakharov, A.N. Properties of low-emission coatings based on Ag and Cu deposited on polymer film by magnetron sputtering / A.N. Zakharov et al. // Inorganic Materials: Applied Research. – 2012. – V. 3. – No5. – P. 433 – 439.
6. Телеш, Е.В. Применение вторичного разряда в ускорителе с анодным слоем для формирования оптических покрытий из диоксида кремния. / Е.В. Телеш, А.П. Достанко // Контенант. – 2014. – Т.13. – №2. – С. 31–33.
7. Kim, D. Use of the direct negative Cu ion beam deposition for the control of the properties of Cu thin film/ D. Kim et al. // Applied Surface Science. – 2006. – V. 253. – No 4. – P. 2127–2131.
8. Kim, D. Deposition of polycrystalline Si thin films on glass substrates by direct negative Si ion beam deposition / Kim, D. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. – 2011. – V. 269. – P. 2017–2019.

НЕЛИНЕЙНОЕ ОТРАЖЕНИЕ НИЗКОРАЗМЕРНОГО СУПЕРКРИСТАЛЛА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

Е. В. Тимошенко¹, В. А. Юревич²

¹) МГУ имени А.А. Кулешова, ул. Космонавтов, 1, 212022 Могилев, Беларусь,
e-mail: timoshchenko@msu.by

²) БГУ пищевых и химических технологий, пр. Шмидта, 3, 212027 Могилев, Беларусь,
e-mail: va_yurevich@mail.ru

Представлены и рассчитаны соотношения, позволяющие анализировать следствия резонансной фазовой нелинейности как фактора оптической бистабильности в отражении суперкристалла.

Ключевые слова: квазидвумерные суперкристаллы квантовых точек; диполь-дипольное взаимодействие; оптический гистерезис.