

УДК 538.975:539.216.2:621.793.18

**ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ И ОПТИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЕВ ЗОЛОТА
ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ**

Е. Н. Галенко

*Учреждение образования «Мозырский государственный педагогический
университет имени И. П. Шамякина», Республика Беларусь*

С. А. Шарко, А. И. Серокурова

*Государственное научно-производственное объединение
«Научно-практический центр Беларуси по материаловедению», г. Минск*

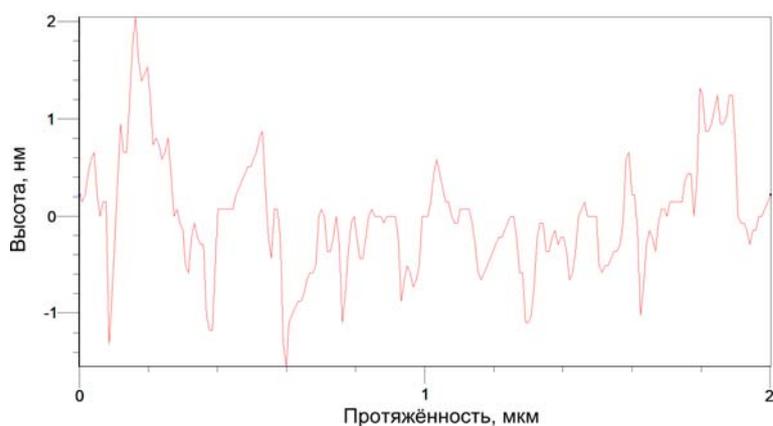
Уникальные свойства золота далеко не исчерпываются только лишь высокой коррозионной стойкостью и электропроводностью. Большой интерес представляют также его оптические свойства. Так, нанометровые слои золота пропускают до половины падающего электромагнитного излучения в оптическом диапазоне [1], что может быть успешно использовано при создании, например, лазеров на нитриде галлия. Золото также обладает высоким отражением (более 90 %) в диапазоне длин электромагнитных волн от инфракрасного до радиоволн и выше, что предопределяет его использование в качестве электромагнитных экранов.

Эффективным методом получения тонких слоев различных материалов (металлов, полупроводников, диэлектриков) как однокомпонентных, так и многокомпонентных систем является ионно-лучевое напыление (ИЛН). Преимуществом данного метода является пространственное разделение источников ионов, мишени и подложки [2], что позволяет гибко контролировать процесс напыления и воздействовать на свойства получаемых тонких пленок. С другой стороны, низкое давление в рабочей камере (10^{-1} – 10^{-3} Па), ограниченное лишь быстротой откачки, улучшает качество получаемых структур.

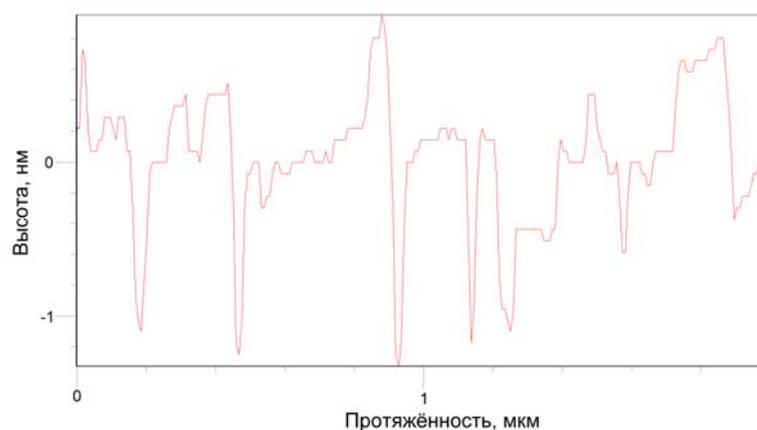
Основная проблема при получении тонких слоев золота заключается в низкой адгезии слоя металла к подложке. Для повышения адгезии перед формированием основного слоя в данной работе был использован метод ИЛН с дополнительным напылением и последующим распылением наноразмерного (1–2 нм) слоя золота и исследовались различия в морфологических и оптических свойствах наноразмерных пленок золота, полученных как при непрерывном напылении, так и при использовании дополнительной операции напыления – распыления.

Морфология поверхности исследовалась методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью программы MTM Surface Explorer. Оптические характеристики (коэффициент отражения) слоев золота на кварце были получены с помощью спектрофотометра НІТАСНІ-340.

Из рис. 1 видно, что образец, полученный повторным напылением, имеет меньшие значения среднеарифметической (R_a) и среднеквадратической (R_z) шероховатостей – соответственно, 0,3 и 0,4 нм и разброс высот от –1,3 до +0,95 нм, чем в аналогичных образцах, полученных непрерывным напылением ($R_a = 0,6$ нм, $R_z = 0,8$ нм, разброс –1,5 до +2 нм).



а)



б)

Рис. 1. АСМ профиль поверхности образца, полученного непрерывным напылением (а) и с применением методики повторного напыления – распыления (б)

На рис. 2 представлены спектры отражения двух образцов слоев золота толщиной 10 нм на кварце, полученных в разных условиях. Из графиков следует, что образец, полученный с использованием операции напыления – распыления, начиная примерно с 700 нм (красный и ближний ИК-спектр), имеет значения коэффициентов отражения R выше, чем аналогичный образец, полученный без применения данной операции. Причем анализ соотношений между оптическими коэффициентами на длине волны 850 нм для слоев золота, полученных с применением дополнительного напыления – распыления ($R = 83,0\%$, $T = 4,6\%$, $A = 12,4\%$) и без его применения ($R = 80,7\%$, $T = 6,8\%$, $A = 12,5\%$), позволяет заключить, что отражение увеличивается в основном за счет уменьшения пропускания, а не поглощения волн. Это свидетельствует о формировании более качественной структуры наноразмерных слоев, что подтверждается АСМ исследованиями.

Для объяснения формирования качественного слоя металла на поверхности подложки при использовании дополнительной операции напыления – распыления наноразмерного слоя золота следует учесть, что в указанных выше условиях ионного распыления на поверхность подложки падает поток распыленных атомов золота,

в котором условно выделяют три группы частиц. Более 80 % наиболее медленных атомов золота в потоке имеют среднюю энергию примерно 2 эВ, менее 15 % – примерно 5 эВ и около 5 % атомов золота характеризуются энергией более 12 эВ.

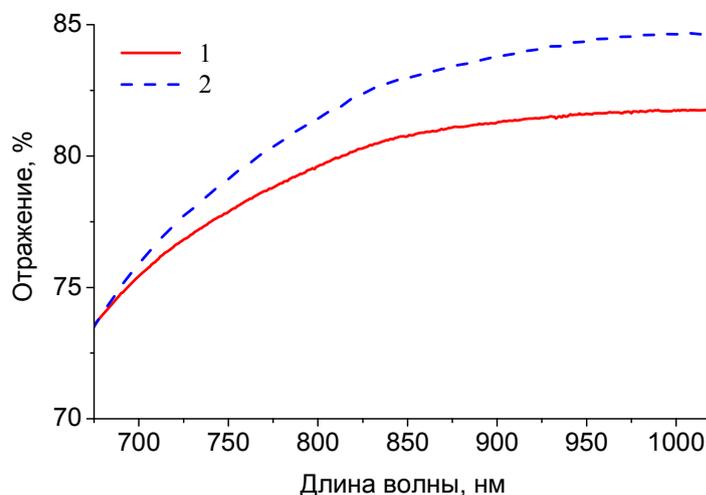


Рис. 2. Спектр отражения образцов золота толщиной 10 нм на кварце, полученных непрерывным напылением 1 и с применением повторного напыления – распыления 2

Высокоэнергетические атомы с энергией, более чем в два раза превышающей энергию связи подавляющего большинства известных оксидных и фторидных материалов, способны внедриться в приповерхностный слой подложки на глубину до пяти постоянных кристаллической решетки [3]. Глубина внедрения дефектов в несколько постоянных решетки сравнима с толщиной исходного нарушенного поверхностного слоя подложки естественного происхождения. При количестве этих дефектов менее 10 % от поверхностной плотности материала подложки не происходит ухудшения исходного качества поверхности подложки и ее основных свойств. Внедренные атомы золота являются, с одной стороны, точечными дефектами в приповерхностном нарушенном слое подложки, а с другой стороны, служат дополнительными центрами кластерообразования. Они приводят к улучшению адгезии из-за формирования дополнительных физических связей *внедренный атом золота – осажденный атом золота*. Повторное осаждение слоя золота в указанных выше условиях позволяет не менее чем в два раза увеличить число внедренных атомов золота, дополнительно усиливающих адгезионную связь.

Таким образом, метод ионно-лучевого напыления в сочетании с дополнительной операцией напыления – распыления позволяет получать наноразмерные слои золота высокого качества. Их поверхность характеризуется большей однородностью и является менее шероховатой. Улучшение качества слоев металла при использовании дополнительной операции напыления – распыления можно объяснить внедрением в подложку высокоэнергетических ионов золота, которые, с одной стороны, являются источниками точечных дефектов в приповерхностном нарушенном слое подложки, а с другой – служат дополнительными центрами кластерообразования. За счет этого обеспечивается сильная адгезия слоя металла к подложке. Метод ионно-лучевого напыления может быть успешно применен для получения качественных проводящих оптически прозрачных слоев металла в единицы – десятки нанометров.

Литература

1. Получение методом ионно-лучевого распыления кислородом и оптические свойства ультратонких пленок золота / А. И. Стогний [и др.] // Журн. техн. физики. – 2003. – Т. 73, № 6. – С. 86–89.
2. Bundesmann, C. Tutorial: The systematics of ion beam sputtering for deposition of thin films with tailored properties / C. Bundesmann, H. Neumann // Journal of Applied Physics 124, 231102 (2018) ; Mode of access: <https://doi.org/10.1063/1.5054046>.
3. О неоднородном характере начальной стадии ионно-лучевого осаждения ультратонких пленок золота / А. И. Стогний [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30, № 6. – С. 87–94.

УДК 537.531:678.073:678.046

**ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ
КОМПОЗИЦИОННЫХ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА**

В. А. Банный

*Учреждение образования «Гомельский государственный
медицинский университет», Республика Беларусь*

И. В. Царенко, С. И. Красюк

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Эксплуатация радиотехнических систем СВЧ приводит к повышению естественного уровня электромагнитного фона, вызывает проблемы электромагнитного загрязнения, электромагнитной безопасности и электромагнитной совместимости радио- и электронной техники. Одним из перспективных средств решения указанных проблем являются композиционные радиопоглощающие материалы (РПМ). Существующая номенклатура композиционных РПМ включает множество материалов, изготавливаемых по оригинальным технологиям. Свою нишу среди современных РПМ занимают композиты на основе конструкционных крупнотоннажно выпускаемых термопластов, в частности, полиэтилена (ПЭ) и функциональных наполнителей (ФН). Такие РПМ привлекают малой удельной массой и технологичностью, обеспечивая электромагнитную совместимость узлов электронной аппаратуры и регулируемый уровень электрических и магнитных потерь при взаимодействии с радиоизлучением.

Цель работы состояла в оценке электрических и теплофизических параметров композиционных РПМ на основе ПЭ.

Объектами исследований служили листовые композиционные РПМ на основе ПЭ (ГОСТ 16803-070). В качестве ФН использовали магнитные и электропроводящие вещества: дисперсные магнитно-мягкий марганец-цинковый феррит (ММФ, ТУ 6-09-5111–84, марка 2500 НМС), углеродную ткань Бусофит Т-1, стеклосферы.

Методом термического прессования изготовлены экспериментальные образцы конструкционного листового РПМ. Образцы РПМ выполнены в соответствии с принципами размерно-рецептурной и структурной оптимизации по критерию наилучшего радиопоглощения [1], [2]. С применением комплекса физических и физико-химических методов исследования оценены электрические и теплофизические характеристики монолитных композиционных РПМ. Электро- и теплофизические характеристики РПМ определяли по стандартным методикам. Для измерения электрического сопротивления образцов РПМ использовали вольтметр универсальный цифровой В27А; для измерения тангенса угла диэлектрических потерь и электро-