

Е.Н. Галенко¹, С.А. Шарко²
(¹УО «МГПУ им. И.П. Шамякина», г. Мозырь
²ГО «НПЦ по материаловедению», г. Минск)

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЁВ ЗОЛОТА

Тонкие слои золота перспективны для использования в различных областях электроники, что обусловлено высокими значениями электропроводности золота и его химической инертностью. Кроме того, слои металла толщиной в единицы нанометров способны пропускать более половины падающего оптического излучения при поглощении в 10÷20% [1].

В данной работе исследовались наноразмерные слои золота, полученные на кремнии и кварце методом ионно-лучевого напыления [2] с применением методики напыления /распыления слоя золота толщиной несколько нанометров. Показано, что применение данной методики заметно улучшает качество получаемых слоёв.

Перед напылением производилась очистка подложек от посторонних поверхностных примесей в течение 120 с пучком ионов кислорода энергией менее 300 эВ и плотностью тока пучка 0,1...0,15 мА/см². Нанесение слоя золота на подложку производилось распылением мишени золота ионами кислорода с энергией 1500...1600 эВ и плотностью тока ионов 0,1...0,25 мА/см² в вакууме не хуже 0,2 Па. При использовании дополнительной операции напыления /распыления перед напылением основного слоя на подложку наносился первоначальный слой золота толщиной 2÷4 нм в течение 2-3 минут. Распыление этого слоя осуществлялось ионами кислорода с энергией менее 300 эВ и плотностью тока 0,1...0,15 мА/см² до исчезновения металлической проводимости.

Были проведены измерения образцов, полученных в различных режимах: без вращения подложки и без дополнительного распыления (режим 1), с непрерывным вращением подложки без дополнительного распыления (режим 2) и напыление с непрерывным вращением подложки с дополнительным распылением (режим 3).

Электропроводность измерялась стандартным линейным четырёхзондовым методом на основе контактного устройства ИУС-3. Переменный ток I пропусклся через два внешних зонда, а разность потенциалов U измерялась между двумя внутренними зондами. Затем рассчитывалось удельное поверхностное сопротивление слоя металла (в омах на квадрат, Ом/кв.) по формуле $\rho_s \approx 4,53U/I$. Удельное

сопротивление определялась, согласно [3], из выражения $\rho = \rho_s d$, где d – толщина слоя металла. Для определения толщины всех образцов использовалась экспериментальная зависимость толщины слоя от времени напыления при заданных режимах.

Поверхностная морфология образцов исследовалась методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) на сканирующем зондовом микроскопе NanoEducator. Программный комплекс MTM Surface Explorer на основании данных АСМ позволил получить значения среднеарифметической R_a и среднеквадратической R_z шероховатости поверхности.

В **таблице 1** приведены значения толщины d , удельного поверхностного сопротивления ρ_s и удельного сопротивления ρ наноразмерных слоев золота, в зависимости от режимов напыления. Как видно из таблицы, удельное сопротивление уменьшается, как с увеличением толщины слоя [1], так и при вращении подложки и использовании дополнительной операции напыления/распыления. Для сравнения можно указать, что удельное сопротивление золота в массивном состоянии составляет $2,3 \cdot 10^{-8}$ Ом·м (23 Ом·нм).

Таблица 1 – Значения толщины и электрофизических характеристик наноразмерных слоёв золота от условий и времени напыления

Время напыления, с	Параметры слоёв золота	Режимы получения		
		режим 1	режим 2	режим 3
60	d , нм			7,54
	ρ_s , Ом/кв.			14,66
	ρ , Ом·нм			110,54
120	d , нм			15,08
	ρ_s , Ом/кв.			8,69
	ρ , Ом·нм			131,04
240	d , нм		29,44	30,152
	ρ_s , Ом/кв.		4,41	3,65
	ρ , Ом·нм		129,83	110,2
300	d , нм	34,42		37,69
	ρ_s , Ом/кв.	3,74		2,76
	ρ , Ом·нм	128,73		104,02

Результаты АСМ исследований поверхности образцов (таблица 2), полученных в разных режимах, показали, что включение дополнительной операции напыления наноразмерного слоя золота и его последующего распыления приводит к улучшению качества поверхности, о чем свидетельствует снижение шероховатости поверхности.

Таблица 2 – Значения шероховатости поверхности R_a и R_z слоёв золота от условий и времени напыления

Время напыления, с	Значения шероховатости, нм	Режимы получения		
		режим 1	режим 2	режим 3
60	R_a / R_z			0,2 / 0,3
120	R_a / R_z			0,1 / 0,2
240	R_a / R_z		0,6 / 0,8	0,3 / 0,4
300	R_a / R_z	0,2 / 0,2		0,2 / 0,2

Для объяснения формирования качественного слоя металла на поверхности 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.

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. 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 адатом 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 и вращения подложки позволяет получать наноразмерные слои золота высокого качества. Они обладают меньшим значением удельного сопротивления, а 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. Стогний, А. И. Получение методом ионно-лучевого распыления кислородом и оптические свойства ультратонких пленок золота / А. И. Стогний, Н. Н. Новицкий, С.Д. Тушина, С.В. Калинин // Журнал технической физики. Том 73. – 2003, № 6. – С. 86 – 89.

2. Оптически прозрачная гетероструктура: пат. 2014148518/28 РФ; МПК H01L 21/3205 (2006.01) B82B 1/00 (2006.01) / А. В. Беспалов, А. И. Стогний, Н. Н. Новицкий, О. Л. Голикова, В. А. Ермаков, В. А. Кецко; заявл. 03.12.2014; опубл. 10.01.2016 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2016.

3. Четырехзондовый метод измерения электрического сопротивления полупроводниковых материалов: Учебно-методическое пособие по спецпрактикуму “Физика полупроводниковых материалов и приборов” для студентов физического факультета / Под редакцией Н.А. Поклонского. – Минск: Белгосуниверситет; 1998. – 46 с.