

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

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЁВ ЗОЛОТА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИОННО-ЛУЧЕВОГО РАСПЫЛЕНИЯ – ОСАЖДЕНИЯ

Наноразмерные слои металлов, толщиной в несколько единиц – десятков нанометров, представляют собой большой научный и практический интерес. В частности, особое внимание к золоту, связанное с его повышенной стойкостью к коррозии и высокой электропроводностью, обусловило его широкое применение в различных областях электроники и приборостроении в качестве проводящих и защитных покрытий. Кроме того, способность наноразмерных слоёв золота [1] пропускать более половины падающего света при поглощении в 10–20% [2] позволяет их использовать в устройствах плазоники и нанофотоники, нанолазерах, оптических метаматериалах и т.д. В связи с вышесказанным, получение качественных слоёв золота нанометровых толщин является важной научно-технической задачей.

В данной работе исследовались электрические свойства слоёв золота толщиной 2–13 нм, полученных на подложках кремния методом ионно-лучевого распыления – осаждения [2, 3] с применением дополнительной операции напыления и последующего распыления слоя золота толщиной несколько нанометров.

Перед напылением производилась очистка кремниевых и кварцевых подложек от посторонних поверхностных примесей в течение 120 с пучком ионов кислорода энергией менее 0,3 кэВ и током пучка 0,10–0,15 мА. Нанесение слоя золота на подложку производилось распылением мишени золота ионами кислорода с энергией 1,5–1,6 кэВ и током ионного пучка 0,10–0,25 мА в вакууме не хуже 0,2 Па. Скорость напыления составляла 0,15 мкм/ч. Были проведены измерения образцов, полученных в различных режимах: без вращения подложки и без дополнительного распыления, с непрерывным вращением подложки без дополнительного распыления и напыление с непрерывным вращением подложки с дополнительным распылением.

Электрические измерения проводились с помощью стандартного линейного четырёхзондового метода [4] на основе установки измерения удельного сопротивления ИУС-3. По результатам измерений рассчитывалось поверхностное сопротивление R_s (в омах на квадрат, Ом/□). Определение толщины наноразмерных слоёв золота всех об-

разцов проводилось по экспериментальной зависимости толщины от времени напыления при фиксированных режимах напыления. Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) рассчитывался в температурном интервале от 293 до 373°С согласно выражению $\alpha = 1/R_0(R-R_0)/(T-T_0)$.

Зависимость поверхностного сопротивления R_s от толщины d для плёнок золота в области толщин 2–13 нм имеет характерный вид, представленный на рис. 1. Поверхностное сопротивление также уменьшается как при вращении подложки, так и введении дополнительной операции напыления – распыления наноразмерного слоя золота, причём в последнем случае это уменьшение является более значительным. Наименьшее значение удельного сопротивления, полученное как произведение поверхностного сопротивления на толщину плёнки, оказалось равным ≈ 31 Ом·нм, что превышает соответствующее значение ρ_0 для золота в массивном состоянии, которое при 293 К составляет $2,35 \cdot 10^{-8}$ Ом·м (23,5 Ом·нм) [5].

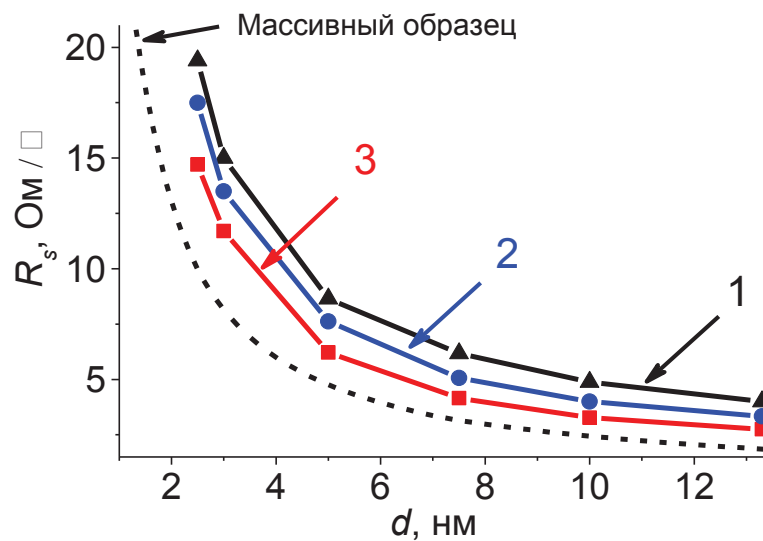


Рис. 1. Зависимость поверхностного сопротивления R_s от толщины d слоёв золота, полученных непосредственным напылением (1), с вращением подложки (2), с вращением подложки и применением операции напыления – распыления наноразмерного слоя золота (3)

Очень важную информацию о структуре ультратонких слоёв металлов могут предоставить данные о ТКС. В работе было зафиксировано уменьшение температурного коэффициента α плёнок золота толщиной 10 нм с $4,07 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ до $2,72 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, полученных при использовании дополнительной операции напыления – распыления, что свидетельствует об улучшении их термостабильности в данной облас-

ти существования наноразмерных плёнок. При этом с ростом толщины плёнки ТКС стремится к своему значению, характерному для объёмного материала (рис. 2), что говорит о формировании сплошной проводящей пленки. Значение данного коэффициента для золота в массивном состоянии при комнатной температуре на порядок выше и составляет $3,9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ [6].

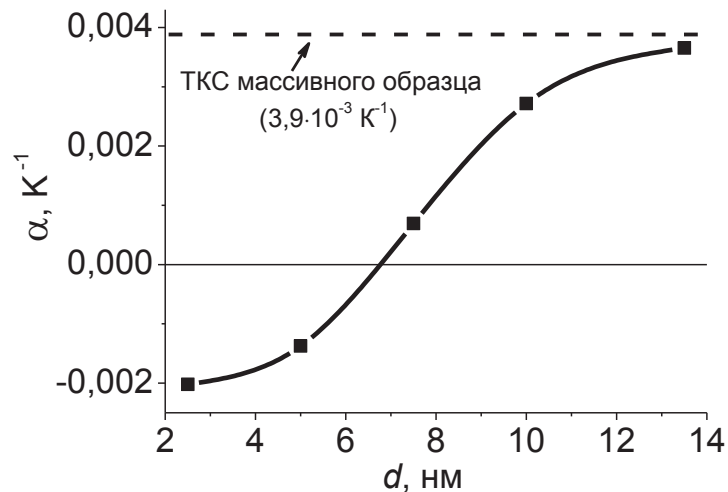


Рис. 2. Зависимость температурного коэффициента сопротивления α от толщины d слоёв золота, полученных напылением с применением операции напыления – распыления наноразмерного слоя золота

Смена знака у ТКС с минуса на плюс в области толщин 6–7 нм (см. рис. 2) свидетельствует о переходе плёнки от островкового типа микроструктуры к сетчатому [7]. В области с отрицательным ТКС характерна островковая проводимость, которая определяется расстоянием между островками, их размерами и температурой. При переходе в область с положительным коэффициентом α начинает преобладать физически несплошная, сетчатая структура, когда островки или гранулы электрически соединяются друг с другом, образуя проводящие мостики. В области существования сплошных однородных плёнок наибольший вклад в удельное сопротивление вносит рассеяние электронов на структурных дефектах (одиночные вакансии, образованные ими кластеры в зёрнах и границы зёрен), если их толщина сравнима или превышает среднюю длину свободного пробега электронов (для золота она составляет 37,7 нм [8]).

Улучшение качества слоев металла при использовании дополнительной операции напыления – распыления происходит вследствие внедрения в подложку высокоэнергетических атомов золота в услови-

ях автооблучения. С одной стороны, эти атомы являются источниками точечных дефектов в приповерхностном нарушенном слое подложки; а с другой – они служат дополнительными центрами кластерообразования. За счет этого обеспечивается сильная адгезия слоя металла к подложке [3].

Таким образом, метод ионно-лучевого напыления в сочетании с дополнительной операцией напыления – распыления наноразмерного слоя и вращения подложки позволяет получать наноразмерные слои золота высокого качества. Они обладают меньшим значением удельного сопротивления и при толщине 6–8 нм уже являются сплошными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Найденов, П. Н. Двухрешетчатые магнитоплазмонные структуры на основе VIG и перфорированных пленок золота / П. Н. Найденов, А. Л. Чехов, О. Л. Голикова, А. В. Беспалов, А. А. Гераськин, С. С. Савин, Т. В. Мурзина // Журн. техн. физики. – 2019. – Т. 61, № 9. – С. 1076–1711.

2. 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 // Журн. техн. физики. – 2003. – Т. 73, № 6. – С. 86–89.

3. Стогний, А.И. О неоднородном характере начальной стадии ионно-лучевого осаждения ультратонких пленок золота / А. И. Стогний, Н. Н. Новицкий, О. М. Стукалов, А. И. Демченко, В. И. Хитько // Письма в Журн. техн. физики. – 2004. – Т.30, №.6. – С. 87–94.

4. Бурлаков, Р. Б. К вопросу об измерении удельного сопротивления проводящих слоев четырехзондовым методом / Р. Б. Бурлаков, В. С. Ковивчак // Вестн. Ом. ун-та. – 2014, № 2. – С. 59–68.

5. Эмсли, Дж. Элементы / Дж. Эмсли. – Пер. с англ. – М.: Мир, 1993. – 256 с.

6. Физика тонких плёнок. Т. II. Современное состояние исследований и технические применения / под общ. ред. Г. Хасса и Р. Э. Туна. – Пер. с англ. – М.: Мир, 1967. – 396 с.

7. Чопра, К. Тонкопленочные солнечные элементы / К. Чопра, С. Дас. – Пер. с англ., с сокращениями. – М.: Мир, 1986. – 440 с.

8. Gall, D. Electron mean free path in elemental metals / D. Gall // Journal of applied physics. – 2016. – Vol. 119. – P. 085101-5.