

02;05;06;07;11;12

Получение методом ионно-лучевого распыления кислородом и оптические свойства ультратонких пленок золота

© А.И. Стогний, Н.Н. Новицкий, С.Д. Тушина, С.В. Калинин

Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Белоруссии,
220072 Минск, Белоруссия
e-mail: stognij@ifttp.bas-net.by

(Поступило в Редакцию 10 ноября 2002 г.)

Исследована зависимость оптических и электрических свойств золотых пленок толщиной от менее 1 до 8 nm, полученных методом ионно-лучевого распыления с использованием ионов аргона и кислорода. Показано, что свойства пленок не зависят от типа применявшихся для распыления ионов. Установлено, что пленки толщиной от 1 до 5 nm являются сплошными и обладают высокой прозрачностью. Получены методом ионно-лучевого распыления ионами кислорода омические контакты NiO_x/Au к $p\text{-GaN}$.

Известно, что на поверхности золота не образуется слоя естественного окисла [1], и ультратонкие пленки золота толщиной в единицы нанометров способны пропускать более половины падающего оптического излучения при поглощении в 10...20% [2,3]. Эти свойства предопределяют перспективность использования ультратонких пленок золота в качестве прозрачных защитных слоев для многослойных металлических структур [4] или в качестве прозрачных омических контактов для светоизлучающих полупроводниковых структур на основе нитрида галлия [3,5].

Однако при нанесении ультратонких пленок золота с использованием методов испарения в вакууме возникают проблемы с контролем толщины, обусловленные относительно высокой скоростью осаждения, которая составляет порядка 0.1...1 $\mu\text{m}/\text{min}$ [6]. Более перспективным представляется использование метода ионно-лучевого распыления [6]. Здесь скорость осаждения пленок управляется посредством изменения параметров ионного источника и может поддерживаться на уровне 1 nm/s. Но ионно-лучевое распыление обычно производится в относительно невысоком вакууме $\sim 10^{-2}$ Pa, когда существенно возрастает роль неконтролируемых примесей органической природы в пленках, оказывающих отрицательное влияние на оптические и электрические свойства [7]. Известным способом уменьшения концентрации органических примесей в пленках является использование кислородной плазмы [8] или распыление мишеней ионами кислорода в атмосфере кислорода [9]. В настоящей работе метод распыления мишени золота ионами кислорода предлагается использовать для получения прозрачных пленок золота с высокой электрической проводимостью.

Экспериментальное оборудование

Установка ионно-лучевого распыления содержала источник ионов на основе двухкаскадного самостоятельного разряда низкого давления с холодным полым катодом

для распыления мишени и модифицированный вариант источника ионов Кауфмана с открытым торцом для подготовки поверхности подложки перед осаждением пленки и подробно описана ранее в [9,10]. Распыление мишени производилось пучком ионов аргона или кислорода с энергией 0.8 keV и плотностью тока 0.3 mA/cm². Пластика из золота чистотой не хуже 99.99% использовалась в качестве мишени. Источник ионов Кауфмана во время осаждения пленки отключался, подача аргона через него прекращалась, а термокатод оставался включенным для поддержания температуры поверхности рабочей подложки около 120°C. Предельное давление в установке составляло менее 10^{-3} Pa, а рабочее давление во время осаждения пленки не превышало 10^{-2} Pa.

Морфология поверхности подложек и пленок золота анализировалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) при помощи атомно-силового микроскопа Фемтоскан-001 (центр перспективных технологий, МГУ, Москва) с полем сканирования $5 \times 5 \mu\text{m}$, работающего в контактном режиме с использованием кремниевых кантилеверов, имеющих радиус закругления острия 10 nm, угол расхождения конуса 20° и длину $50 \mu\text{m}$, изготовленных фирмой MicroMash (www.spmtips.com). Поверхностное сопротивление пленок ρ (Ω/\square) определяли четырехзондовым методом на серийном приборе ИУС-3. Спектры пропускания пленок в интервале длин волн 280–550 nm измеряли после осаждения на спектрофотометре „НІТАСНІ-340“ с погрешностью не более 0.3%. Измерение потерь излучения в пленке (A)% проводилось на стенде, включающем He–Ne лазер ($\lambda = 632.8$ nm), поворотный стол с исследуемыми образцами и систему фотометрического контроля.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показано АСМ изображение исходной поверхности кварцевой подложки. Поверхность подложки является гладкой, причем размах высот на характерном рельефе поверхности длиной до $4 \mu\text{m}$ не превышает 2 nm

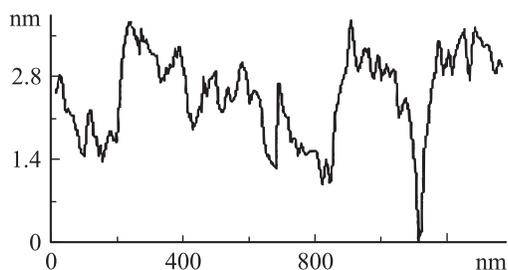
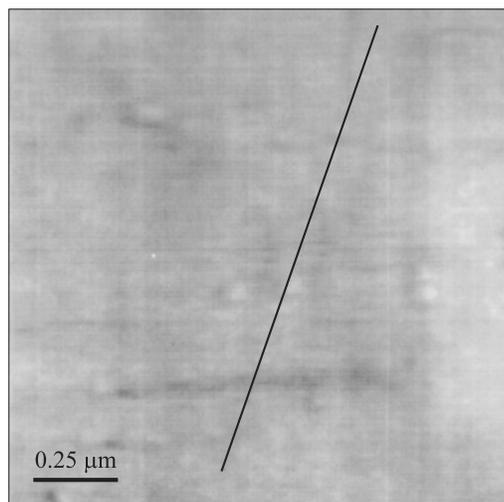


Рис. 1. АСМ изображение поверхности кварцевой подложки.

(вдоль линии на рис. 1), а среднеквадратическая шероховатость составляет менее 1 нм. На рис. 2 приведены характерные АСМ изображения пленок золота толщиной 0.4 (а) и 1.2 нм (b), полученных распылением с использованием ионов аргона. Согласно АСМ изображениям, приведенным на рис. 2, и результатам измерений поверхностного сопротивления, приведенным на рис. 3, свойства пленок, расчетная толщина которых составляет менее 1 нм, сильно отличаются от свойств более толстых образцов. Пленки (рис. 3) характеризуются очень высоким поверхностным сопротивлением, которое резко падает с ростом толщины пленки, а их поверхность характеризуется высокой среднеквадратической шероховатостью (более 3 нм) и размахом высот на характерном сечении рельефа поверхности, в несколько раз превышающем размах высот на характерном сечении рельефа поверхности подложки. Это позволяет предположить, что пленки такой толщины не являются сплошными, а состоят из гранул с поперечным размером около 50 нм и высотой до 6 нм, хаотически расположенных на поверхности подложки (рис. 2, а). Поверхность более толстых образцов (рис. 2, b) характеризуется меньшим значением среднеквадратической шероховатости (менее 1 нм), которое слабо изменяется с дальнейшим ростом толщины пленок (рис. 4). Поверхностное сопротивление

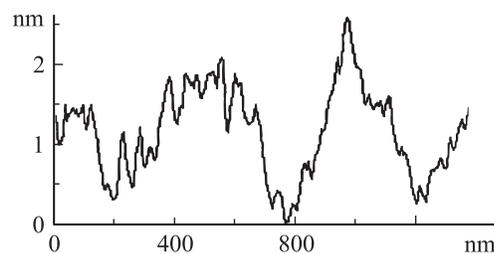
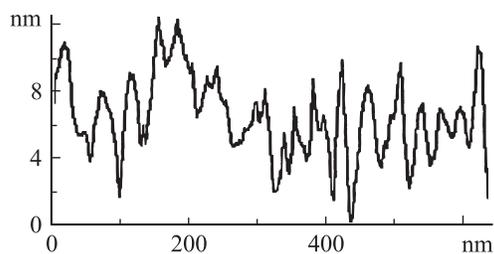
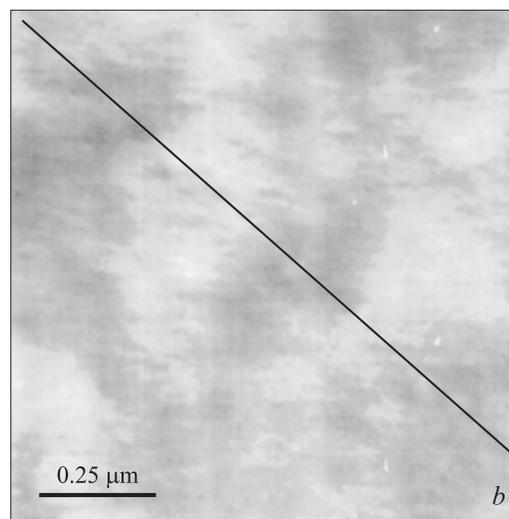
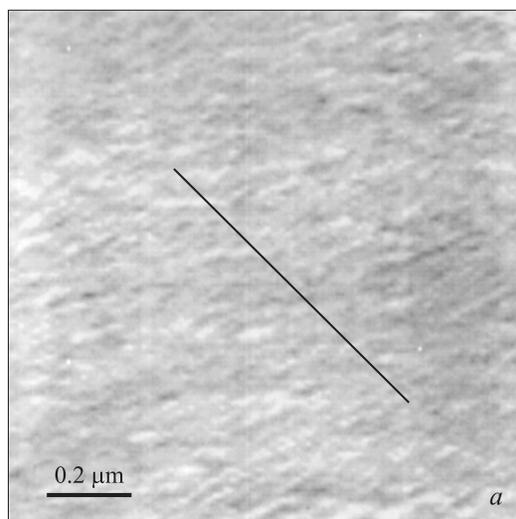


Рис. 2. АСМ изображения пленок золота толщиной 0.4 нм (а) и 1.2 нм (b).

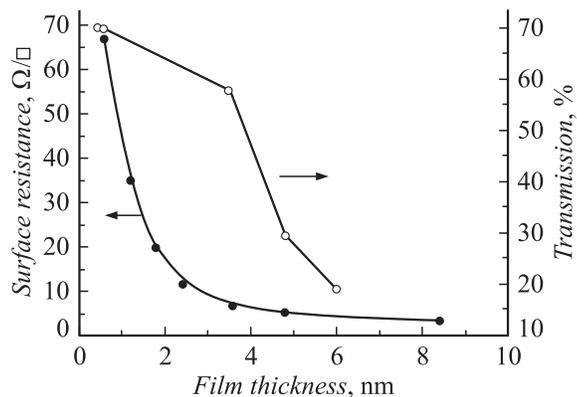


Рис. 3. Зависимость значений поверхностного сопротивления и пропускания света ($\lambda = 400$ nm) от толщины ультратонких пленок золота, напыленных с использованием ионов аргона.

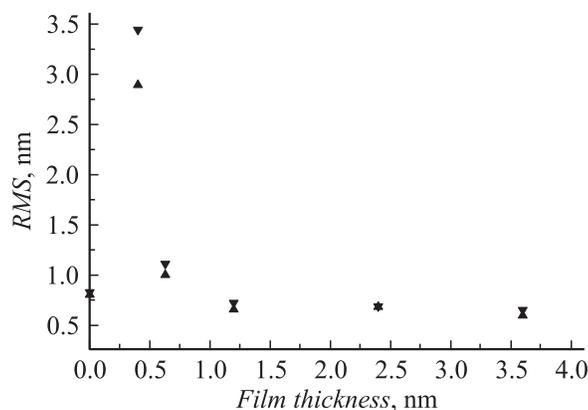


Рис. 4. Зависимость среднеквадратичной шероховатости поверхности золотых пленок от толщины.

этих пленок уменьшается до $5 \Omega/\square$ с увеличением толщины до 4 nm, а оптическое пропускание составляет более 40% (рис. 3). Пропускание света уменьшается с ростом толщины пленок, причем происходит это в основном за счет увеличения поглощения света и отличается от поведения серебряных пленок, где пропускание света изменяется в основном за счет роста отражения света в сравнимом интервале толщин, а поглощение остается практически постоянным [2]. Так, для пленок толщиной 4 nm пропускание составляет 46%, а поглощение — 21%. Слабая зависимость значения среднеквадратической шероховатости поверхности от толщины пленки (рис. 4) свидетельствует о том, что после образования на поверхности подложки сплошного слоя золота начинается равномерный рост пленки по толщине и происходит формирование пленочной структуры с гладкими границами, рельеф которых повторяет рельеф поверхности подложки, что видно из сравнения рис. 1 и 2, b.

Использование ионов кислорода для напыления пленок золота позволило получить образцы ультратонких

пленок, величина поверхностного сопротивления и спектры пропускания которых близки к значениям для образцов такой же толщины, но полученных распылением ионами аргона. Однако в близких экспериментальных условиях (одинаковых значениях давления, плотности тока пучка ионов и их энергий) скорость осаждения пленок при использовании кислорода в качестве рабочего газа примерно в 2 раза ниже, чем при использовании аргона. Морфология поверхности пленок, полученных в случае использования кислорода, мало отличалась от поверхности образцов, полученных с использованием аргона, но неоднородности рельефа поверхности приобретали более гладкие формы, а среднеквадратичная шероховатость имела несколько меньшую величину (рис. 4). Для объяснения причины примерно в два раза меньшей скорости осаждения пленки золота при использовании ионов кислорода по сравнению с применением для распыления ионов аргона можно воспользоваться известными представлениями о взаимодействии молекулярных ионов O_2^+ с поверхностью мишени [6]. Считается, что при столкновении с мишенью молекула распадается на два атома, а начальная энергия распределяется поровну между атомами. В использованном источнике ионов кислорода доля ионов O_2^+ составляет более 60%, а доля ионов O^+ — более 25% [11]. Поэтому суммарный вклад энергии в процессы распыления от пучка ионов кислорода более чем на 30% меньше, чем при использовании ионов аргона при прочих равных условиях и с учетом того, что масса атома кислорода в 2.5 раза меньше массы атома аргона.

Спектры пропускания света с длиной волны от 290 до 550 nm для пленок золота толщиной до 5 nm, напыленных с использованием ионов аргона или кислорода, приведены на рис. 5. Видно, что значение пропускания света определяется толщиной пленки, а не типом ионов для распыления мишени. Причем пленки толщиной от 1 до 4 nm обладают прозрачностью более 40% и одновременно являются сплошными с поверхностным сопротивлением от 25 до $5 \Omega/\square$.

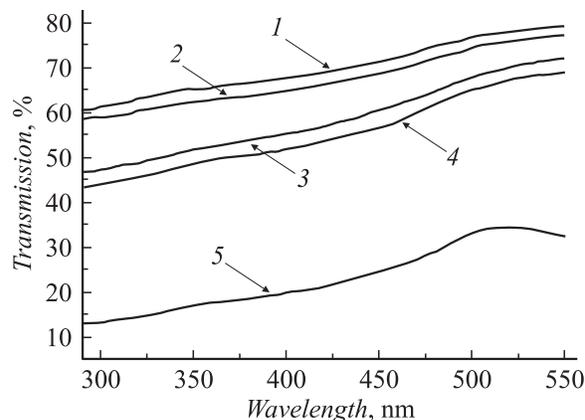


Рис. 5. Спектры пропускания пленок золота, осажденных с использованием ионов кислорода (1, 4) и ионов аргона (2, 3, 5). Толщина пленки, nm: 1 — 3, 2 — 0.4, 3 — 3.6, 4 — 4, 5 — 4.8.

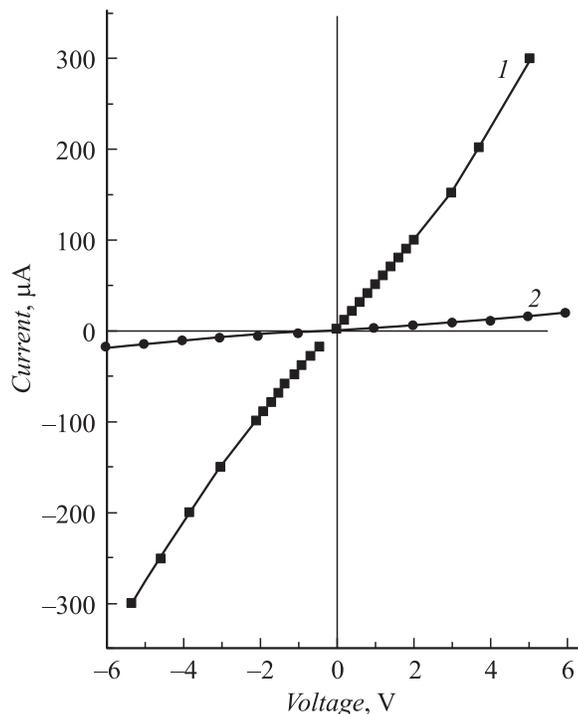


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики контактов. 1 — $p\text{-GaN}/\text{NiO}_x$ (2 nm) / Au (4 nm) / SiO_2 и 2 — $p\text{-GaN}/\text{NiO}_x$ (4 nm) / Au (4 nm) / SiO_2 .

Полученное соответствие между свойствами пленок, осажденных с использованием ионов аргона или кислорода, указывает на перспективность использования кислорода в качестве рабочего газа для напыления пленок золота, особенно в тех случаях, когда они используются в качестве омических контактов к p -слою полупроводников А(III)В(V), а сам контакт представляет собой бислойную структуру из оксида металла нанометровой толщиной с проводимостью p -типа и верхнего слоя золота толщиной менее 10 nm [5]. В этом случае появляется возможность, например, в едином вакуумном цикле последовательно наносить на поверхность слоя $p\text{-GaN}$ слой оксида никеля посредством распыления мишени никеля ионами кислорода, а затем пленки золота толщиной менее 6 nm. Таким образом, были получены контактные пленочные структуры $p\text{-GaN}/\text{NiO}_x$ (2 nm)/Au (4 nm)/ SiO_2 и $p\text{-GaN}/\text{NiO}_x$ (4 nm)/Au (4 nm)/ SiO_2 на нитриде галлия с прозрачностью более 50% в диапазоне длин волн от 290 до 550 nm, спектры пропускания которых аналогичны спектрам, представленным на рис. 5, и обладают омическим характером проводимости (рис. 6).

Заключение

В работе исследованы зависимости от толщины оптических и электрических свойств пленок золота толщиной от менее 1 и до 8 nm. Показано, что пленки

толщиной менее 1 nm не являются сплошными, а состоят из отдельных гранул, хаотически расположенных на поверхности подложки и электрически плохо связанных друг с другом. Пленки толщиной до 5 nm являются сплошными, обладают высокой прозрачностью и представляют интерес как омические контакты к светоизлучающим структурам на основе GaN. Пленки могут также использоваться в качестве защитных покрытий при получении многослойных наноразмерных структур, которые деградируют при контакте с поверхностью подложек и атмосферой.

В заключение выражаем благодарность вице-президенту AIXTRON AG М. Neuken за предоставленные образцы нитрида галлия, О.М. Стукалову за помощь в проведении АСМ исследований, Г.П. Яблонскому и Е.В. Луценко из Института физики Национальной академии наук Беларуси за дискуссии и результативную критику.

Работа получила частичную финансовую поддержку в рамках проекта В-176 ISTC.

Список литературы

- [1] Thin films — Interdiffusion and Reactions / Ed. J.M. Poate, K.N. Tu, J.V. Mayer. A Wiley-Interscience Publication. John Wiley and Sons Inc., 1978.
- [2] Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976. 928 с.
- [3] Sheu J.K., Su Y.K., Chi G.C. et al. // Appl. Phys. Lett. 1999. Vol. 74. N 16. P. 2340–2342.
- [4] Стогний А.И., Новицкий Н.Н., Стукалов О.М. // Новые магнитные материалы микроэлектроники. Сб. тр. XVIII Междунар. школы-семинара. М., 2002. С. 303–305.
- [5] Jin-Kuo Ho, Chang-Shyang Jong, Chien C. Chiu et al. // Appl. Phys. Lett. 1999. Vol. 74. N 9. P. 1275–1277.
- [6] Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Вып. III. Распыления сплавов и соединений, распыление под действием электронов и нейтронов, рельеф поверхности. Пер. с англ. / Под ред. Р. Бериш, К. Витмака. М.: Мир, 1986. 488 с. (Sputtering by Particle Bombardment III / Ed. R. Behrisch, K. Wittmaack).
- [7] High Vacuum Production in the Microelectronics Industry / P. Duval. Elsevier, 1988. 263 p.
- [8] Tada S., Sakamoto Y., Suzuki T. et al. // Vacuum. 1999. Vol. 53. P. 321–352.
- [9] Стогний А.И., Свирин В.Т., Тушина С.Д. и др. // ПТЭ. 2001. № 3. С. 151–154.
- [10] Стогний А.И., Новицкий Н.Н., Стукалов О.М. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 1. С. 39–48.
- [11] Стогний А.И., Токарев В.В. // ПТЭ. 1990. № 3. С. 142–144.