

СТРУКТУРА, МИКРОМОРФОЛОГИЯ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ВОЛЬФРАМА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

© 2014 В. А. Кочубей, В. В. Агучин, Т. А. Гаврилова, В. Н. Кручинин, Л. Д. Покровский

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, пр. Лаврентьева, 13,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: kochubey@isp.nsc.ru*

Поступила в редакцию 15.10.2014 г.

Аннотация. Исследованы структура, микроморфология и оптические характеристики толстых, непрозрачных пленок вольфрама, нанесенных на подложки из кремния методом магнетронного распыления в режиме постоянного тока. По данным, полученным методом ДЭВЭО, приповерхностный слой пленок — смесь аморфной и поликристаллической компонент. Кристаллическая компонента отнесена к вольфраму, пространственная группа $Im\bar{3}m$. Исследования пленок методом РЭМ показали, что размеры неоднородностей на поверхности пленки составляют величину $\sim 30 \div 300$ нм, а толщина пленок ~ 400 нм. Методом спектральной эллипсометрии определены дисперсионные зависимости показателя преломления, $n(\lambda)$, и коэффициента поглощения пленок вольфрама, $k(\lambda)$, в диапазоне длин волн $\lambda = 250\text{—}1100$ нм.

Ключевые слова: магнетронное распыление, пленка, вольфрам, спектральная эллипсометрия.

ВВЕДЕНИЕ

Вольфрам является перспективным материалом для металлизации полупроводников в микросхемах с целью дальнейшего увеличения плотности элементов на единицу объема. Дело в том, что обычно применяемая для этих целей медь не позволяет делать размер соединительных проводников слишком малым вследствие размерного эффекта роста удельного сопротивления и из-за уменьшения прочности меди при нагреве ее электрическим током слишком большой плотности [1—5]. Размерный эффект связан с тем, что при уменьшении линейного размера сечения проводника до величин меньших длины свободного пробега электронов в материале проводника удельное сопротивление последнего начинает резко расти по сравнению с табулированными в физических справочниках величинами для «толстых» проводников из-за дополнительного вклада от эффекта рассеивания электронов на границах проводника.

Длина свободного пробега электронов в меди при комнатной температуре составляет величину ~ 40 нм, в то время как для вольфрама соответствующее значение около 2 нм [2—5]. Из-за размерного эффекта теоретически оцениваемое удельное

сопротивление проводника из меди становится больше удельного сопротивления вольфрамового проводника при уменьшении линейного размера поперечного сечения последнего до величин меньших 25 нм [1, 5]. Для сравнения, при комнатной температуре (293 К), удельное сопротивление массивного образца меди составляет величину $\rho = 1.7$ мком·см, что более чем втрое меньше величины $\rho = 5.3$ мком·см для образца вольфрама. Кроме того, при рабочей температуре 413 К (140 °С), характерной для многих электронных устройств, медь, имеющая температуру плавления $T = 1358$ К (1085 °С), начинает деградировать вследствие электромиграции ее атомов в полупроводник, механического напряжения материала в местах образовавшихся пор и т. д. [1, 6]. Вольфрам, имеющий температуру плавления 3695 К (3422 °С), при вышеуказанной рабочей температуре практически не подвержен деградационным процессам.

По указанным причинам в настоящее время становится весьма актуальным исследование физических свойств тонких пленок вольфрама, нанесенных на поверхность полупроводника. Структура и морфология таких пленок существенно влияют на их механические свойства. Оптические

свойства пленок важно знать при использовании тонких полупрозрачных пленок вольфрама толщиной ~25 нм и менее. Настоящее исследование микроструктурных и оптических свойств пленок вольфрама методически близко к аналогичным исследованиям пленок других металлов, проведенным ранее [7—13].

Нанесение пленок вольфрама

Пленки вольфрама были получены методом магнетронного распыления мишени из металлического вольфрама в режиме постоянного тока. Детальное описание данной установки распыления вместе с ее основными техническими характеристиками приведено ранее в [14—17]. Пленки вольфрама, которые исследовались в настоящей работе, синтезированы при следующих параметрах распыления: температура подложки $T = 120$ °С, мощность магнетрона $W = 320$ Вт (ток $I = 0.6$ А), поток аргона $Q = 1.200$ л/час, давление аргона в процессе распыления $p \sim 0.1$ Па, время экспозиции $t = 45$ мин. Подложки, на которые наносился вольфрам, представляли собой пластины монокристаллического кремния (100) размером ~ 25 мм × 25 мм, толщиной 0.4 мм.

Структурные параметры пленок

Исследование кристаллической структуры образцов пленок вольфрама проводилось методом дифракции электронов высокой энергии на отражение (ДЭВЭО) в электронно-оптической установке EF-Z 4 (Карл Цейсс, Германия) при ускоряющем напряжении 50 кВ. На рис. 1 приведена электронограмма, полученная методом ДЭВЭО, для образца пленки вольфрама, нанесенной при вышеприведенных условиях. Вид электронограммы говорит о том, что полученная пленка представляет смесь кристаллической и аморфной компонент. Причем кристаллическая компонента — мелкокристаллический поликристалл со слабовыраженной

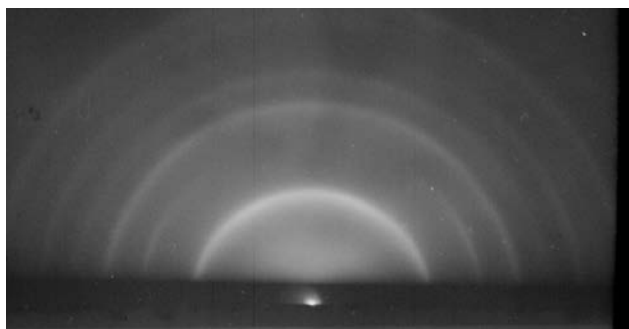


Рис. 1. Электронограмма образца пленки вольфрама на кремнии, полученная методом ДЭВЭО

текстурой. Идентификация кристаллической фазы исследуемого образца производилась на основе сопоставления экспериментальных данных, полученных из электронограммы, с табличными значениями межплоскостных расстояний известных кристаллических фаз вольфрама. В табл. 1 приведены табулированные в [18] данные по межплоскостным расстояниям и интенсивностям линий, полученных на порошковых образцах вольфрама. Межплоскостные расстояния выражены в ангстремах, а интенсивность в единицах 100-балльной шкалы, показанных в виде нижнего индекса при численном значении каждого межплоскостного расстояния. Так «1.29₂₃» означает, что линия, которая соответствует межплоскостному расстоянию 1.29 Å, имеет интенсивность 23 единицы 100-балльной шкалы. Также приведены индексы hkl соответствующих кристаллографических плоскостей вольфрама. Интенсивность линий электронограммы исследуемого образца вольфрама приведена в табл. 1 качественно, по системе: с — сильная, сл — слабая, о. сл — очень слабая. Такая качественная характеристика интенсивности линий электронограммы в данном случае вполне достаточна, так как табулированные в [18] данные приведены для порошков, а исследуемый образец — поликристалл, имеющий текстуру, хотя и слабовыраженную. Кроме того, исследуемый образец пленки имеет кроме кристаллической, еще и значительную аморфную составляющую, поэтому интенсивность рефлексов электронограммы может быть ослаблена по сравнению с чисто поликристаллическим образцом. Вследствие этого, при сравнении исследуемого образца с табличными данными, следует учитывать только величины межплоскостных расстояний, значения же интенсивностей соответствующих линий являются вспомогательными параметрами, которые могут быть оценены только качественно.

Таблица 1. Сопоставление межплоскостных расстояний и интенсивностей рефлексов, полученных методом ДЭВЭО, с табулированными в [18] данными для вольфрама

$d_l(\text{Å}), Im3m, hkl$	-	2.24 ₁₀₀ 110	1.58 ₁₅ 200	1.29 ₂₃ 211
$d(\text{Å})$	2.86	2.28	1.6	1.31
интенсивность	о.сл	с	о.сл	сл

Данные, приведенные в табл. 1, демонстрируют хорошее соответствие межплоскостных расстоя-

ний, определенных для линий экспериментальной электронограммы, с табличными для гранцентрированной кубической модификации вольфрама, относящейся к пространственной группе симметрии $Im\bar{3}m$. Интенсивности линий также удовлетворительно, с учетом вышеприведенных замечаний, соответствует табличным данным. Исключение составляет очень слабая линия, соответствующая межплоскостному расстоянию $d = 2.86 \text{ \AA}$. Эта линия не наблюдалась ранее в имеющихся данных для структуры вольфрама. Происхождение этой линии непонятно. Несмотря на это, из анализа данных ДЭВЭО следует, что исследуемый образец пленки вольфрама на кремнии представляет собой смесь аморфной и кристаллической компонент. Причем кристаллическая компонента представлена мелкокристаллическими поликристаллами кубической сингонии, пространственная группа $Im\bar{3}m$, с постоянной решетки $a = 3.164 \text{ \AA}$ [18].

Микроморфология пленок вольфрама

Микроморфология пленок вольфрама была охарактеризована методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на установке LEO 1430 при энергии электронов 10 кэВ. На рис. 2 приведено полученное методом РЭМ изображение участка пленки вольфрама. Структурные параметры именно этой пленки, полученные методом ДЭВЭО, обсуждены выше. Поверхность участка пленки вольфрама имеет волнистый характер с широкими «холмами» и «долинами». Поперечные размеры указанных неровностей колеблются от ~ 30 — 40 нм до ~ 250 — 300 нм. Возможно, что такой рельеф поверхности пленки связан с имеющимися в ней механическими напряжениями. Последние исследовались, например, в работе [1]. С помощью метода РЭМ была также оценена толщина исследуемой пленки вольфрама. Для этого был изготовлен скот сэндвича кремний-вольфрам. Этот скот был затем рассмотрен под углом к нормальному к поверхности образца направлению. Установлено, что толщина пленки вольфрама составляет величину $s \sim 400$ нм. То есть, данная пленка является относительно толстой и очевидно непрозрачной в оптическом диапазоне спектра.

Оптические свойства пленок вольфрама

Дисперсионные оптические характеристики (зависимости показателя преломления, $n(\lambda)$, и коэффициента поглощения, $k(\lambda)$) толстых непрозрачных пленок вольфрама определялись с помощью спектрального эллипсометра «Спектроскан»

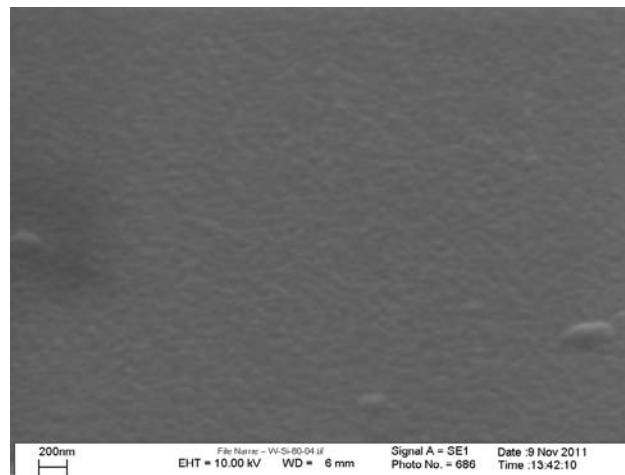


Рис. 2. Фотография участка пленки вольфрама, полученная методом РЭМ

[19—21]. Измерения спектральных зависимостей эллипсометрических углов Ψ и Δ проводились в диапазоне длин волн $\lambda = 250$ — 1100 нм. Спектральное разрешение прибора составляло 2 нм, время записи одного спектра не превышало 20 с, угол падения луча света на образец составлял 50° , 60° и 70° . Использовалась четырехзонная методика измерений с последующим усреднением по всем четырем зонам.

Решение обратной задачи эллипсометрии (ОЗЭ) и подгонка спектральных зависимостей эллипсометрических углов $\Psi(\lambda)$ и $\Delta(\lambda)$ осуществлялась в соответствии с основным уравнением эллипсометрии:

$$\operatorname{tg} \Psi \cdot e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s}, \quad (1)$$

где R_p, R_s — комплексные коэффициенты отражения света для волн, поляризованных в плоскости падения и перпендикулярно к ней, зависят от оптических постоянных и толщин слоев [22]. При этом подгонка спектральных зависимостей поляризационных углов во всем спектральном диапазоне для m точек спектра осуществлялась при помощи минимизации функции ошибки:

$$\sigma^2 = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m \left[(\Delta_{\text{exp.}} - \Delta_{\text{calc.}})^2 + (\Psi_{\text{exp.}} - \Psi_{\text{calc.}})^2 \right]. \quad (2)$$

Спектральные зависимости поляризационных углов $\Psi(\lambda)$ и $\Delta(\lambda)$ для исследуемого образца пленки вольфрама на кремниевой пластине показаны на рис. 3.

Для расчета зависимостей $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ на основе полученных спектральных зависимостей $\Psi(\lambda)$

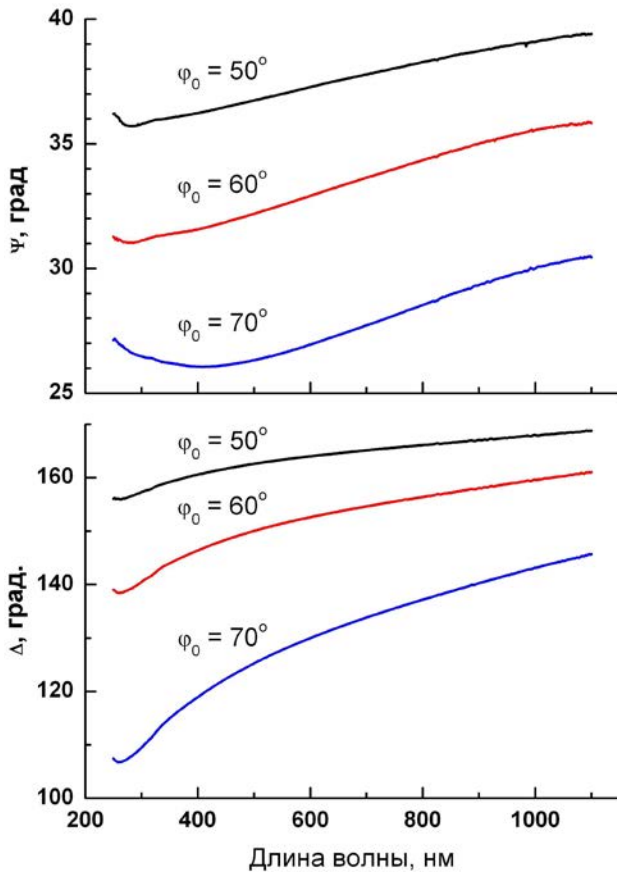


Рис. 3. Спектральные зависимости поляризационных углов $\Psi(\lambda)$ и $\Delta(\lambda)$ для пленки вольфрама на кремнии для углов падения 50° , 60° и 70°

и $\Delta(\lambda)$ использовалось решение ОЗЭ в соответствии с уравнением (1) для оптической модели (полубесконечная отражающая подложка — (воздушная среда), независимо для каждой точки спектра по трем значениям угла падения луча света на образец. Результаты расчетов $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ для исследуемого образца вольфрама на кремниевой пластине показаны на рис. 4. Ход кривых на рисунке качественно соответствует типичным зависимостям $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ для металлов. Для сравнения на рис. 4 приведены данные по оптическим свойствам монокристаллов вольфрама, взятые из работы [23], а также данные по спектральным зависимостям $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ тонких пленок вольфрама, полученных с помощью осаждения металла при пиролизе $W(CO)_6$ [24]. Причем последние данные приведены для трех различных температур пиролиза: 350°C , 400°C и 450°C . Видно, что оптические константы пиролитических пленок вольфрама сравнительно низкие во всем исследованном диапазоне длин волн. Предположительно это связано с наличием в металле остаточных примесей органических компонент.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены физические параметры пленок вольфрама, нанесенных на кремний методом магнетронного распыления в режиме постоянного тока. Исследованы кристаллическая структура, микроморфология и оптические свойства. Установлено, что полученные магнетронным распылением пленки вольфрама, при избранных условиях нанесения, на своей поверхности представляют собой смесь аморфной и кристаллической компонент.

Исследования микрорельефа пленок показали, что поверхность пленок имеет холмистый характер. Причем размеры неровностей на поверхности пленок колеблются в пределах от $\sim 30\text{—}40$ нм до $\sim 250\text{—}300$ нм. Возможно, что такой микрорельеф поверхности пленки вольфрама связан с имеющимися в ней механическими напряжениями.

В результате исследования оптических свойств пленок вольфрама получены спектральные зависимости показателя преломления, $n(\lambda)$, и коэффици-

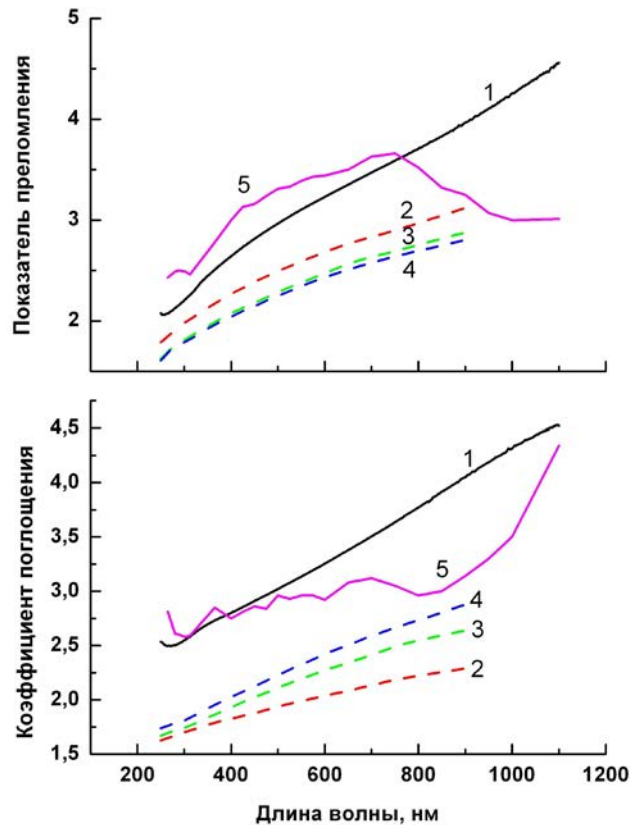


Рис. 4. 1 — спектральные зависимости показателя преломления $n(\lambda)$ и коэффициента поглощения $k(\lambda)$ образца пленки вольфрама на кремнии (данные настоящей работы); 5 — $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ для монокристаллического вольфрама [23]; 2, 3, 4 — $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ для тонких пленок вольфрама, полученных пиролизом $W(CO)_6$ [24]

ента поглощения, $k(\lambda)$, в диапазоне длин волн 250—1100 нм. Характер этих зависимостей качественно соответствует обычным графикам $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ для металлов. Полученные данные по $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ можно в дальнейшем использовать для неразрушающего бесконтактного контроля толщины тонких, полупрозрачных пленок вольфрама, применяемых в различных нанoeлектронных технологиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dooho Choi, Bincheng Wang, Suk Chung, Xuan Liu, Amith Darbal, Adam Wise, Noel T. Nuhfer, and Katayun Barmak // *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2011, vol. 29, № 5, p. 051512.
2. Chen F. and Gardner D. // *IEEE Electron Device Lett.*, 1998, vol. 19, p. 508.
3. Sun T., Yao B., Warren A. P., Kumar V., Roerts S., Barmak K., and Coffey K. R. // *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2008, vol. 26, p. 605.
4. Sun T., Yao B., Warren A. P., Barmak K., Tonney M. F., Peale R. E., and Coffey K. R. // *Phys. Rev. B*, 2009, vol. 79, p. 041402.
5. Sun T., Yao B., Warren A. P., Barmak K., Tonney M. F., Peale R. E., and Coffey K. R. // *Phys. Rev. B*, 2010, vol. 81, p. 155454.
6. Hau-Riege C.S. // *Microelectron. Reliab.*, 2004, vol. 44, p. 195.
7. Atuchin V. V., Grigorieva T. I., Pokrovsky L. D., Kruchinin V. N., Lychagin D. V., Ramana C. V. // *Modern Phys. Lett. B*, 2012, vol. 26, № 5, p. 1150029.
8. Gavrilova T. A., Atuchin V. V., Kruchinin V. N., Lychagin D. V. // *Phys. Procedia*, 2012, vol. 23, p. 61.
9. Атучин В. В., Гаврилова Т. А., Кочубей В. А., Кручинин В. Н., Покровский Л. Д. // *Фунд. пробл. совр. материаловед.*, 2011, т. 8, вып. 4, с. 77.
10. Grigor'eva T.I. and Khasanov T. Kh. // *Optics and Spectroscopy*. 2010, vol. 108, № 4, p. 591.
11. Кочубей В. А., Атучин В. В., Кожухов А. С., Кручинин В. Н., Покровский Л. Д. // *Фунд. пробл. совр. материаловед.*, 2013, т. 10, вып. 2, с. 194.
12. Кочубей В. А., Атучин В. В., Покровский Л. Д., Солдатенков И. С., Троицкая И. Б., Кожухов А. С., Кручинин В. Н. // *Письма о материалах*. 2013, т. 3, вып. 4, с. 326.
13. Кочубей В. А., Атучин В. В., Покровский Л. Д., Солдатенков И. С., Троицкая И. Б., Кожухов А. С., Кручинин В. Н. // *Фунд. пробл. совр. материаловед.*, 2014, т. 11, вып. 2, с. 153.
14. Кочубей В. А., Покровский Л. Д., Григорьева Т. И. // *Фунд. пробл. совр. материаловед.*, 2005, т. 2, вып. 3, с. 103.
15. Атучин В. В., Кочубей В. А., Покровский Л. Д., Хасанов Т. Х. // *Фунд. пробл. совр. материаловед.*, 2006, т. 3, вып. 1, с. 22.
16. Кочубей В. А., Покровский Л. Д., Хасанов Т. Х. // *Фунд. пробл. совр. материаловед.*, 2007, т. 4, вып. 3, с. 52.
17. Ramana C. V., Atuchin V. V., Kochubey V. A., Pokrovsky L. D., Shutthanandan V., Becker U., Ewing R. C. // *Appl. Surf. Sci.*, 2007, vol. 253, p. 5368.
18. William Frank McClune (Ed.), «*Powder Diffraction File. Inorg. Phases*», JCPDS — Int. Cent. Diff. Data, 1601 Parc. Line, Swarthmore, Pennsylvania 19081, USA; W, cub., set 04—080.
19. Рыхлицкий С. В., Спесивцев Е. В., Швец В. А., Прокопьев В. Ю. // *ПТЭ*, 2007, вып. 2, с. 160.
20. Ramana C. V., Utsunomiya S., Ewing R. C., Becker U., Atuchin V. V., Aliev V. Sh., Kruchinin V. N. // *Appl. Phys. Lett.*, 2008, vol. 92, p. 011917.
21. Саркисов С. Ю., Атучин В. В., Гаврилова Т. А., Кручинин В. Н., Бережная С. А., Коротченко З. В., Толбанов О. П., Чернышев А. И. // *Известия вузов. Физика*, 2010, т. 53, с. 346.
22. Мутилин С. В., Хасанов Т. // *Оптика и спектроскопия*. 2008. т. 105, вып. 3, с. 512.
23. Номерованная Л. В., Кириллова М. М., Носков М. М. // *ЖЭТФ*, 1971, т. 60, вып. 2, с. 748.
24. Davazoglou D., Pallis G., Psycharis V., Gioti M., Logothetidis S. // *J. Appl. Phys.*, 1995, vol. 77, № 11, p. 6070.

STRUCTURE, MICROMORPHOLOGY AND OPTICAL PROPERTIES OF TUNGSTEN FILMS DEPOSITED BY DC MAGNETRON SPUTTERING

©2014 V. A. Kochubey, V. V. Atuchin, T. A. Gavrilova, V. N. Kruchinin, L. D. Pokrovsky

*Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 13 Lavrentieva Aven., 630090 Novosibirsk, Russia
e-mail: kochubey@isp.nsc.ru*

Abstract. Thick nontransparent tungsten films have been prepared by dc magnetron sputtering of metal W target. Structural properties of the films have been evaluated by RHEED and SEM methods. RHEED analysis shows that films contain a mixture of polycrystalline and amorphous components with evident crystalline component domination. The crystalline component has been identified as

cubic W, space group $Im\bar{3}m$. SEM observation of thick W films reveals the shallow hillock micromorphology with hillock base diameter of ~ 30 – 250 nm. The hillock micromorphology is supposedly appeared due to internal mechanical tensions in thick W films. Dispersive optical parameters of the W films have been measured by spectroscopic ellipsometry (SE) over spectral range of 250–1100 nm. The instrumental spectral resolution was 2 nm, the recording time of the spectrum did not exceed 20 s. The SE measurements were produced at three angles of incidence of light beam on the sample of 50° , 60° and 70° . The four-zone measurement method was used with subsequent averaging over all the four zones. To calculate the dependencies of refractive index $n(\lambda)$ and extinction coefficient $k(\lambda)$ on optical wavelength λ , the experimental data were processed using the semi-infinite reflection medium model. The dependencies $n(\lambda)$ and $k(\lambda)$ obtained in the present experiment are in reasonable relation with earlier known data and can be used for precise nondestructive and noncontact thickness determination of thin semitransparent W films by SE method.

Keywords: Tungsten film, magnetron sputtering, SEM, RHEED, spectroscopic ellipsometry

REFERENCES

1. Dooho Choi, Bincheng Wang, Suk Chung, Xuan Liu, Amith Darbal, Adam Wise, Noel T. Nuhfer, and Katayun Barmak. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2011, vol. 29, no. 5, p. 051512. DOI: 10.1116/1.3622619
2. Chen F. and Gardner D. *IEEE Electron Device Lett.*, 1998, vol. 19, no. 12, pp. 508–510.
3. Sun T., Yao B., Warren A. P., Kumar V., Roerts S., Barmak K., and Coffey K. R. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2008, vol. 26, p. 605. <http://dx.doi.org/10.1116/1.2938395>
4. Sun T., Yao B., Warren A. P., Barmak K., Toney M. F., Peale R. E., and Coffey K. R. *Phys. Rev. B*, 2009, vol. 79, p. 041402. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.79.041402>
5. Sun T., Yao B., Warren A. P., Barmak K., Toney M. F., Peale R. E., and Coffey K. R. *Phys. Rev. B*, 2010, vol. 81, p. 155454. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.81.155454>
6. Hau-Riege C. S. *Microelectron. Reliab.*, 2004, vol. 44, p. 195. DOI:10.1016/j.microrel.2003.10.020
7. Atuchin V. V., Grigorieva T. I., Pokrovsky L. D., Kruchinin V. N., Lychagin D. V., Ramana C. V. *Modern Phys. Lett. B*, 2012, vol. 26, no. 5, p. 1150029.
8. Gavrilova T. A., Atuchin V. V., Kruchinin V. N., Lychagin D. V. *Phys. Procedia*, 2012, vol. 23, p. 61. DOI:10.1016/j.phpro.2012.01.016
9. Atuchin V. V., Gavrilova T. A., Kochubey V. A., Kruchinin V. N., Pokrovsky L. D. *Fund. probl. sovr. materialoved.*, 2011, vol. 8, iss. 4, p. 77.
10. Grigor'eva T. I. and Khasanov T. Kh. *Optics and Spectroscopy*. 2010, vol. 108, no. 4, p. 591. DOI: 10.1134/S0030400X10040132
11. Kochubey V. A., Atuchin V. V., Kozhukhov A. S., Kruchinin V. N., Pokrovsky L. D. // *Fund. probl. sovr. materialoved.*, 2013, vol. 10, iss. 2, p. 194.
12. Kochubey V. A., Atuchin V. V., Pokrovsky L. D., Soldatenkov I. S., Troitskaya I. B., Kozhukhov A. S., Kruchinin V. N. *Pis'ma o materialakh*, 2013, vol. 3, iss. 4, p. 326.
13. Kochubey V. A., Atuchin V. V., Pokrovsky L. D., Soldatenkov I. S., Troitskaya I. B., Kozhukhov A. S., Kruchinin V. N. *Fund. probl. sovr. materialoved.*, 2014, vol. 11, iss. 2, p. 153.
14. Kochubey V. A., Pokrovsky L. D., Grigor'eva T. I. *Fund. probl. sovr. materialoved.*, 2005, vol. 2, iss. 3, p. 103.
15. Kochubey V. A., Pokrovsky L. D., Grigor'eva T. I. *Fund. probl. sovr. materialoved.*, 2005, vol. 2, iss. 3, p. 103.
16. Kochubey V. A., Pokrovsky L. D., Khasanov T. Kh. *Fund. probl. sovr. materialoved.*, 2007, vol. 4, iss. 3, p. 52.
17. Ramana C. V., Atuchin V. V., Kochubey V. A., Pokrovsky L. D., Shutthanandan V., Becker U., Ewing R. C. *Appl. Surf. Sci.*, 2007, vol. 253, p. 5368. DOI:10.1016/j.apsusc.2006.12.012
18. William Frank McClune (Ed.), «*Powder Diffraction File. Inorg. Phases*», JCPDS — Int. Cent. Diff. Data, 1601 Parc. Line, Swarthmore, Pennsylvania 19081, USA; W, cub., set 04–080.
19. Rykhliitskii S. V., Spesivtsev E. V., Shvets V. A., Prokop'ev V. Yu. *PTE*, 2007, iss. 2, p. 160.
20. Ramana C. V., Utsunomiya S., Ewing R. C., Becker U., Atuchin V. V., Aliev V. Sh., Kruchinin V. N. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, vol. 92, p. 011917. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2811955>
21. Sarkisov S. Yu., Atuchin V. V., Gavrilova T. A., Kruchinin V. N., Berezhnaya S. A., Korotchenko Z. V., Tolbanov O. P., Chernyshev A. I. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2010, vol. 53, p. 346.
22. Mutilin S. V., Khasanov T. *Optika i spektroskopiya*, 2008, vol. 105, iss. 3, p. 512.
23. Nomerovannaya L. V., Kirillova M. M., and Noskov M. M. *Soviet Physics JEPT*, 1971, vol. 33, no. 2, p. 405.
24. Davazoglou D., Pallis G., Psycharis V., Gioti M., Logothetidis S. *J. Appl. Phys.*, 1995, vol. 77, № 11, p. 6070. <http://dx.doi.org/10.1063/1.359133>

Кочубей Василий Александрович — к. ф.-м. н., ведущий инженер-технолог, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН; тел.: +7 (383) 3308889, e-mail: kochubey@isp.nsc.ru

Атучин Виктор Валерьевич — к. ф.-м. н., доцент, заведующий лабораторией, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН; тел.: +7 (383) 3308889, e-mail: atuchin@isp.nsc.ru

Гаврилова Татьяна Александровна — научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН; тел.: +7 (383) 3309082, e-mail: gavr@isp.nsc.ru

Кручинин Владимир Николаевич — к. ф.-м. н., научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН; тел.: +7 (383) 3309628, e-mail: kruch@isp.nsc.ru

Покровский Лев Дмитриевич — ведущий инженер-технолог, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН; тел.: +7 (383) 3308889

Kochubey Vasily A. — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Engineer, Institute of Semiconductor Physics SB RAS; ph.: +7 (383) 3308889, e-mail: kochubey@isp.nsc.ru

Atuchin Victor V. — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Head of Laboratory, Institute of Semiconductor Physics SB RAS; ph.: +7 (383) 3308889, e-mail: atuchin@isp.nsc.ru

Gavrilova Tatiana A. — Researcher, Institute of Semiconductor Physics SB RAS; ph.: +7 (383) 3309082, e-mail: gavr@isp.nsc.ru

Kruchinin Vladimir N. — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher, Institute of Semiconductor Physics SB RAS; ph.: +7 (383) 3309628, e-mail: kruch@isp.nsc.ru

Pokrovsky Lev D. — Leading Engineer, Institute of Semiconductor Physics SB RAS; ph.: +7 (383) 3308889