

07

## **Проблемы измерения параметров элементов и структур современной микро- и наноэлектроники на примере диффузионно-барьерных структур TiN/Ti**

© Д.И. Смирнов, Р.М. Гиниятуллин, И.Ю. Зюльков,  
Н.А. Медетов, Н.Н. Герасименко

Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, Москва,  
Зеленоград  
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва  
НИИ молекулярной электроники и завод „Микрон“, Москва, Зеленоград  
Московский физико-технический институт (государственный  
университет), Московская область, Долгопрудный  
E-mail: rmta@miee.ru

*Поступило в Редакцию 11 марта 2013 г.*

Представлены результаты комплексного исследования технологических параметров диффузионно-барьерных структур TiN/Ti, применяемых в современной микроэлектронной технологии. Для обеспечения достоверности результатов спектральной эллипсометрии, стандартного метода послеоперационного контроля таких структур на этапе тестирования технологического процесса предложен комплексный подход, заключающийся в совместной обработке данных просвечивающей электронной микроскопии и относительной рентгеновской рефлектометрии. Полученная информация использована при расчете дисперсии оптических коэффициентов спектральной эллипсометрии, зависящих от особенностей технологического процесса и необходимых для анализа параметров изготовленных диффузионно-барьерных структур.

В настоящее время проведение полного технологического цикла изготовления наноэлектронных приборов, в особенности при переходе к проектным нормам порядка или менее 90 nm, связано с трудностями измерения параметров изготавливаемых структур, определяемых как недостаточной информативностью отдельных стандартных методик и неоднозначностью используемых моделей, так и использованием неверных предположений о структуре и составе создаваемых объек-

тов. В данной работе для диагностики технологических параметров диффузионно-барьерных структур (ДБС) TiN/Ti использованы несколько взаимодополняющих методов анализа с целью устранения указанных трудностей.

Многослойные диффузно-барьерные структуры TiN/Ti в современной микроэлектронной технологии используются для предотвращения паразитной диффузии в слоях многоуровневой металлизации. В данной работе в рамках тестирования технологического процесса и организации необходимого метрологического контроля исследовались образцы структур TiN/Ti/SiO<sub>2</sub> на кремнии, изготовленные на производственной линии 180 nm микроэлектронной фабрики ОАО «Завод „Микрон“». Технологически заданные толщины слоев в структуре составляли для TiN — 5 nm, Ti — 10 nm, SiO<sub>2</sub> — 15 nm.

Титан и нитрид титана наносились на подготовленную кремниевую подложку с оксидным слоем в едином технологическом процессе в установке кластерного типа с высоким уровнем вакуума ( $10^{-8}$  Torr). Для нанесения Ti использовался метод магнетронного нанесения PVD (Physical Vapor Deposition). В целях улучшения равномерности покрытия нанесение проходило в камере с так называемым источником плазмы ионизованного металла (IMP — Ionized Metal Plasma) [1]. Нитрид титана наносился методом химического осаждения из газовой фазы (Chemical Vapor Deposition). В данном процессе проходило термическое разложение соединения TDMAT (Tetrakis—dimethylamino—titanium—TiN<sub>x</sub>C<sub>y</sub>H<sub>z</sub>), после чего проводилось уплотнение осажденной пленки в плазме газов N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> с целью удаления углеродных примесей и стабилизации ее физических свойств [2].

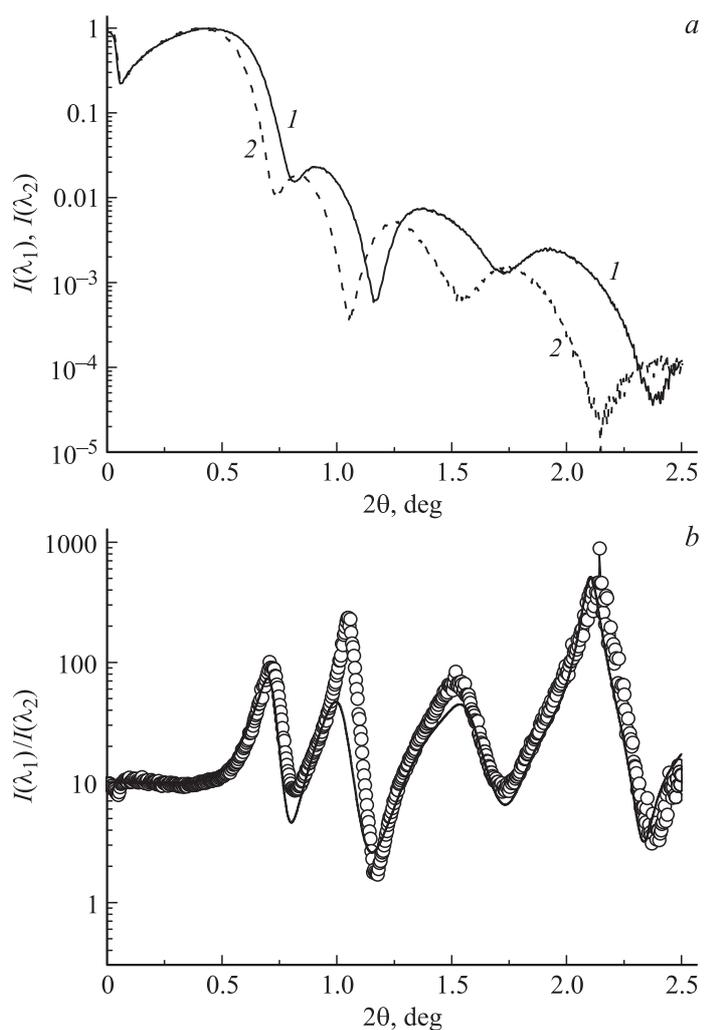
Согласно установленной технологической схеме послеоперационный метрологический контроль параметров нанесенных слоев осуществлялся на промышленной установке спектральной эллипсометрии (СЭ) KLA-Tencor Aset-F5x, предназначенной для неразрушающего экспресс-контроля толщин многослойных структур. Для обработки экспериментальных данных эллипсометрии требовалось задание спектральной дисперсии оптических коэффициентов преломления и поглощения (далее — дисперсионная модель оптических коэффициентов) [3]. Для тонких пленок (100 nm и менее) определение оптических характеристик является трудной задачей в связи с тем, что последние сложным образом зависят от таких параметров, как толщина наносимых слоев, плотность, оптическая гладкость границ раздела. В рассматриваемом

случае применение стандартных дисперсионных моделей  $TiN$  и  $Ti$  не позволило получить удовлетворительного результата и потребовало уточнения параметров изготовленных структур с целью создания собственных моделей.

Данный факт нами рассматривался как основной недостаток спектральной эллипсометрии, поскольку это означало, что реализация промышленных измерений на эллипсометре оказывается возможной только для изученных структур и отработанных технологических процессов, по отношению к которым предполагается воспроизводимость и предсказуемость получения основных характеристик изготавливаемых структур. Однако на практике возможны отклонения от задаваемых параметров. Это особенно важно в тех случаях, когда последовательность проведения технологических процессов может оказывать влияние на характеристики и свойства предварительно созданных элементов структуры, в частности отдельных слоев в многослойной структуре при их нанесении различными методами. Для научных применений и запуска нового технологического процесса необходимость уточнения дисперсионных моделей для каждой новой структуры значительно усложняет метрологический контроль и требует привлечения к работе специалистов высокого уровня, способных оперативно осуществлять доработку существующих моделей или разработку новых на основе информации, получаемой другими методами.

Для решения указанных задач был предложен комплекс совместных метрологических исследований. В качестве базового метода нами использовалась относительная рентгеновская рефлектометрия (ОРР), являющаяся точным и высокоинформативным инструментом диагностики тонкопленочных структур. Рефлектограммы регистрировались на установке „ComplexXRay“ в режиме сканирования  $\theta-2\theta$  на двух длинах волн излучения  $\lambda(CuK_{\alpha}) = 0,139 \text{ nm}$  и  $\lambda(CuK_{\beta}) = 0,154 \text{ nm}$  одновременно. Практика обработки экспериментальных данных показала [4,5], что использование отношения интенсивностей отражения для двух длин волн при расчете позволяет повысить точность определения параметров исследуемых структур и уменьшить время обработки снятых зависимостей.

На рис. 1 представлены измеренные рефлектометрические зависимости. При малых углах скольжения наблюдалась сложная структура интерференционных максимумов: в области критического угла полного внешнего отражения присутствовали два близких максимума,



**Рис. 1.** Угловая зависимость: *a* — интенсивностей отражения  $I(\lambda_1)$  и  $I(\lambda_2)$  от образца ДБС TiN/Ti для длин волн излучения  $\lambda_1 = 0.154$  nm (*1*) и  $\lambda_2 = 0.139$  nm (*2*); *b* — отношения интенсивностей отражения  $I(\lambda_1)/I(\lambda_2)$ ; точки — экспериментальные данные, сплошная кривая — расчет.

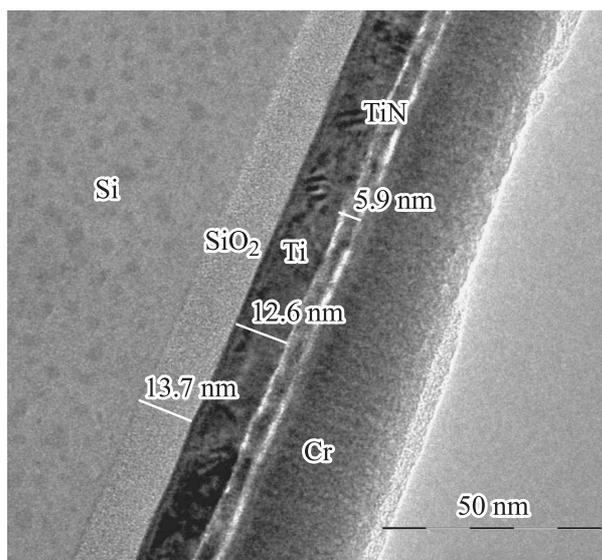
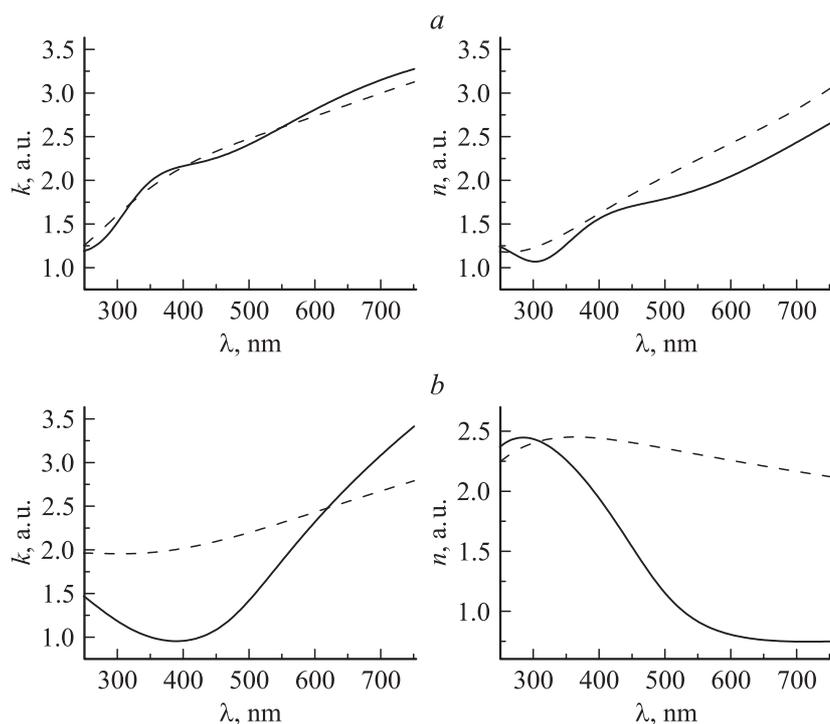


Рис. 2. ПЭМ-изображение поперечного сечения образца ДБС TiN/Ti.

а третий — деформировался, что свидетельствовало о наличии, как минимум, одного дополнительно сформированного слоя в исследуемой структуре и/или существовании неоднородного распределения оптической плотности по глубине образца.

С целью получения необходимой информации о количестве и структуре неучтенных слоев в исследуемой диффузионно-барьерной структуре использовалась просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ). Исследования проводились на просвечивающем электронном микроскопе Jeol JEM-2100 в Центре коллективного пользования МФТИ. Для защиты образца на поверхность дополнительно был нанесен слой Cr толщиной  $\sim 20$  nm, а затем методом ультразвуковой резки изготовлен образец в поперечном сечении. На рис. 2 представлен ПЭМ-снимок поперечного сечения образца. Установлено, что изготовленная структура заметно отличалась от заданной TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si: пленка TiN была представлена тремя отдельными слоями, крайние из которых — с аморфной структурой, промежуточный — с поликристаллической.



**Рис. 3.** Спектральная дисперсия коэффициентов поглощения  $k$  и преломления  $n$  для слоев Ti (*a*) и TiN (*b*). Сплошные кривые — стандартные дисперсионные модели, пунктир — рассчитанные модели.

Полученная при помощи электронной микроскопии информация о количестве отдельных слоев, их примерной толщине, резкости границ раздела была использована для анализа кривых рентгеновской рефлектометрии. Для обработки относительных экспериментальных зависимостей рентгеновского отражения (рис. 1, *b*) в рамках решения обратной задачи рефлектометрии использовался генетический алгоритм [6]. Оптимизируемыми параметрами служили толщина слоев, их плотность, шероховатость границ раздела. Компьютерное моделирование рентгеновского отражения от многослойной структуры проводилось на основе рекуррентных соотношений [7]. Учет диффузионного размытия границ раздела проводился по методу, предложенному в работе [8].

Рассчитанные с помощью рентгеновской рефлектометрии точные значения толщин отдельных слоев использовались в качестве известных параметров при решении обратной задачи спектральной эллипсометрии, которая состояла для рассматриваемого случая в нахождении оптимальных моделей оптических коэффициентов анализируемых структур TiN/Ti (рис. 3). В качестве начального приближения применялись модели из открытой базы данных SOPRA N&K Database [9]. Для моделирования спектральной дисперсии оптических коэффициентов преломления  $n$  и поглощения  $k$  использовался метод гармонических осцилляторов [3]. Как следует из данных, приведенных на рис. 3, наибольшей трансформации подверглись дисперсионные модели для пленки TiN в силу сложного строения этого слоя. Рассчитанные таким образом оптические характеристики в дальнейшем с успехом были применены для достоверной экспресс-диагностики аналогичных структур, изготовленных в указанном технологическом процессе.

В таблице представлены итоговые результаты анализа параметров диффузионно-барьерных структур TiN/Ti. При обобщении данных о фазовом составе, плотности, особенностях процессов нанесения пленок были идентифицированы подслои в пленке TiN. Тонкий аморфный слой между кристаллическими Ti и TiN с плотностью  $2.10 \text{ g/cm}^3$  представлял собой рыхлую пленку, которая не была полностью уплотнена и кристаллизована обработкой в плотной плазменной среде. Тонкий аморфный слой с плотностью  $3.04 \text{ g/cm}^3$  на поверхности представлял собой нитрид титана, окисленный в атмосфере воздуха вследствие отсутствия верхнего защитного слоя и наличия остаточного заряда в приповерхностной области после обработки в плазме.

Как показали проведенные исследования, для корректного метрологического контроля в данном случае необходим комплексный подход, заключающийся в совместной обработке результатов независимых методов, которые в отдельности друг от друга не позволяют получить полную достоверную информацию. Так, в рассмотренном случае послеоперационного контроля методом спектральной эллипсометрии технологических параметров диффузионно-барьерных структур TiN/Ti проведены взаимодополняющие исследования при помощи рентгеновской рефлектометрии и просвечивающей электронной микроскопии.

Полученные в работе результаты, по нашему мнению, являются характерным примером необходимости совершенствования методологии метрологического контроля сложных наноразмерных структур и объ-

Обобщенные результаты измерений технологических параметров диффузионно-барьерных структур TiN/Ti

Слой	Толщина слоя, nm			Шероховатость, nm (OPP)	Плотность, g/cm <sup>3</sup> (OPP)
	(OPP)*	(ПЭМ)	(СЭ)		
TiN — аморфный, окисленный	2.0	5.9	5.8	0.6	3.04
TiN — кристаллический	2.4			0.7	4.85
TiN, TDMAT — аморфный	1.4			0.6	2.10
Ti	12.5	12.6	12.5	0.4	4.36
SiO <sub>2</sub>	14.0	13.7	14.1	0.3	2.2

\* В круглых скобках приведены сокращенные наименования методов исследования, при помощи которых получены указанные значения анализируемых параметров.

ектов. Сформулированное заключение в конечном итоге указывает на необходимость создания стандартов не только для отдельных методик диагностики микро- и наноструктур и материалов, но и для стандартов комплексного применения методов в целом.

Данная работа была выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования МФТИ при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

## Список литературы

- [1] *Wilson S.R., Tracy C.J., Freeman J.L., Jr.* Handbook of Multilevel Metallization For IC. Noyes Publications, 1994. 887 p.
- [2] *Doering R., Nishi Y.* Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology. Taylor&Francis Group, 2008. 1722 p.
- [3] *Tompkins H.G., Irene E.A.* Ellipsometry and polarized light. William Andrew, Inc., 2005. 902 p.
- [4] *Feshchenko R.M., Pirshin I.V., Touryanski A.G., Vinogradov A.V.* // J. Russian Laser Res. 1999. V. 20. N 2. P. 136–151.
- [5] *Апрелов С.А., Сенков В.М., Герасименко Н.Н., Турьянский А.Г., Рыбачек Е.Н.* // Изв. вузов: Электроника. 2006. № 5. С. 27–34.
- [6] *Ulyanenko A., Sobolewski S.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. P. A235–A238.
- [7] *Parratt L.G.* // Phys. Rev. 1954. V. 95. P. 359–369.
- [8] *Nevot L., Croce P.* // Rev. Phys. Appl. 1980. V. 15. P. 761–779.
- [9] <http://www.sspectra.com/sopra.html>