

УДК 539.21:681.786.3

ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Д.А. Ким, Н.Ю. Сдобняков, Д.Н. Соколов, Е.А. Воронова, О.В. Михайлова, Т.Ю. Зыков

Тверской государственной университет

170002, Тверь, Садовый пер., 35

nsdobnyakov@mail.ru

Аннотация: В данной работе с использованием фотометрического спектроэллипсометра «Эльф» на основе анализа спектра эллипсометрических углов Δ и ψ было проведено определение толщины слоя SiO_2 на различных подложках.

Ключевые слова: эллипсометрия, диоксид кремния, наноразмерные пленки, толщина пленок, пространственный профиль пленок.

Введение

С течением времени методы измерения совершенствуются, добавляя новое в общепринятые основы и создавая новые методы с помощью современных технологий. В последние годы наука быстро продвигается в исследовании микро- и наноразмерных структур. Для успешного продвижения вперед в области нанотехнологий необходимо создание приборной базы, которая будет пригодной для научных исследований, и для технологического контроля в процессе производства. Причем, это может быть как создание новых методов исследования, так и совершенствование, и расширение областей применения существующих. Среди последних - такие общеизвестные методы, как электронная микроскопия [1], зондовая микроскопия [2], метод малоуглового рентгеновского рассеяния [3], а также относительно менее известные, к которым относится эллипсометрия [4]. Несмотря на свои большие возможности, этот метод не является общеизвестным. К современным технологиям методов контроля и исследования предъявляются такие требования, как бесконтактность, неразрушающий характер и оперативность измерения. Указанным требованиям в большинстве случаев удовлетворительно отвечает именно эллипсометрический метод исследования. Метод эллипсометрии относится к прогрессивным научно-экспериментальным нанотехнологиям, благодаря физической простоте работы с самыми простыми формами поляризованного когерентного света при эллиптической аппроксимации его полевых амплитудно-фазовых характеристик. На практике, метод показывает высокую чувствительность и информативность. Поверхность исследуемого образца остается чистой и не разрушенной. Измерения могут проводиться и в ходе процессов в вакууме, при высоких температурах и агрессивных условиях среды, что является незаменимым инструментом для контроля в процессе производства.

Метод и объекты измерений

Метод эллипсометрии основан на том, что свет после отражения от исследуемого образца изменяет свою форму поляризации. Основное уравнение эллипсометрии связывают между собой эллипсометрические параметры Δ и ψ и комплексные значения коэффициентов отражения по амплитуде R_p и R_s для p - и s - поляризованного света записываются в виде (индексы « p » и « s » соответствуют поляризации света в плоскости падения и перпендикулярно ей):

$$\rho = R_p/R_s = tg(\psi)e^{i\Delta}. \quad (1)$$

Отражённая волна формируется на границах контрастных сред, поэтому эллипсометрические измерения несут информацию об оптической структуре приповерхностной области и тех процессах, которые влияют на её оптические свойства.

Из уравнения (1) видно, что в процессе измерения определяются не абсолютные, а относительные величины – это является важным достоинством метода. По измеренным значениям Δ и ψ при решении обратной задачи эллипсометрии на основе выбранной модели рассчитываются оптические параметры поверхности образца. Глубина проникновения света зависит от поглощения материала и составляет, как правило, около сотни нанометров. Именно с такой глубины «считывается» вся полезная информация о структуре. Поэтому нет необходимости проводить послойное удаление материала, тем самым разрушая образец, чтобы измерить параметры глубинных слоев или делать его профилирование. Нужно только правильно расшифровать полученную информацию. Таким образом, данный метод с успехом может использоваться для контроля при ионной имплантации полупроводников [5], при измерении спектров оптических постоянных материалов [6], как аналитический метод контроля процессов синтеза [7], для контроля микроструктуры и квантово-размерной структуры материалов [8], качества поверхности [9], процессов абсорбции [10] и т.д. Объектами исследования могут служить тонкие пленки, поверхности различных материалов, в том числе анизотропных и жидких.

В данной работе с использованием фотометрического спектроэллипсометра «Эльф» было проведено определение толщины слоя SiO_2 , полученного разными способами на кремниевой подложке Si , а также проведено определение толщины слоя полимера на кремниевой подложке Si . Для произведения измерений были использованы следующие образцы:

– Образец №1 – слой диоксида кремния на кремниевой подложке,

полученный методом термического окисления. Необходимо отметить, что слой двуоксида кремния формируется обычно на кремниевой пластине за счет химического взаимодействия в приповерхностной области полупроводника атомов кремния и кислорода. Кислород содержится в окислительной среде, с которой контактирует поверхность кремниевой подложки, нагретой в печи до температуры $T = 900 - 1200^\circ\text{C}$. Окислительной средой может быть сухой или влажный кислород (рис. 1).

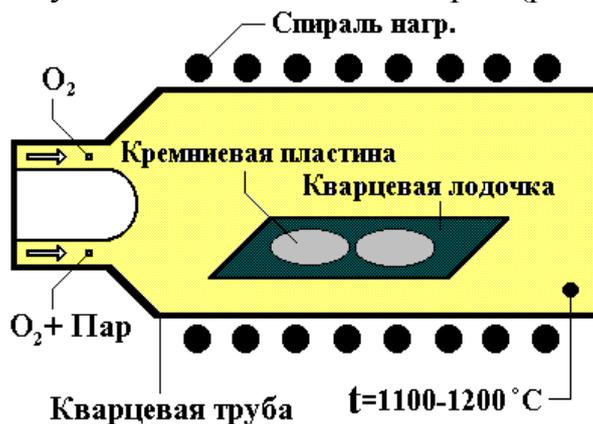


Рис. 1. Установка для получения образца (в современных установках пластины в подложкодержателе располагаются вертикально)

- Образец №2 – естественный слой диоксида кремния на кремниевой подложке, который образуется при низких температурах.
- Образец №3 – слой полимера на кремниевой подложке, полученный методом центрифугирования (метод нанесения тонких пленок, основанный на покрытии подложки раствором материала с последующим быстрым ее вращением, приводящим к испарению растворителя и образованию тонкой пленки).
- Образец №4 – слой диоксида кремния, напыленного на кремниевую подложку. Слой наносится напылением в вакууме, реактивным распылением в плазме кислорода.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены результаты измерений эллипсометрических углов ψ , Δ образца №1 в зависимости от длины волны света. Анализ полученных результатов позволяет сделать заключение, что толщина слоя диоксида кремния в этом случае имеет следующее значение $d = 683,59\text{ нм}$, с неоднородностью $dd = 25,7\text{ нм}$.

Для образца №2 были произведены измерения эллипсометрических углов ψ и Δ , в двух режимах – с компенсатором и без него (см. рис. 3). При измерении без компенсатора получено значение $d = 5,84\text{ нм}$, а толщина с компенсатором – $d = 3,87\text{ нм}$. Таким образом можно сделать вывод о том, что измерения одного и того же образца, проведенные с использованием

компенсатора, имеют меньше внешних «шумов» и позволяют получить более точные данные по толщине образца.

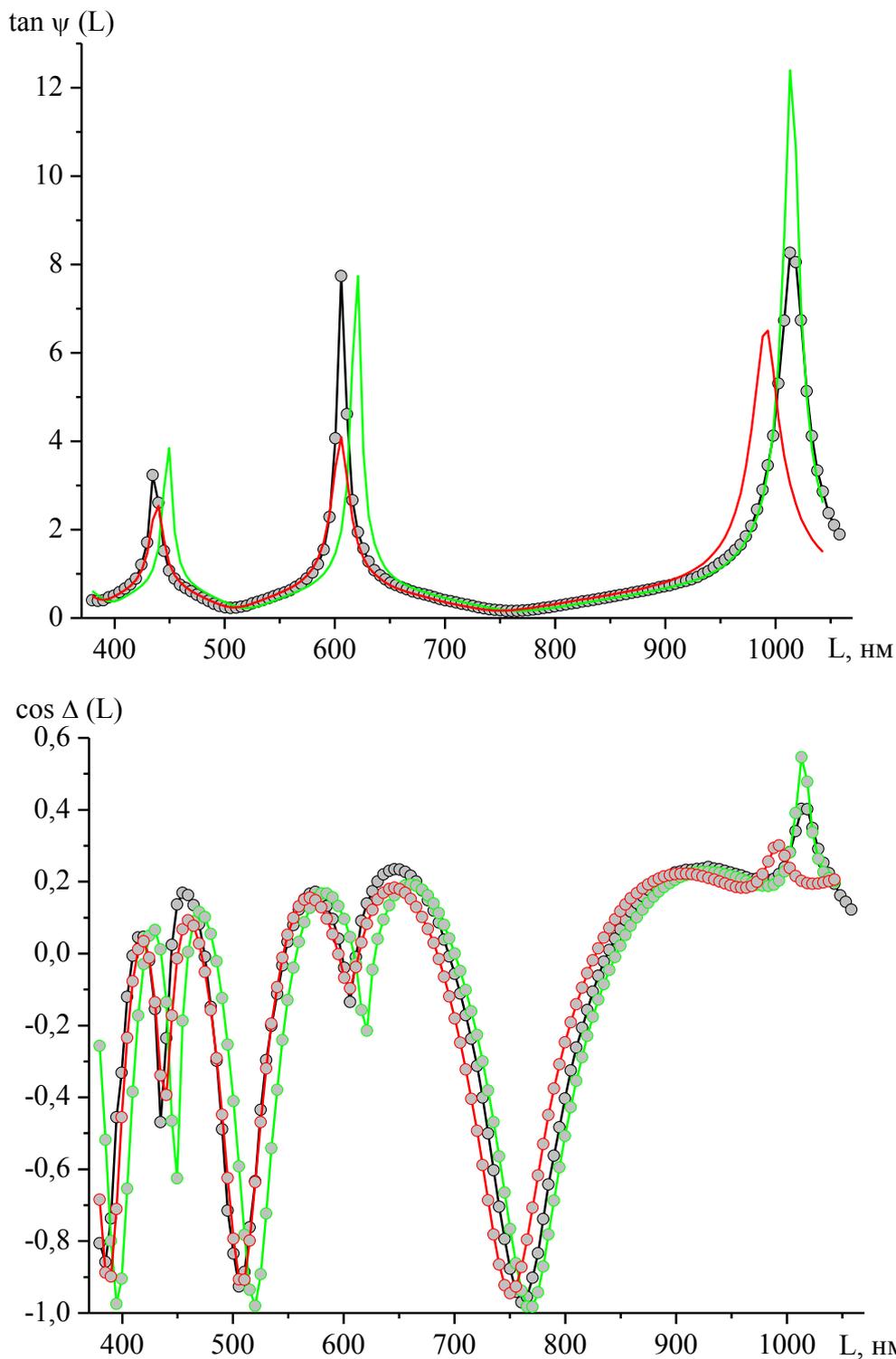


Рис. 2. Зависимости эллипсометрических углов ψ и Δ , слоя на кремниевой подложке, полученной методом термического окисления (образец №1). Черная кривая соответствует экспериментальным данным. Зеленая кривая соответствует подобранной в данной работе толщине и неоднородности. Красная кривая соответствует расчетным данным толщины и неоднородности

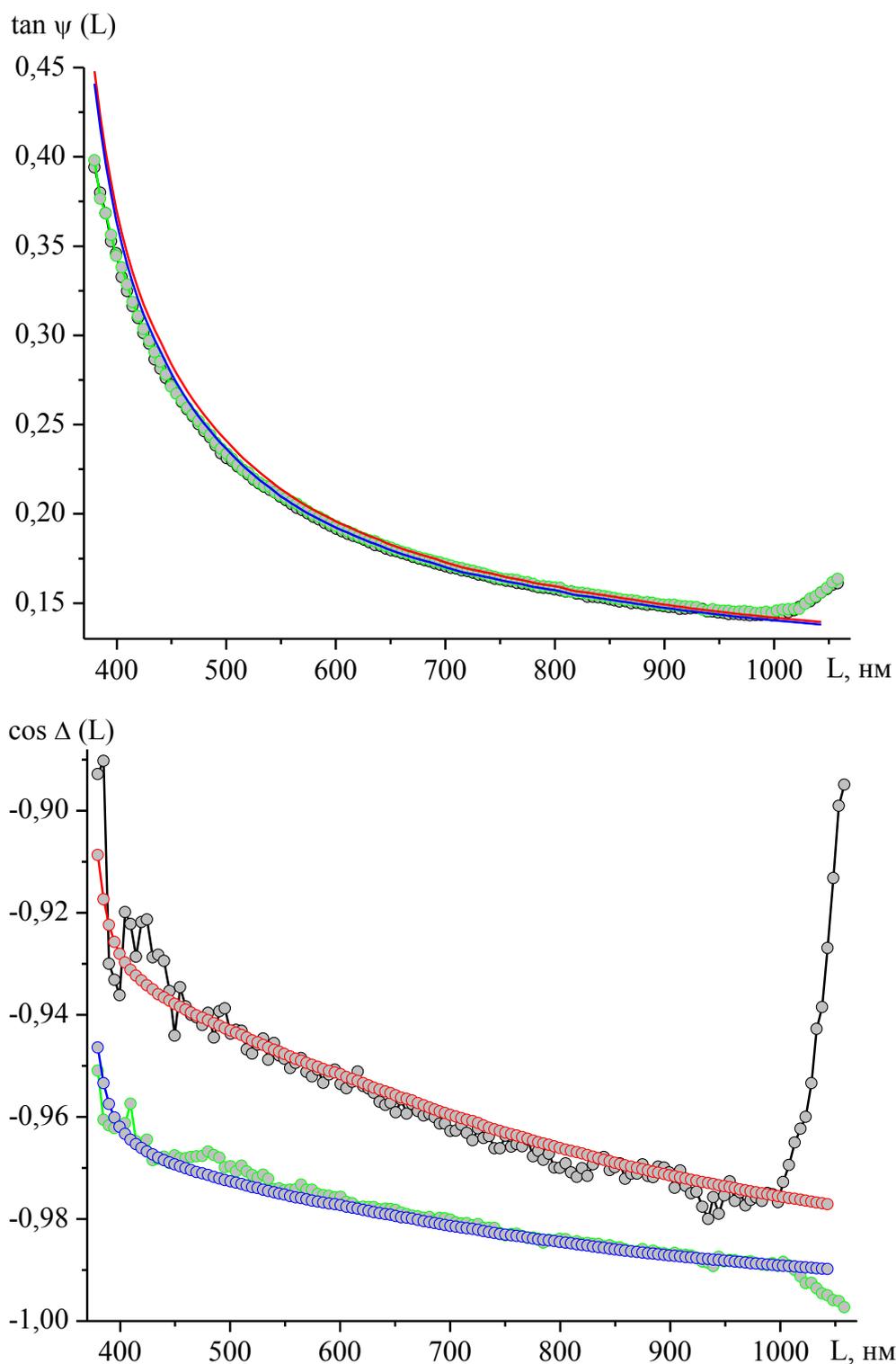


Рис. 3. Зависимости эллипсометрических углов ψ и Δ , слоя естественного оксида на кремниевой подложке (образец №2). Черная кривая соответствует экспериментальным данным для образца без использования компенсатора, а зеленая кривая соответствует измерению с использованием компенсатора. Красная и синяя кривые соответствуют расчетным данным толщины экспериментальных измерений

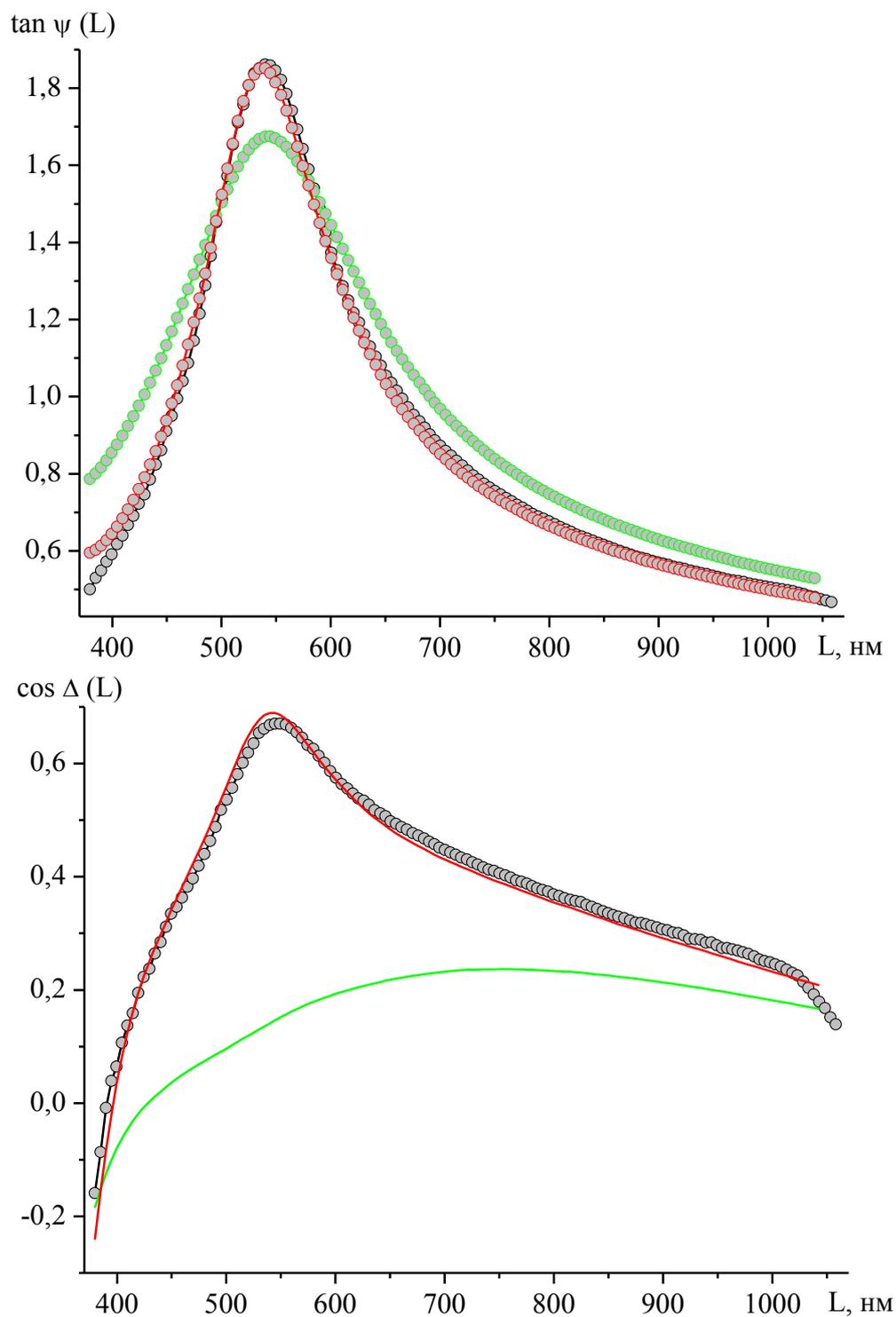


Рис. 4. Зависимости эллипсометрических углов ψ и Δ , слоя полимера на кремниевой подложке, полученный методом центрифугирования (образец №3). Черная кривая соответствует экспериментальным данным для образца. Зеленая кривая соответствует подобранной нами толщиной, неоднородностью и показателем преломления. Красная кривая соответствует расчетным данным толщины, неоднородности и показателя преломления

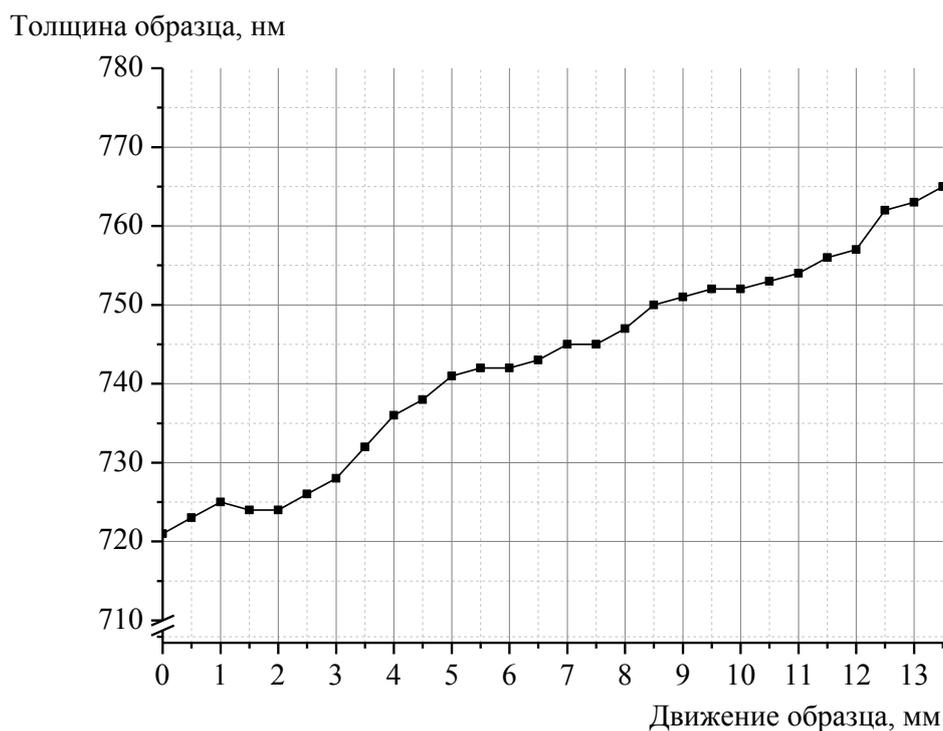


Рис. 5. Профиль толщины образца, слоя диоксида кремния, напыленного на кремниевую подложку (образец №4). Измерения толщины образца проводились от края до края с интервалом движения измеряемых участков 0,5 мм

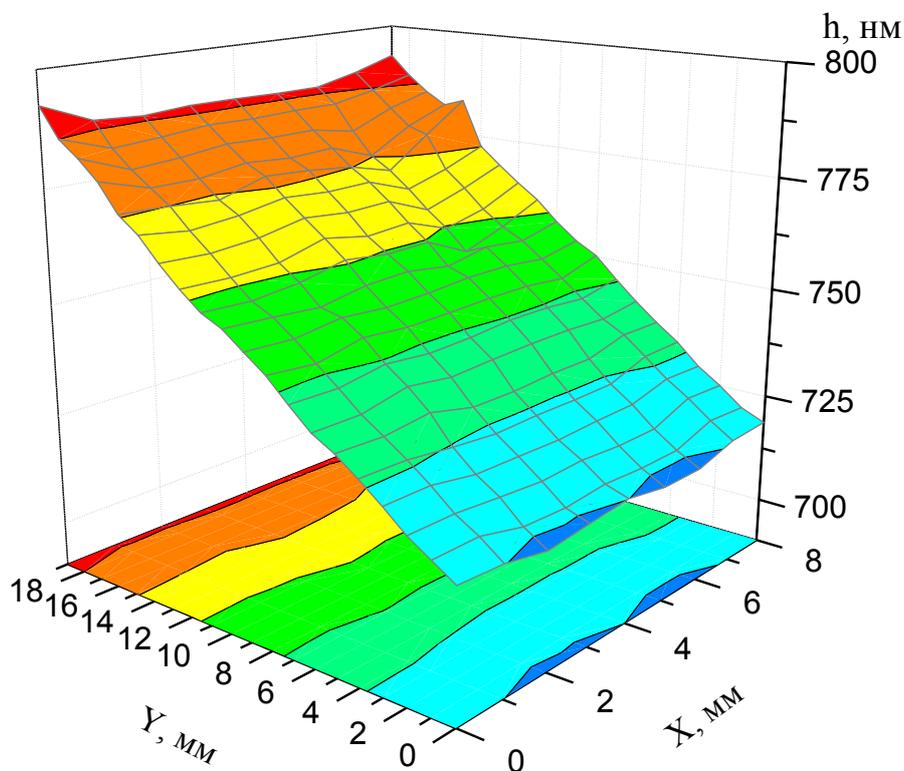


Рис. 6. 3D модель поверхности образца, слоя диоксида кремния напыленного на кремниевую подложку. Измерения проводились на участке размером 8×19 мм с шагом 1 мм

Зависимости эллипсометрических углов ψ и Δ , слоя полимера на кремниевой подложке, полученный методом центрифугирования, представлены на рис. 4 (образец № 3). Сравнивая рис. 3 и рис. 4 видно, что вещество полочки существенно влияет на характер зависимостей эллипсометрических углов. Анализ полученных данных, даёт следующие значения для толщины и неоднородности плёнки соответственно $d = 96,66$ нм, $dd = 30,6$ нм, а также показателя преломления $n = 1,675$. Таким образом, комбинацией следования слоев в пленочных структурах можно добиваться определенных оптических свойств для требуемых технологических режимов.

Одной из важных характеристик контролируемой методом эллипсометрии является изготовление профиля слоя с четко заданной толщиной (диапазоном допустимых значений). Возможности спектральной эллипсометрии хорошо видны в частности на примере исследования структур «кремний на изоляторе», с отсеченным слоем кремния, полученных методом сращивания (Smart-Cut технология) [7]. Нами получен профиль поверхности слоя SiO_2 на напыленной кремниевой подложке Si (см. рис. 5, 6). Анализируя этот профиль, можно прийти к выводу, что лишь на небольших участках поверхности образца можно получить приблизительно одинаковые значения оптических постоянных. При этом как отмечается в [7] спектры оптических постоянных исследуемых слоев тесно связаны с энергетической структурой кристаллов, и спектральная эллипсометрия широко применяется в качестве инструмента для исследования зонной структуры кристаллов.

Заключение

Эллипсометрия является прецизионным и неразрушающим средством исследования свойств и структуры перспективных для нанотехнологии материалов. Кроме того, эллипсометрия широко применяется в нанотехнологии как средство технологического контроля. При этом очень часто комплекс данных, получаемых с помощью эллипсометрии, не может быть получен никаким другим методом исследования. Методы электронной и зондовой микроскопии, достоинства которых в исследовании наносистем неоспоримы, дают информацию о локальных участках образца. Для множества задач хорошее пространственное разрешение этих методов является весьма ценным качеством. Однако в ряде случаев, например, при исследовании структуры нанокомпозитов или многослойных структур, часто требуется информация, обобщенная по плоскости образца. Эллипсометрия позволяет получать информацию о составе и структуре образцов, обобщенную по площади, но дифференцированную по глубине.

Кроме того, как показано в работе [11] для высокопреломляющих подложек нанесение специально подобранной диэлектрической пленки может существенно повысить чувствительность эллипсометрического метода для исследования нанослоев.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Библиографический список:

1. **Сушкин, Н.Г.** Электронный микроскоп / Н.Г. Сушкин. – М.-Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949. – 276 с.
2. **Миронов, В.Л.** Основы сканирующей зондовой микроскопии / В.Л. Миронов. – Нижний Новгород: РАН, Институт физики микроструктур, 2004. – 110 с.
3. **Свергун, Д.И.** Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние / Д.И. Свергун, Л.А. Фейгин. – М.: Наука, 1987. – 280 с.
4. **Ржанов, А.В.** Основы эллипсометрии / отв. редактор А.В. Ржанов, К.К. Свиташев и др. – Новосибирск: Наука, 1979. – 422 с.
5. **Зорин, Е.И.** Ионное легирование полупроводников / Е.И. Зорин. – М.: Энергия, 1975. – 128с.
6. **Андреев, С.В.** Определение оптических постоянных тонких металлических покрытий по спектрофотометрическим измерениям / С.В. Андреев, Н.Н. Карасев. // Тезисы докладов XXXI конференции ППС. – СПб: ГИТМО (ТУ), 2000.
7. **Рыхлицкий, С.В.** Эллипсометрия физико-химических процессов на межфазных границах / С.В. Рыхлицкий, В.А. Швец, Е.В. Спесивцев, Н.Н. Михайлов. // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2006. – Т.8. – №4. – С. 327-333.
8. **Свиташев, К.К.** Эллипсометрия: теория, методы, приложения / отв. редакторы К.К. Свиташев, А.С. Мардежов. – Новосибирск: Наука, 1991. – 253 с.
9. **Ржанов, А.В.** Эллипсометрия - метод исследования поверхности / отв. редактор А.В. Ржанов. – Новосибирск: Наука, 1983. – 180 с.
10. **Рамм, В.М.** Абсорбция газов / В.М. Рамм. – М.: Химия, 1976. – 655 с.
11. **Романенко, А.А.** О повышении чувствительности эллипсометрического метода исследования нанослоев / А.А. Романенко // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26. – Вып. 14. – С. 18-23.