

УДК 539.21:681.786.3

ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЁНОЧНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Д.А. Ким, Н.Ю. Сдобняков, Д.Н. Соколов, Е.А. Воронова
Тверской государственный университет, 170002, Тверь, Садовый пер. 35
nsdobnyakov@mail.ru

В данной работе с использованием фотометрического спектроэллипсометра «Эльф» было проведено определение толщины слоя SiO_2 на кремниевой подложке Si на основе сравнения эталонного экспериментального спектра эллипсометрических углов Δ и ψ с расчетным.

Введение

Совершенствование методов измерений является важнейшим фактором прогресса в любой области, как естественных наук, так и технологий. Если говорить о науке, то практически всякое новое знание так или иначе связано с повышением чувствительности, точности, или же расширением диапазона условий, в которых проводятся измерения. В технологии же уровни точности и достоверности измерений способны либо стимулировать развитие соответствующих отраслей, либо служить сдерживающим фактором. Это в полной мере относится и к нанотехнологии, бурно развивающейся в настоящее время во всем мире. В нанотехнологии, как нигде более, актуален тезис «если нельзя измерить, то невозможно создать».

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.

Одним из важных преимуществ данного метода является скорость измерения. Кроме того, метод оптической эллипсометрии обладает высокой чувствительностью к весьма слабым эффектам, имеющим место на границе раздела сред. Так, Арчер Гобели еще тридцать лет назад при исследовании хемосорбции кислорода на поверхности кремния эллипсометрическим методом смогли измерить адсорбционные покрытия с точностью до 0,02 монослоя. В настоящее время этот результат улучшен

более чем на порядок. Важно также отметить еще одно положительное качество – это отсутствие воздействия на исследуемый объект. Главная особенность метода – отсутствие возмущающего воздействия, что в совокупности с высокой чувствительностью делает его привлекательным для целого ряда применений в различных областях знаний: физике полупроводников, физики и химии поверхности, материаловедении, химии, биологии и других.

Можно отметить еще ряд существенных достоинств этого метода делают его крайне привлекательным. Прежде всего, универсальность данного метода исследования. Оптические константы (показатели преломления n и поглощения k), которые, в конечном счете, и определяют результат эллипсометрических измерений, есть фундаментальные характеристики вещества.

Любое внешнее воздействие приводит, как правило, к изменению оптических свойств измеряемого объекта. Поэтому с помощью метода эллипсометрии можно характеризовать широкий спектр физических параметров: состав композиционных соединений, плотность инородных нановключений, структурное совершенство материала, качество границ раздела; регистрировать изменения, обусловленные изменением температуры или воздействием электрических, магнитных, механических полей и многое другое. При этом, в отличие, например, от дифракции электронов, эллипсометрия одинаково хорошо применима, как к кристаллическим веществам, так и к аморфным. Можно еще добавить, что эллипсометрические измерения имеют высокую чувствительность: к изменению показателя преломления она составляет порядка 0,001, а к изменению толщины пленки достигает долей монослоя. При оптимизации условий эксперимента, приведенные значения улучшаются на порядок.

Еще одно важное свойство метода – это неразрушающее и невозмущающее воздействие измерений. Энергия зондирующих фотонов составляет всего несколько электрон-вольт. Их воздействие на исследуемую структуру пренебрежимо мало по сравнению, например, с электронным пучком, где энергия электронов на 3-4 порядка выше. Это делает возможным использование эллипсометрии для таких деликатных химических соединений, как белки, и даже для живых объектов в микробиологии.

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.

Экспериментальные исследования

Спектральная эллипсометрия является наиболее информативным методом. Она применяется для исследования физико-химических свойств поверхности и многослойных тонкопленочных структур и позволяет решать такие задачи как:

- ✓ измерение спектров оптических постоянных материалов, в том числе тонких пленок;
- ✓ изучение структурных свойств тонких пленок и межфазных границ;
- ✓ определение толщин и физических характеристик многослойных структур.

Эллипсометрический эксперимент предполагает:

- проведение измерений;
- создание оптической модели, адекватной исследуемой структуре;
- определение оптических параметров этой модели из сопоставления расчетных значений с экспериментом;
- определение физических характеристик исследуемой структуры.

В данной работе с использованием фотометрического спектроэллипсометра «Эльф» было проведено определение толщины слоя SiO_2 на кремниевой подложке Si на основе сравнения эталонного экспериментального спектра эллипсометрических углов Δ и ψ с расчетным. На рис. 1-4 представлены данные для эллипсометрических углов ψ , Δ слоя SiO_2 при различных значениях толщины d_1 и поправки dd , на кремниевой подложке Si , полученной методом термического окисления. Заметим, что для $\tan\psi$ имеется три ярко выраженных максимума при $L \sim 420, 620, 1000 \text{ нм}$. Максимальное значение $\tan\psi$ достигает порядка 9 ($\psi \sim 83^\circ$). Для зависимости $\cos\Delta(L)$ обнаруживается ряд максимумов и резко выраженных минимумов, причем $\min(\cos\Delta) \sim -1$, а для $\max(\cos\Delta) \sim 0,9$. Заметим, что на рис. 4 можно наблюдать почти полное совпадение экспериментального графика с графиком тестового образца (черная кривая).

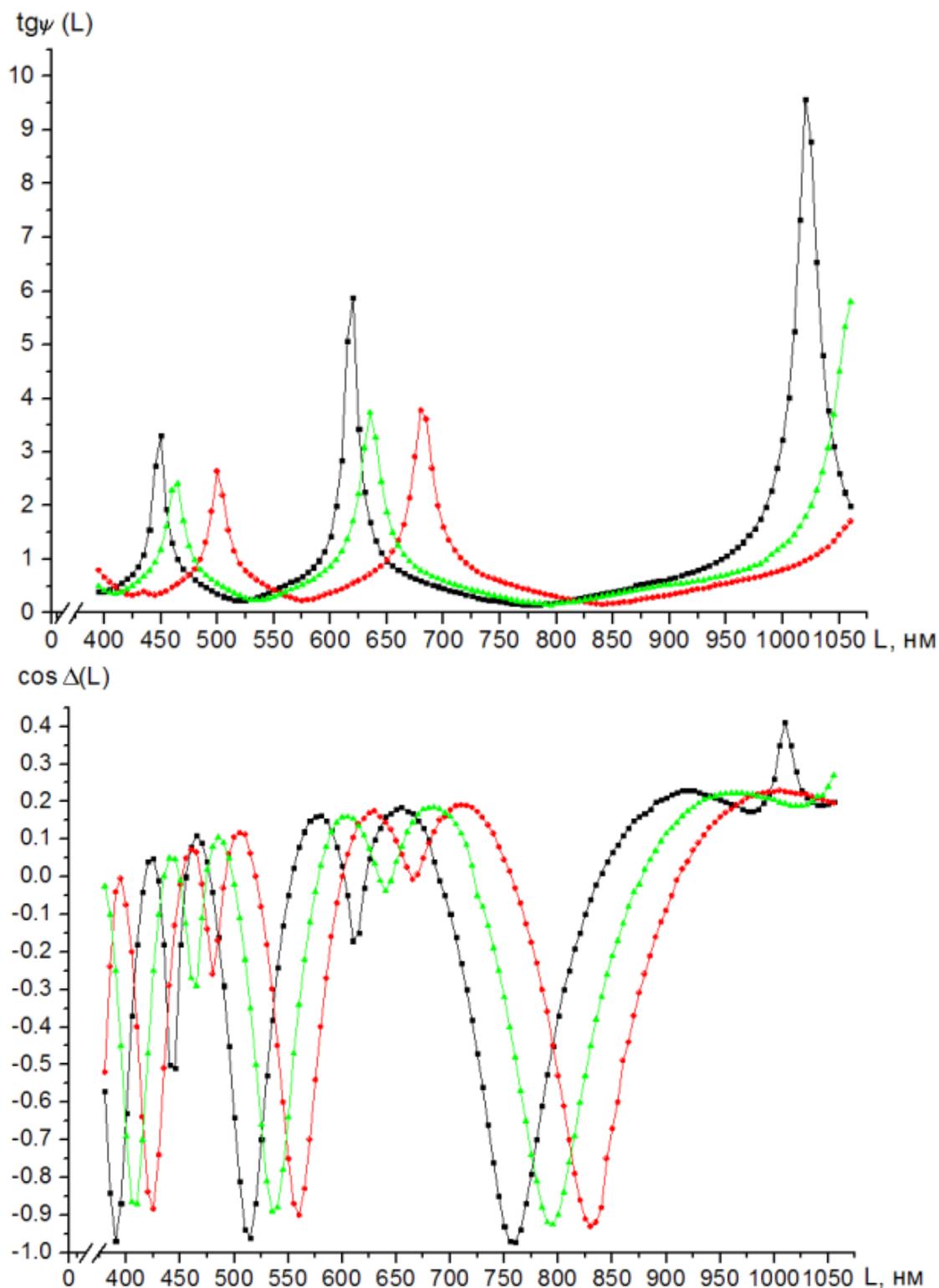


Рис. 1. Зависимости эллипсометрических углов ψ , Δ слоя SiO_2 на кремниевой подложке Si , полученной методом термического окисления. Измерение проводится при шаге равном 5нм . Для кривой 1 (зеленая кривая) были заданы параметры $d_1 = 750\text{нм}$ с учетом поправки $dd = 30\text{нм}$, для кривой 2 (красная кривая) - $d_1 = 730\text{нм}$, $dd = 30\text{нм}$.

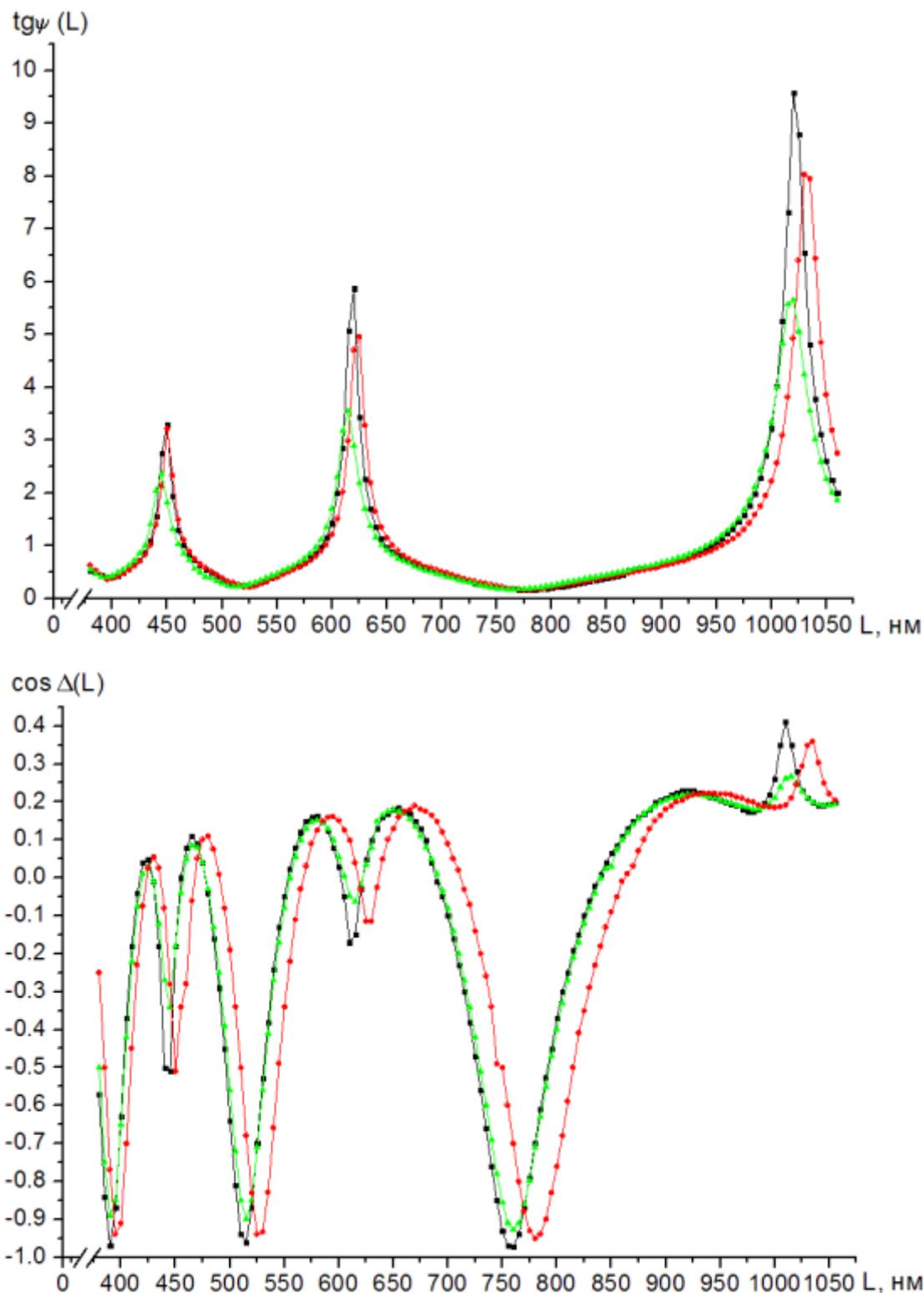


Рис. 2. Зависимости эллипсометрических углов ψ , Δ слоя SiO_2 на кремниевой подложке Si , полученной методом термического окисления. Измерение проводится при шаге равном 5 нм. Для кривой 1 (зеленая кривая) были заданы параметры $d_1 = 690 \text{ нм}$ с учетом поправки $dd = 30 \text{ нм}$, а для кривой 2 (красная кривая) - $d_1 = 700 \text{ нм}$, $dd = 20 \text{ нм}$.

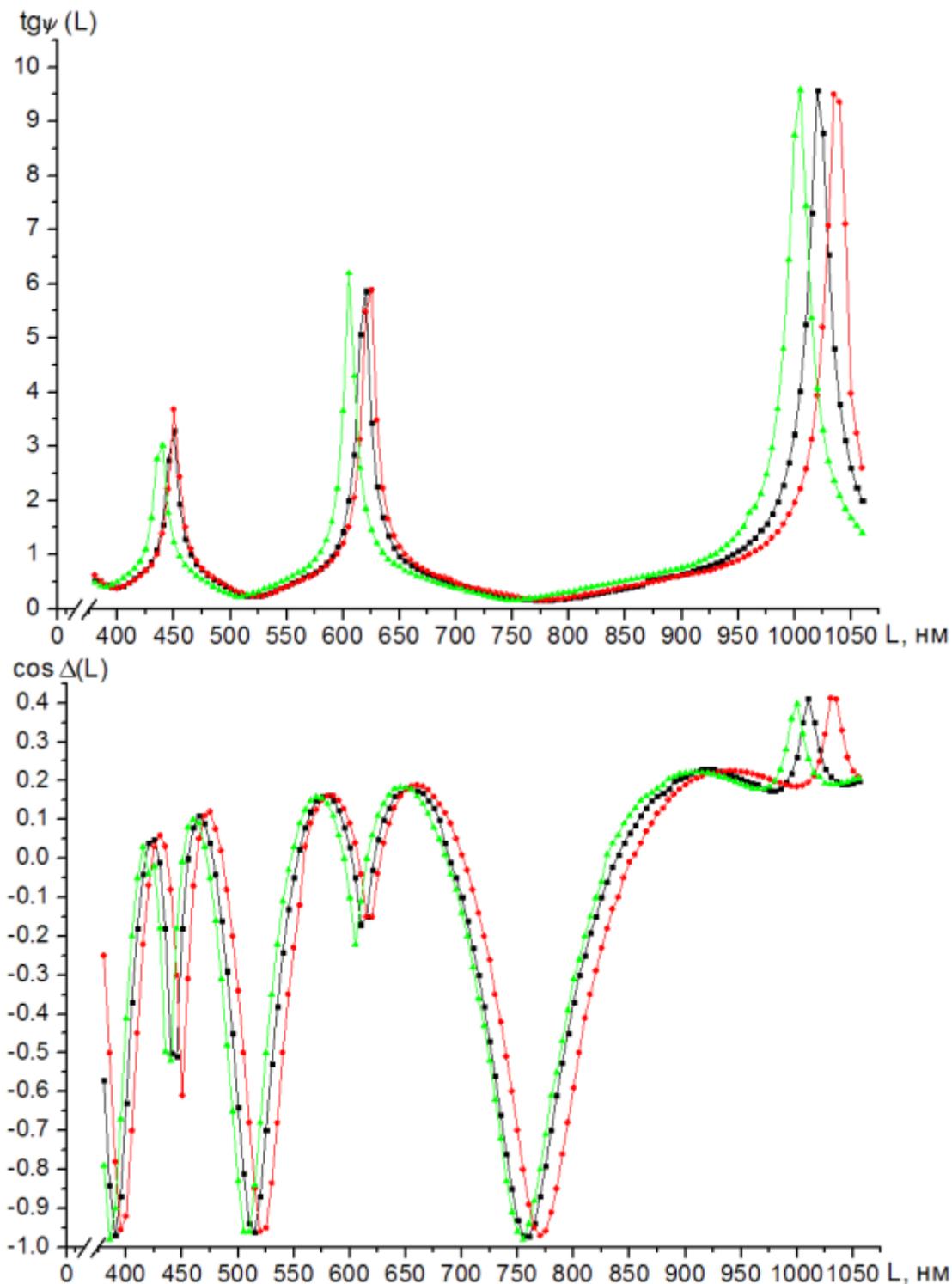


Рис. 3. Зависимости эллипсометрических углов ψ , Δ слоя SiO_2 на кремниевой подложке Si , полученной методом термического окисления. Измерение проводится при шаге равном 5нм . Для кривой 1 (зеленая кривая) были заданы параметры $d_1 = 700\text{нм}$ с учетом поправки $dd = 16\text{нм}$, а для кривой 2 (красная кривая) - $d_1 = 680\text{нм}$, $dd = 16,16\text{нм}$.

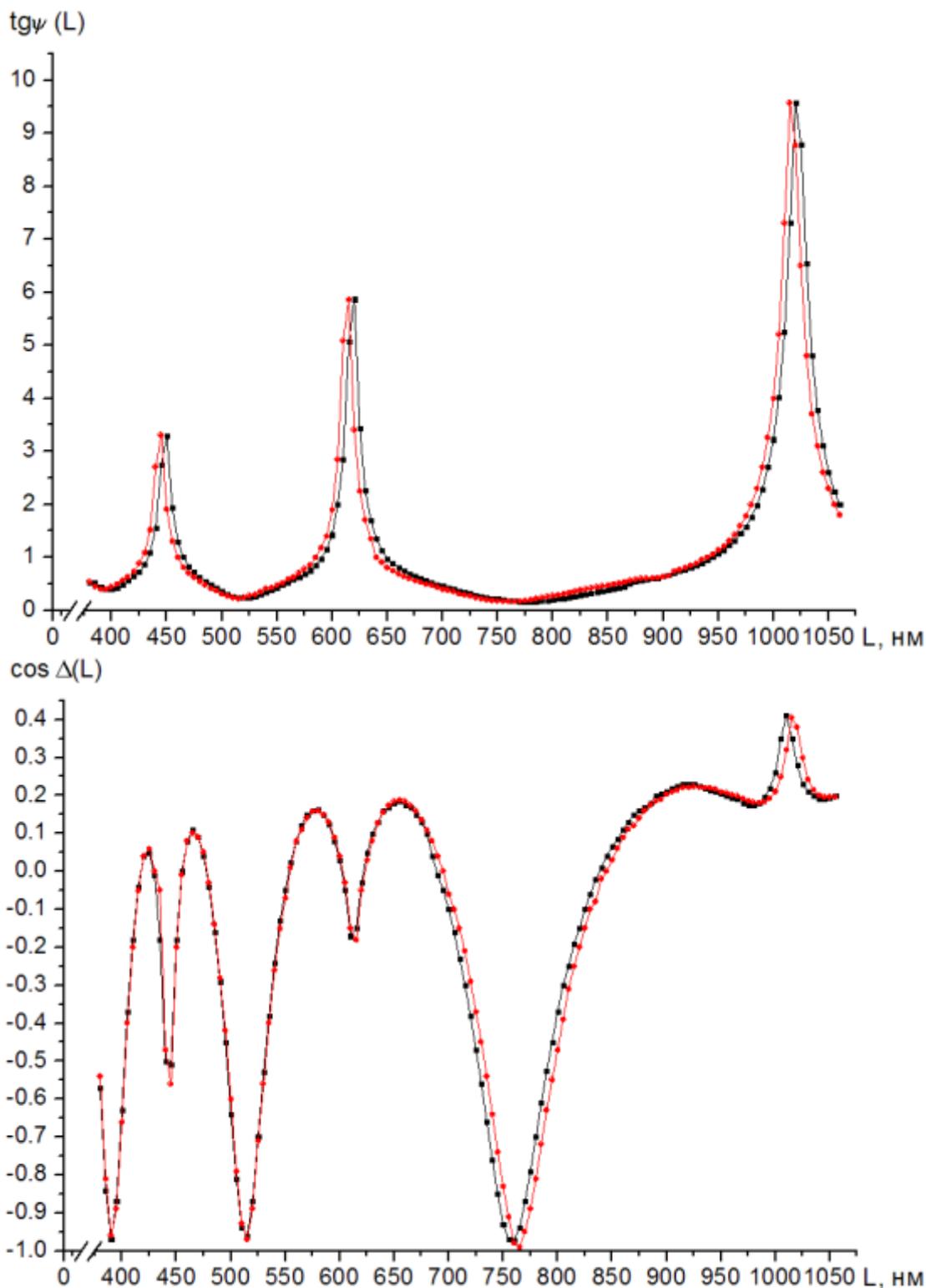


Рис. 4. Зависимости эллипсометрических углов ψ , Δ слоя SiO_2 на кремниевой подложке Si , полученной методом термического окисления. Измерение проводится при шаге равном 5нм . Экспериментальная кривая (красная кривая) были заданны параметры $d_1 = 689\text{нм}$ с учетом поправки $dd = 16,16\text{нм}$.

Обсуждение

Возможности спектральной эллипсометрии хорошо видны на примере исследования структур «кремний на изоляторе», с отсеченным слоем кремния, полученных методом сращивания (Smart-Cut технология) [7]. Измеренные спектры эллипсометрических параметров такой структуры показаны на рис. 5.

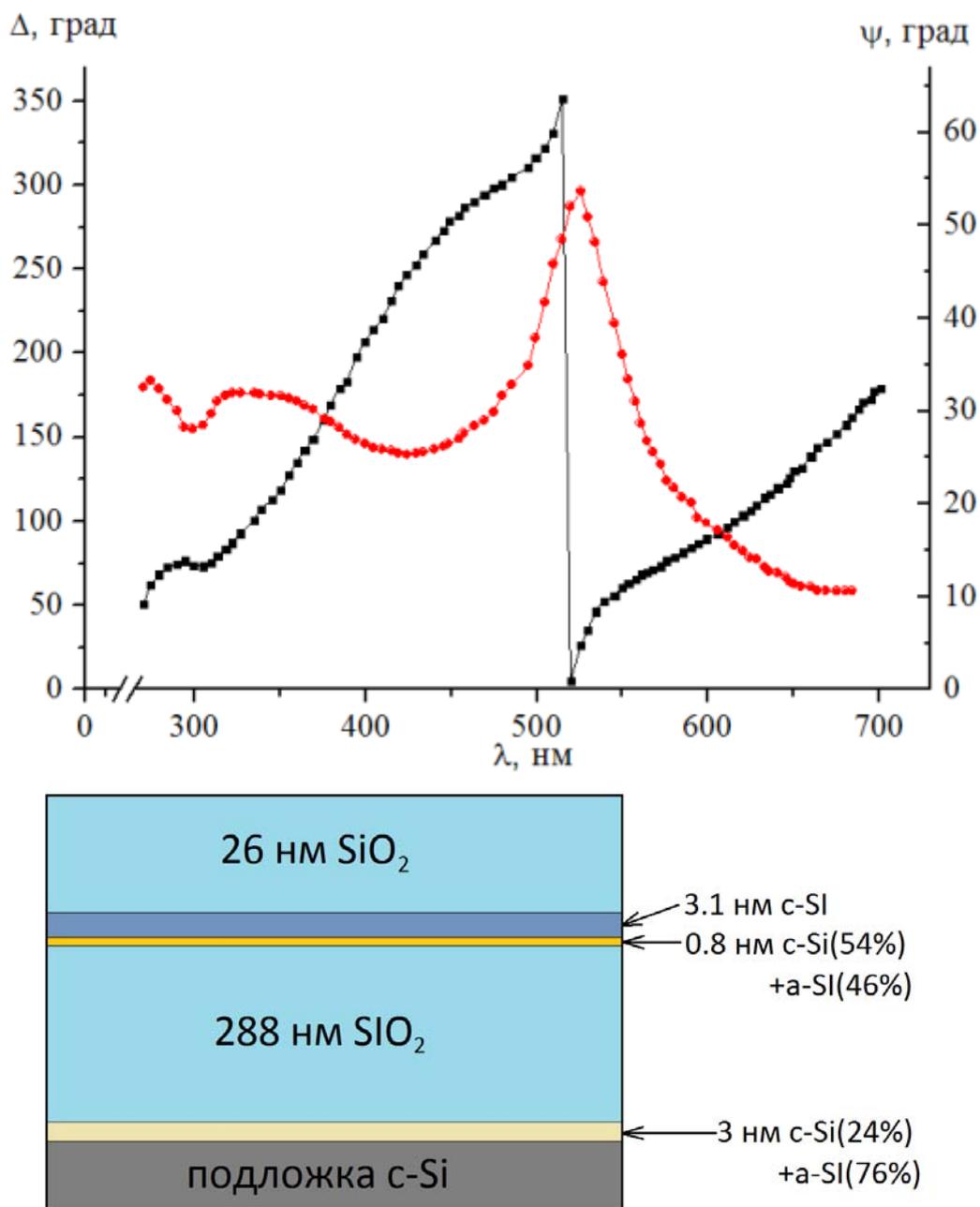


Рис. 5. Спектры эллипсометрических параметров для структуры «кремний на изоляторе» (верхний рисунок) и восстановленные по результатам эллипсометрических измерений значения параметров этой структуры (нижний рисунок).

Используя стандартную трехслойную модель $SiO_2/Si/SiO_2$ на кремниевой подложке удастся подобрать толщины всех трех слоев таким образом, чтобы максимально совместить измеренные спектры с расчетными. Однако при этом все равно имеет место некоторое расхождение между экспериментом и расчетом. Это расхождение удастся устранить только введением в модель переходных слоев на границах кремния и SiO_2 , состоящих из смеси аморфной и кристаллической модификаций кремния. В результате моделирования были найдены толщины переходных слоев и их состав при которых наблюдается полное совпадение экспериментальных и расчетных спектров. Результаты таких расчетов приведены на рис. 6-7. Точность определения искомым параметров составляет доли нанометра по толщине и несколько процентов по составу. Кроме того, в [7] отмечается, что спектры оптических постоянных исследуемых слоев тесно связаны с энергетической структурой кристаллов, и спектральная эллипсометрия широко применяется в качестве инструмента для исследования зонной структуры полупроводников, диэлектриков и металлов.

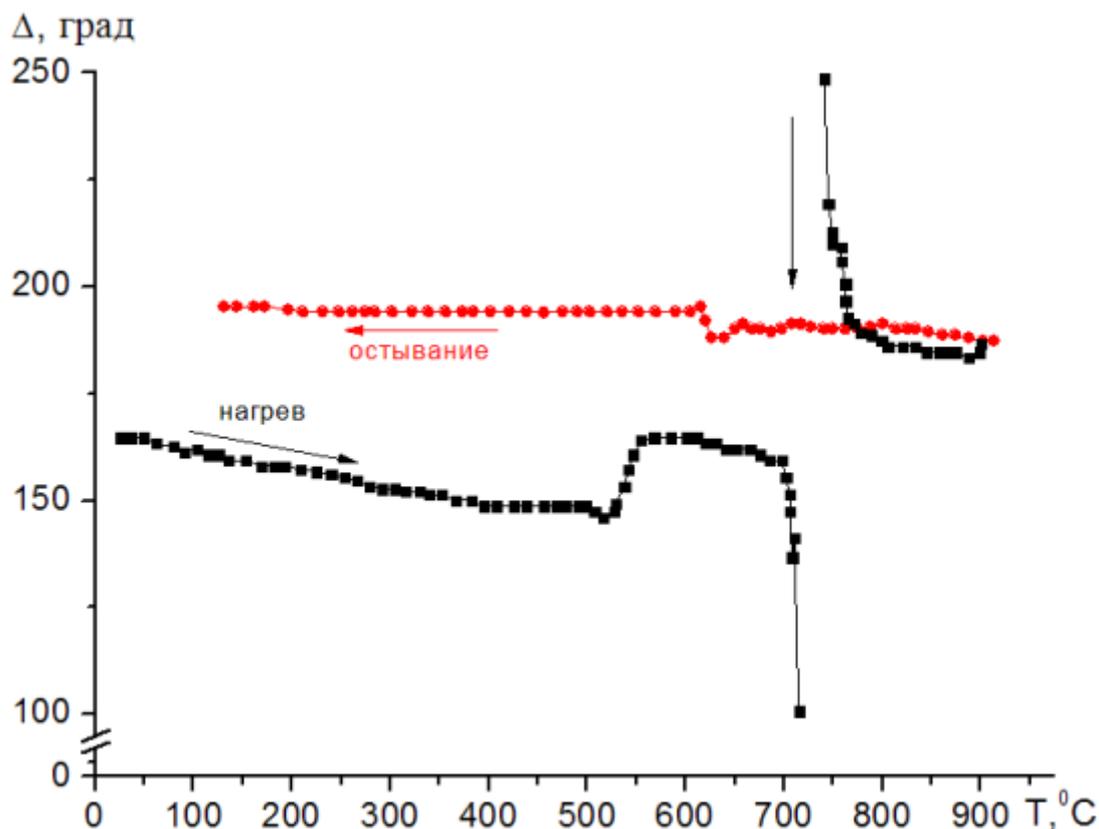


Рис. 6. Изменение параметра Δ , в процессе нагрева - охлаждения структуры $SiO_2/Ge/SiO_2/Si$. Стрелкой отмечены резкие изменения в Δ , соответствующие плавлению Ge .

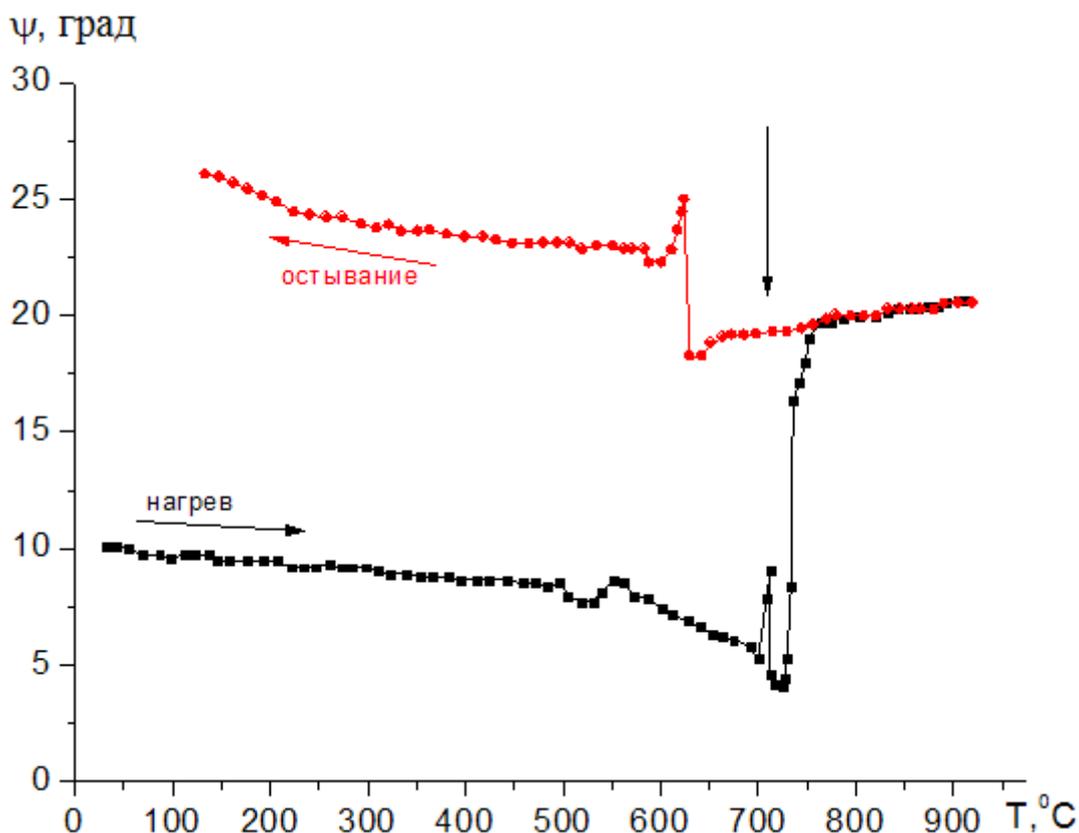


Рис. 7. Изменение параметра ψ , в процессе нагрева - охлаждения структуры $SiO_2/Ge/SiO_2/Si$. Стрелкой отмечены резкие изменения в ψ , соответствующие плавлению Ge .

Таблица 1. Требования к характеристикам фотометрического спектроэллипсометра

Характеристика	Диапазон
Спектральный диапазон длин волн:	380 – 1050 нм
Спектральное разрешение:	2,5 - 4 нм
Воспроизводимость и стабильность при измерении:	
- эллипсометрических углов ψ и Δ без микроприставки в диапазоне длин волн 400-1000 нм	не хуже $0,01^\circ$
- толщины, нм	не хуже 0,1
- показателя преломления	0,005 *)
Диапазон устанавливаемых углов падения:	$45^\circ - 90^\circ$ с интервалом $2,5^\circ$
Диапазон измеряемых толщин:	0,1 нм – 5 мкм*)
Время измерения на одной длине волны:	0,5-2,0 сек.
Дискретность измерений:	до 400 точек на спектр

*) для тестовой системы SiO_2/Si

Основные функции и технические характеристики фотометрического спектроэллипсометра «Эльф»:

- измерение толщины пленок и слоев в тонкопленочных структурах (металлы, полупроводники, диэлектрики, твердые и жидкие пленки;

- определение спектры оптических постоянных и диэлектрические свойства материалов и жидких сред в оптическом диапазоне;
- исследование структуры материалов с определением процентного соотношения компонентов в неомогенной системе, пористости, пространственной неоднородности, наличие дефектов, других характеристик);
- проведение анализ состояния поверхности и структуры тонких поверхностных слоев.

Прибор обеспечивает возможность построения пространственной карты вышеперечисленных характеристик.

Заключение

Примеры эллипсометрического исследования различных структур и процессов показывают высокую чувствительность метода и его информативность. В сочетании с мягким воздействием на изучаемый объект эллипсометрия в некоторых случаях выступает в качестве безальтернативного аналитического метода измерений, позволяющего решать задачи научного исследования и технологического контроля.

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.