

Монохроматическая эллипсометрия оксидных слоев на кремниевых пластинах, сформированных быстрым термическим отжигом

Д. В. Понкратов¹⁾, В. А. Пилипенко²⁾, Н. И. Стаськов¹⁾, А. Н. Петлицкий²⁾,
С. А. Мельников²⁾, А. Б. Сотский¹⁾, Л. И. Сотская³⁾, А. В. Шилов¹⁾,
Д. В. Шестовский²⁾

¹⁾ Могилевский государственный университет им. А. А. Кулешова, Могилев, Беларусь,
e-mail: d.v.ponkratov@yandex.by ; ni_staskov@mail.ru

²⁾ ГЦ «Белмикроанализ» научно-технического центра ОАО «Интеграл» - управляющая компания холдинга «Интеграл», Минск, Беларусь, e-mail: apetlitsky@integral.by

³⁾ Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь,
e-mail: li_sotskaya@tut.by

В результате термического отжига на поверхности полупроводниковой пластины образуется неоднородный слой, состоящий из ультратонкого контактного слоя, оксидного слоя и поверхностного слоя. Предложена функция, которая характеризует распределение диэлектрической проницаемости по толщине слоя и обеспечивающая устойчивое решение обратной эллипсометрической задачи при оптимальных углах падения света на неоднородный слой.

Ключевые слова: эллипсометрия неоднородного слоя, ультратонкие слои, метод покоординатного спуска, быстрый термический отжиг, кремниевая пластина.

Monochromatic ellipsometry of oxide layers on silicon wafers formed by rapid thermal annealing

D. V. Ponkratov¹⁾, V. A. Pilipenko²⁾, N. I. Staskov¹⁾, A. N. Pyatlitsky²⁾,
S. A. Melnikov²⁾, A. B. Sotsky¹⁾, L. I. Sotskaya³⁾, A. V. Shilov¹⁾, D. V. Shestovsky²⁾

¹⁾ Mogilev State A. Kuleshov University, Mogilev, Belarus,
e-mail: d.v.ponkratov@yandex.by, e-mail: ni_staskov@mail.ru

²⁾ State Center "Belmicroanalysis" Scientific and Technical Center of the JSC "INTEGRAL" – "INTEGRAL" Holding Managing, Minsk, Belarus, e-mail: apetlitsky@integral.by,

³⁾ Belarusian–Russian University, Mogilev, Belarus, e-mail: li_sotskaya@tut.by

As a result of thermal annealing, a heterogeneous layer is formed on the surface of the semiconductor wafer, consisting of an ultrathin contact layer, an oxide layer, and a surface layer. A function has been proposed that characterizes the distribution of dielectric permittivity across the thickness of the layer, ensuring a stable solution to the inverse ellipsometric problem at optimal angles of incidence of light on the heterogeneous layer.

Keywords: ellipsometry of heterogeneous layers, ultra-thin layers, coordinate descent method, rapid thermal annealing, silicon wafer.

Введение

В настоящее время в микроэлектронике стоит задача получения ультратонкой (менее 20 нм) диоксидной (SiO₂) пленки методом быстрой термической об-

работки (БТО) кремниевой (Si) пластины. С этой целью, после химико-механической полировки и травления, поверхность пластины облучается мощным некогерентным источником света импульсами секундной длительности. Для пленок SiO₂ толщиной 5 нм, выращенных при температурах ниже 1000 °С, исследования показали значительную неоднородность границы раздела Si-SiO₂, состоящую из аморфной и кристаллической фаз. В то же время для пленок, выращенных при температуре выше 1000 °С, граница раздела Si-SiO₂ однородна в пределах двухатомных слоев [1]. Рост пленки SiO₂ при БТО происходит из-за окисления Si и разрушения слоя, который образовался после химико-механической полировки и травления поверхности полупроводника. Представляет интерес состояние границы раздела пленка SiO₂-воздух. Так как материальный состав структуры подложка-пленка определен, для контроля слоев SiO₂ на пластине Si подходит монохроматический эллипсометр ЛЭФ-3М-1, работающий на длине волны $\lambda = 632.8$ нм. Эллипсометрия – неразрушающий оптический метод исследования поверхностей с использованием электродинамических моделей. Поскольку число таких моделей не ограничено, оптические характеристики (показатели преломления n и поглощения k) и толщины слоя (d) в их рамках могут не совпадать.

С развитием эллипсометрических методов усложнялись и электродинамические модели поверхностных слоев и подложки. В начале рассматривался однородный слой на известной однородной полупроводниковой подложке. Для тонкого по сравнению с длиной волны света ($d \ll \lambda$) слоя получена формула [2], по которой при одном угле падения можно определить d . Если d найдено из не оптических измерений, то аналитически можно определить показатели преломления (n_s) и поглощения (k_s) подложки [3]. В общем случае отражающей структуры однородный слой–подложка известное основное уравнение эллипсометрии

$$\tan \psi \exp(i\Delta) = r_p(\theta, n, k, d, n_s, k_s) / r_s(\theta, n, k, d, n_s, k_s), \quad (1)$$

где r_p и r_s – коэффициенты отражения от структуры волн p - и s -поляризации, θ – угол падения света, содержит пять неизвестных. Оказалось, что целевая функция в виде квадратичной невязки измеренных Δ_e , ψ_e и рассчитанных Δ_t , ψ_t углов имеет много минимумов, что затрудняет определение параметров n , k , d , n_s , k_s [4]. В [5] предложен подход к решению математически некорректной обратной задачи эллипсометрии сверхтонких поверхностных пленок, основанный на выборе определенных углов падения. Результаты численного эксперимента показали приемлемую точность оптимального решения при определении параметров сверхтонких пленок. В настоящей работе выполнен общий анализ особенностей обратной задачи по одновременному определению всех параметров отражающей структуры со сверхтонкой пленкой. Обсуждается решение обратных задач многоугловой монохроматической эллипсометрии по определению параметров неоднородного поверхностного слоя с пленкой SiO₂ на легированной бором кремниевой пластине марки КДБ-12, подвергнутой БТО.

Ранее в работе [6] было показано, что при условии $d \ll \lambda$ раскрыть структуру поверхностного слоя практически невозможно. Поэтому мы использовали простую модель, в которой диэлектрическая проницаемость ε изменяется по оси y (рис. 1) по кусочно-линейному закону

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \varepsilon_s \quad (y < -d - d_1 - d_2), \\ \varepsilon &= \varepsilon_s + (\varepsilon_f - \varepsilon_s)(y + d + d_1 + d_2) / d_1 \quad (-d - d_1 - d_2 < y < -d - d_1), \\ \varepsilon &= \varepsilon_f \quad (-d - d_1 < y < -d_2), \\ \varepsilon &= \varepsilon_f + (\varepsilon_a - \varepsilon_f)(y + d_2) / d_2 \quad (-d_2 < y < 0), \\ \varepsilon &= \varepsilon_a \quad (y > 0).\end{aligned}$$

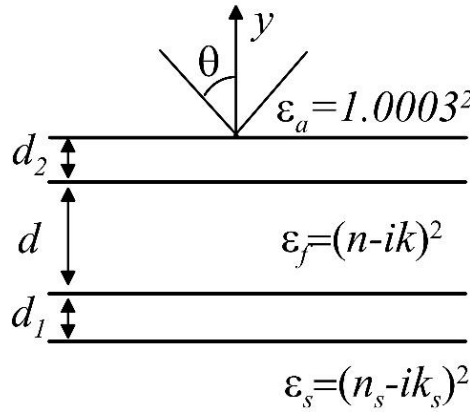


Рис. 1. Исследуемая структура

Параметры ε_s , ε_f , d_1 , d , d_2 определялись путем минимизации методом покоординатного спуска целевой функции

$$I(n_s, k_s, n_f, k_f, d_1, d, d_2) = \sum_{j=1}^m \left| (r_p / r_s)_j^{(e)} - (r_p / r_s)_j^{(t)} \right|^2, \quad (2)$$

где j – номер угла падения, $(r_p / r_s)_j^{(e)}$ – экспериментальные отношения коэффициентов отражения, определенные через измеренные значения поляризационных углов ψ и Δ на основании (1), $(r_p / r_s)_j^{(t)}$ – теоретические данные, рассчитанные методом стратификации.

1. Материалы и методы

В качестве образцов использовались пластины КДБ-12 ($N = 10^{15} \text{ см}^{-1}$, $\rho = 12 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) ориентации $\langle 100 \rangle$ диаметром 100 мм, полученные по методу Чохральского. Одну поверхность пластин подвергали механической обработке и в течение (3 ± 1) мин протравливали в растворе плавиковой кислоты. После этого проводилось азотирование методом БТО импульсами секундной длительности с разной продолжительностью. Эллипсометрические углы Δ , ψ всех образцов измеряли на ЛЭФ-3М-1 в области углов падения θ от 60° до 76° , содержащую угол Брюстера, с шагом 1° . Оценку геометрической толщины слоев, содержащих

слои SiO_2 осуществляли методом вторично-ионной масс-спектропии на установке ВИМС TOF.SIMS 5.

2. Результаты и обсуждение

Решения обратных (рис. 2) задач эллипсометрии отыскивались при всех углах падения (красная линия) и при углах с шагом 5° (синяя линия). Оказалось, что четырех углов достаточно для нахождения глобального минимума. На рис. 2 представлены функции $n(y)$ для двух образцов (*a* и *б*) с разным временем БТО. Толщина переходного слоя полужока–слой SiO_2 на рис. 2, *a* и рис. 2, *б* как и в работе [1] менее 1 нм. С увеличением времени БТО увеличивается толщина слоя от 6,86 нм (*a*) до 18,2 нм (*б*). Среднюю толщину слоев SiO_2 рассчитывали по снимкам, полученным на установке ВИМС TOF.SIMS 5. Для образца (рис. 2, *a*) она составляет 6,95 нм (рис. 3). Толщина переходного слоя SiO_2 –воздух (рис. 2) увеличивается от 1 нм до 2,4 нм с увеличением времени отжига.

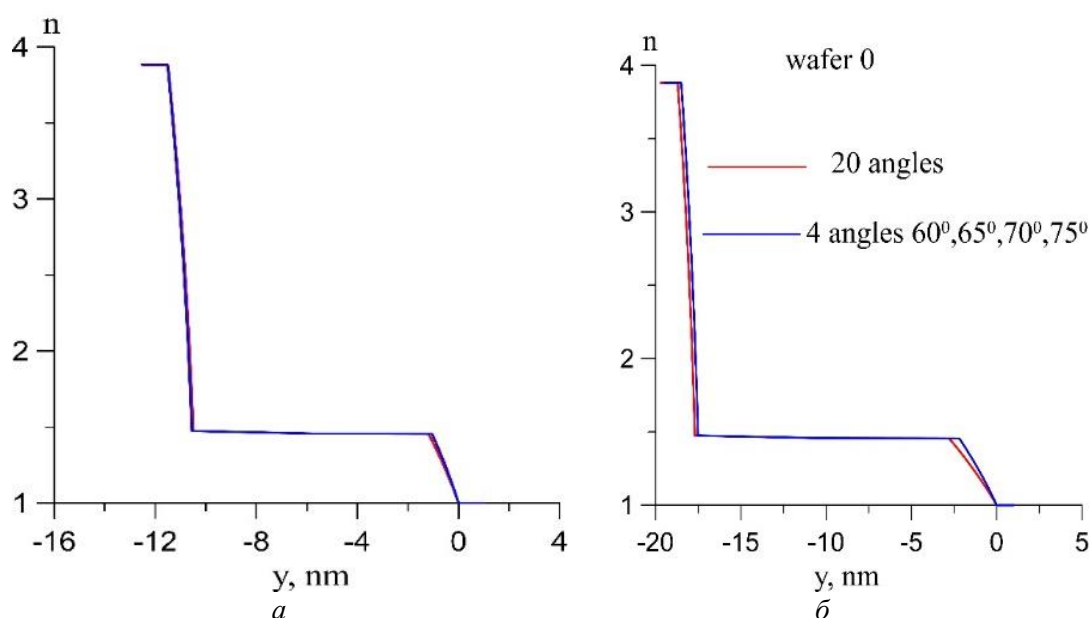


Рис. 2. Зависимости показателей преломления двух неоднородных слоев

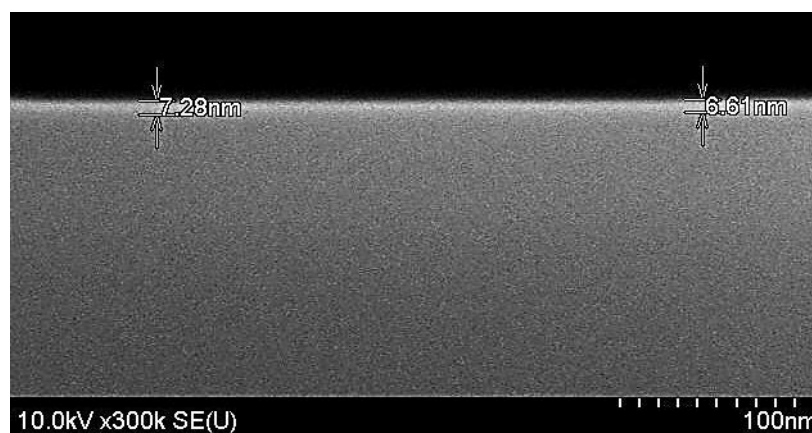


Рис. 3 Снимок образца (*a*)

3. Заключение

Предложена функция, которая характеризует распределение диэлектрической проницаемости по толщине слоя и обеспечивающая устойчивое решение обратной эллипсометрической задачи при оптимальных углах падения света на неоднородный слой. Разработанное программное обеспечение позволяет решать обратную задачу монохроматической эллипсометрии – находить структуру поверхностного слоя при БТО кремниевых подложек. Толщины слоев, оцененные неразрушающим методом эллипсометрии, подтверждаются разрушающим методом вторично-ионной масс-спектропии. Это позволит отработать технологию получения качественного слоя SiO₂ на подложках КДБ-12.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «1.15 Фотоника и электроника для инноваций».

Библиографические ссылки

1. *Агеев О. А.* Особенности получения тонких пленок SiO₂ методом быстрой термической обработки / О. А. Агеев, А. М. Светличный, Д. А. Шляховой // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2001. № 4–5. С. 38–43.
2. *Пшеницын В. И.* Эллипсометрия в физико-химических исследованиях / В. И. Пшеницын, М. И. Абаев, Н. Ю. Лызлов. Л.: Химия, 1986. 152 с.
3. *Горшков М. М.* Эллипсометрия. – Москва: Сов. радио, 1974. 200 с.
4. Accurate Ellipsometric Measurement of Refractive Index and Thickness of Ultrathin Oxide Film / Ауцров [et. al] // *J. Electrochem. Soc.* 2006. Vol. 153, iss.12. P. F277–F282.
5. *Семененко А. И., Семененко И. А.* О новых возможностях метода эллипсометрии, обусловленных "нулевой" оптической схемой: Эллипсометрия реальных поверхностных структур: 19. О выборе оптимального решения обратной задачи при исследовании сверхтонких поверхностных пленок // *Научное приборостроение*. 2010. Т. 20, № 4. С. 132–142.
6. Эллипсометрия подложки с наноразмерным поверхностным слоем / Д. В. Понкратов [и др.] // *Известия Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-матем. наук*. 2025. Т. 61, № 2. С. 128–138.