

РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ СЛОЯ СФОКУСИРОВАННЫМ СВЕТОВЫМ ПУЧКОМ

¹Могилевский государственный университет им. А. А. Кулешова, Могилев, Беларусь²Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь

Одним из эффективных методов когерентного оптического контроля параметров слоев на подложках является волноводная спектроскопия [1]. В данном методе сочетаются туннельное возбуждение мод слоя посредством призмы связи и регистрация мощности отраженного лазерного пучка. При указанном способе возбуждения пленок зондирующее оптическое излучение проникает в них в виде волноводных мод и взаимодействует с ними на наибольшем, по сравнению с альтернативными измерительными схемами, расстоянии. Этим определяется высокая чувствительность метода волноводной спектроскопии к параметрам слоев. Однако этот метод является контактным, что приводит к трудно контролируемому искажающему влиянию на результаты измерений призмы связи. Кроме того, эффективное туннельное возбуждение мод требует протяженной (сантиметрового порядка) области оптического контакта призмы связи с исследуемой структурой. Эта особенность исключает локальные измерения характеристик слоев, востребованные, в частности, в микроэлектронике.

В докладе показано, что названные ограничения можно преодолеть, используя бесконтактный вариант волноводной спектроскопии. В нем локальное зондирование слоя осуществляется за счет возбуждения в слое мод Ценнека ТМ, либо ТЕ поляризации сфокусированным лазерным пучком [2]. Ось пучка составляет угол Брюстера с нормалью к поверхности слоя. При определенных условиях распределение интенсивности отраженного от слоя пучка имеет, как и в стандартной волноводной спектроскопии, вид m - линии. Ее контур, измеряемый матрицей фотоприемников, весьма чувствителен к локальным характеристикам слоя. Обработка контура осуществляется методом наименьших квадратов без использования опорного сигнала и без механического вращения образца. Представлены оценки эффективности предлагаемого метода на примере исследования естественного оксидного слоя на поверхности кремния.

Оптическая схема бесконтактной волноводной спектроскопии представлена на рисунке 1.

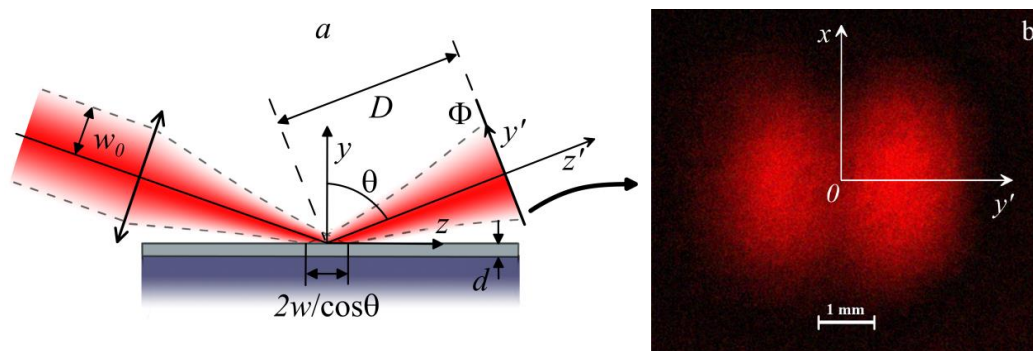


Рисунок 1 – Оптическая схема бесконтактной волноводной спектроскопии (а), фотография характерного распределения интенсивности отраженного m - линии в плоскости матрицы фотоприемников Φ (б).

Гауссов лазерный пучок амплитудного радиуса w_0 , значительно превышающего длину волны λ , фокусируется короткофокусным объективом на поверхность исследуемого слоя толщины d , находящегося на подложке. Радиус пучка в фокусе $w = 2f / (k_0 w_0)$, где f – фокусное расстояние объектива, k_0 – волновое число вакуум. Ось пучка составляет угол θ с нормалью к слою. Распределение интенсивности отраженного пучка $S(x, y')$ регистрируется матрицей фотоприемников Φ , расположенной на расстоянии D по оси пучка от поверхности слоя.

Для расчета функции $S(x, y')$, имеющей смысл компоненты вектора Пойнтинга, нормальной плоскости матрицы Φ , использовано строгое решение векторной электродинамической задачи об отражении когерентного светового пучка от слоистой среды [3]. В нем компоненты отраженного поля записываются в виде двукратных интегралов Фурье по пространственным частотам. Проблема быстрых осцилляций подынтегральных функций решается за счет преобразования интегралов в контурные на комплексных плоскостях. В таком представлении численный расчет распределения $S(x, y')$ не вызывает принципиальных затруднений. Кроме того, методом перевала получено аналитическое приближение для функции $S(x, y')$, необходимое для решения обратной оптической задачи о восстановлении параметров слоя.

На рис.2 приведены расчетные распределения интенсивности m - линий вдоль прямой, образованной пересечением плоскостей падения пучка и матрицы фотоприемников (это функции $S_n(y') = S(0, y')/\max[S(0, y')]$, соответствующие освещению естественного слоя оксида на поверхности кремния гауссовыми пучками гелий - неоновом лазера ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$) различных радиусов. При расчетах использованы известные дисперсионные таблицы материалов SiO_2 и Si и значение $D = 5\text{cm}$ и угол $\theta = 75.54^\circ$, равный углу Брюстера.

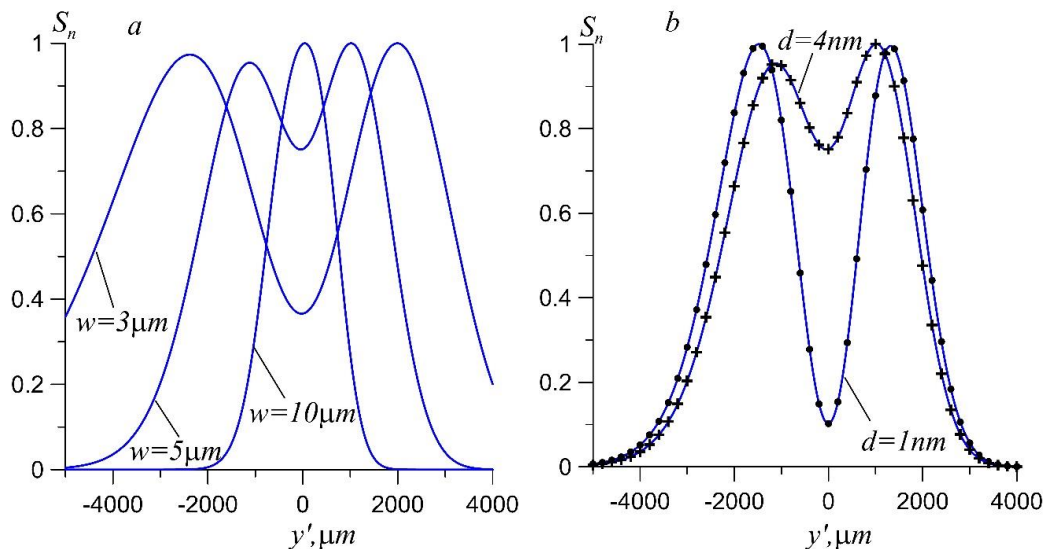


Рисунок 2 – Нормированные распределения интенсивности m - линий $S_n(y')$, регистрируемые матрицей фотоприемников при исследовании естественного слоя оксида толщины d на поверхности кремния: $a - d = 4\text{nm}$ и различные радиусы зондирующего пучка w , $b - w = 5\text{nm}$ и различные толщины оксида d , дискретные значки – строгий расчет, сплошные кривые – метод перевала.

Согласно рис.2а, контур m - линии существенно зависит от радиуса зондирующего пучка w . По мере увеличения w контур сглаживается и теряет особенности, позволяющие судить о параметрах исследуемого слоя. Рис.2б иллюстрирует экстремально высокую чувствительность контура m - линии к толщине наноразмерного слоя.

Для определения параметров слоя по регистрируемым функциям $S_n(y')$ можно использовать метод наименьших квадратов с целевой функцией

$$F(p_i) = \sum_{j=1}^L [S_n^{(e)}(y'_j) - p_1 S_n(p_2, p_3, p_4, y'_j)]^2,$$

где $i = 1, \dots, m$, m – число искомых параметров, y'_j – координаты в количестве L , отсчитанные вдоль m - линии, $S_n^{(e)}(y'_j)$ – результаты измерения функции $S_n(y'_j)$, $S_n(p_2, p_3, p_4, y'_j)$ – теоретическая модель этой функции. Далее предполагается, что $m = 4$, причем $p_2 = d, p_3 = n, p_4 = k$ (n и k – показатель преломления и поглощения слоя), p_1 – нормировочная постоянная; показатели преломления и поглощения подложки предполагаются известными.

Погрешности решения обратной оптической задачи δp_i допускают оценки [4]

$$|\delta p_i| \leq \max_j |\delta S_n^{(e)}(y'_j)| E_i, \quad E_i = \sum_{j=1}^L \left| \sum_{k=1}^m M_{ik}^{-1} \frac{\partial [p_1 S_n(p_2, p_3, p_4, y'_j)]}{\partial p_k} \right|,$$

где $\delta S_n^{(e)}(y'_j)$ - погрешности измерения значений $S_n^{(e)}(y'_j)$, M_{ik}^{-1} - матрица, обратная матрице

$$M_{ik} = - \sum_{j=1}^L \frac{\partial [p_1 S_n(p_2, p_3, p_4, y'_j)]}{\partial p_i} \frac{\partial [p_1 S_n(p_2, p_3, p_4, y'_j)]}{\partial p_k}.$$

Минимизации коэффициентов ошибок E_i достижима за счет выбора условий измерений [4]. Рис.3 иллюстрирует влияние на коэффициент ошибки определения толщины слоя E_2 параметров зондирующего пучка w , θ , а также ширины диапазона $\Delta y'$ сканирования y' . При $w = 5.01 \mu m$, $\Delta y' = 3878 \mu m$, $\theta = 75.54^\circ$ имеем минимальное значение $E_2 = 0.0091 \mu m$. В этом случае при достижимом экспериментально $\max_j |\delta S_n^{(e)}(y'_j)| = 0.0005$ ошибка измерения толщины слоя $|\delta p_i| < 0.05 nm$. Для сравнения, в классической схеме, основанной на регистрации угловой зависимости энергетического коэффициента отражения параллельного пучка минимальное значение E_2 для рассматриваемой структуры составляет $1.63 \mu m$.

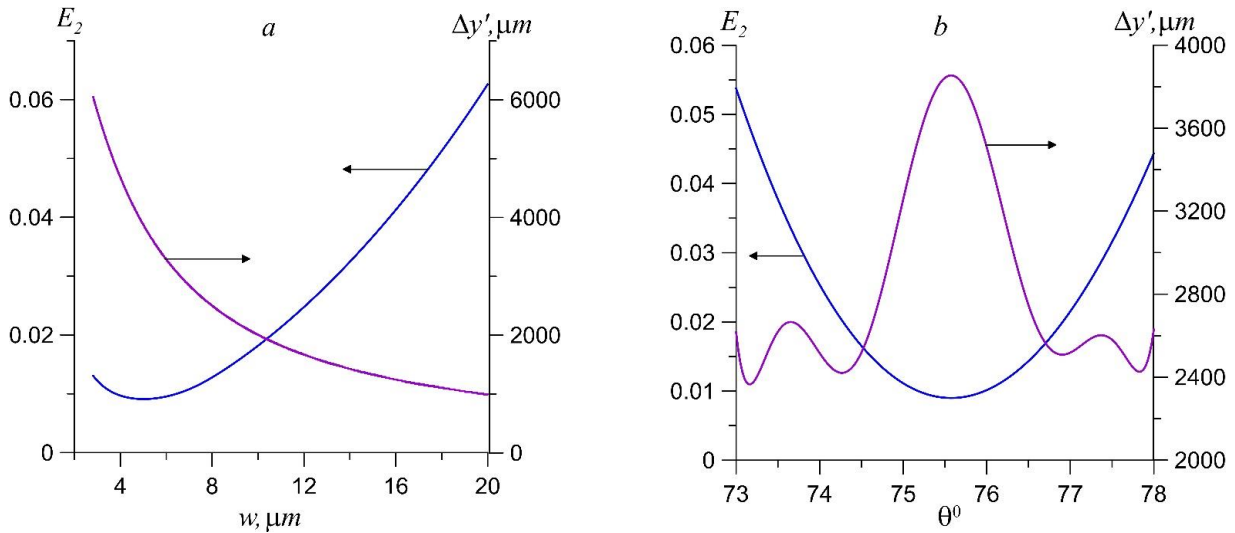


Рисунок 3 – Влияние выбора параметров возбуждающего пучка на коэффициент ошибки восстановления толщины окисного слоя на поверхности кремния.

Представленные в настоящей работе соображения подтверждены нами экспериментальными исследованиями оксидных слоев на поверхности кремниевых пластин.

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

Список литературы

1. Khomchenko, A.V. Waveguide spectroscopy of thin films. - New York: Acad. Press, 2005. - 220 p.
2. Сотский А.Б., Назаров М.М., Михеев С.С., Сотская Л.И. Чувствительность отражательных терагерцовых сенсоров водных растворов // Журнал Технической Физики. – 2021, том 91, вып.2. С.315 – 325.
3. Сотский, А.Б. Теория оптических волноводных элементов. - Могилев: УО «Могилевский государственный университет им. А.А. Кулешова», 2011. – 456 с.
4. Сотский А.Б., Штейнгарт Л. М., Парашков С. О., Сотская Л. И. О выборе диапазонов измерения отражательной способности призмы связи при волноводной спектроскопии тонких пленок // Известия РАН. Серия физическая. – 2016. – Т. 80, № 4. – С. 465–469.