

# ВЛИЯНИЕ ВЫБОРА МИНИМИЗИРУЕМОГО ФУНКЦИОНАЛА НА ТОЧНОСТЬ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ

С. Н. Свиташева

*Институт физики полупроводников СО РАН, 630090, Новосибирск*

УДК 535.51;39

Создание современных наноструктур в физике полупроводников невозможно без целого ряда методов контроля. Одним из мощных оптических методов является эллипсометрия. Интерпретация результатов измерений состоит в решении обратной задачи эллипсометрии, которая, как правило, является плохо обусловленной. Выбор минимизируемого функционала — ключевой фактор при ее численном решении. Знание точных значений толщины пленки и комплексного показателя преломления очень важно, потому что они определяют надежность работы устройства. В этой статье предлагается анализ влияния формы функционала, как критерия точности, на решение обратной задачи эллипсометрии, и рассматриваются трудности получения точных результатов.

**Ключевые слова:** обратная задача, эллипсометрия, оптические свойства, нано размерные пленки.

## Введение

Эллипсометрические измерения являются косвенными, то есть, измеренные величины (эллипсометрические углы  $\Psi$  и  $\Delta$ ) не характеризуют непосредственно интересующие исследователя параметры объекта (показатели преломления, толщины слоев, наличие шероховатости и т. д.). Преимущество метода эллипсометрии перед другими оптическими методами состоит в том, что одновременно измеряются амплитуда и фаза электромагнитных волн, которые отражаются от поверхности пленок. Практические трудности появляются в случае сильно поглощающих пленок, например, металлов и некоторых полупроводников. Автор неоднократно обращал свои усилия на разработку новых подходов решения ОЗЭ — обратной задачи эллипсометрии [1, 2, 3, 4].

## 1 Этапы вычисления

Интерпретация результатов измерений начинается, прежде всего, с поиска аналитического решения, что возможно только в редких случаях. Численное решение состоит, как правило, из трех этапов. Сначала выбирается **физическая** модель объекта, описываемая некоторым набором  $\mathbf{P} = P_1, P_2, \dots, P_m$  параметров, часть которых может быть известна. На втором этапе выбирается **математическая** модель представления свойств исследуемой системы (диэлектрической проницаемости, например). На третьем этапе находится **набор значений параметров**, наилучшим образом соответствующий набору экспериментальных данных. Для реализации третьего этапа необходимо задать критерий (меру) точности описания экспериментальных величин данным набором параметров. Этим критерием является функция ошибок  $\chi^2$  или «целевая функция» (merit function, objective function or error function) выраженная, как правило, суммой квадратичных невязок (отклонений) между экспериментальными данными и рассчитанными согласно выбранным моделям. Таким образом, функция ошибок устанавливает точность соответствия между точкой (или набором точек) экспериментальных данных и точкой (или набором точек) в многомерном пространстве параметров. В идеальном случае для идеальной исследуемой системы **функция ошибок**  $\chi^2$  должна равняться нулю, что может быть реализовано только в машинном эксперименте и то, если не заданы «шумы измеренных» величин. С точки зрения математики в качестве функции ошибки может использоваться любая функция имеющая глобальный минимум только при точном совпадении модельных значений и экспериментальных данных.

## 2 Влияние выбора критерия точности

На практике выбор  $\chi^2$  влияет на результаты решения ОЗЭ. Это влияние оказывается двумя способами. *Во первых*, на скорость сходимости выбранной  $\chi^2$  и, следовательно, при одном и том же количестве итераций критерий останова будет соответствовать различным величинам  $\chi^2$ , то есть различным значениям найденных параметров. *Второй способ* влияния выбора  $\chi^2$  состоит в следующем: кроме глобального минимума почти все функции ошибок могут иметь различное количество **локальных минимумов**. Если критерий останова сработает при достижении локального минимума, то решение ОЗЭ будет не только неверным, но и весьма далеким от истины. До сих пор остается нерешенным вопрос: "Какую функцию ошибки следует использовать? И какая функция ошибок "лучше"?" На основе какого критерия следует выбирать (сравнивать) функцию ошибки? В случае ОЗЭ измеряемые углы  $\Psi$  и  $\Delta$  характеризуют комплексную величину  $\rho$  — относительного коэффициента отражения. Для комплексных величин адекватным топологическим представлением является сфера Пуанкаре [Poincaré Н.], представляющая различные состояния поляризаций отражённого света: *лево-, право циркулярно поляризованный свет; и линейно поляризованный свет*. Кроме того на сфере Пуанкаре наглядно отображаются параметры эллипса (*азимут и эллиптичность*) *эллиптически поляризованного света; и связь параметров эллипса с параметрами Стокса, определяющими интенсивности различных компонент отраженного света и степень его деполаризации*. Полностью или частично поляризованный свет можно описать с помощью **4-вектора Стокса**  $S$ , имеющего компоненты:  $S_0, S_1, S_2, S_3$ , и определяемого в Декартовых координатах для электромагнитной волны с компонентами  $E_x e^{i\delta x}$  и  $E_y e^{i\delta y}$ , следующим образом [5]:

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}, \quad \begin{aligned} S_0 &= \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle = I_0, \\ S_1 &= \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle = I_x - I_y, \\ S_2 &= 2 \langle E_x E_y \rangle \cos(\delta_x - \delta_y) = I_{\pi/4} - I_{-\pi/4}, \\ S_3 &= 2 \langle E_x E_y \rangle \sin(\delta_x - \delta_y) = I_r - I_l, \end{aligned} \quad \begin{aligned} S_0^2 &= S_1^2 + S_2^2 + S_3^2, \\ P &= \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} / S_0, \\ \xi &= \frac{1}{2} \arcsin S_3 / \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}, \\ \theta &= \frac{1}{2} \arctg \frac{S_2}{S_1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $I$  — интенсивности световой волны,  $P$  — степень поляризации,  $\xi$  и  $\theta$  — эллиптичность и азимут поляризованного света. Кроме того, с помощью  $4 \times 4$  матрицы Мюллера можно определить степень *деполаризации* света. Если перейти к нормированному вектору Стокса  $s$ , то любой поляризующий элемент изменит состояние поляризации, которое описывается новым вектором Стокса  $s'$ , преобразованным умножением на матрицу Мюллера, состоящей из 16 элементов.

На вход измерительного прибора падает свет с круговой поляризацией (или циркулярно поляризованный), чтобы интенсивность прошедшего света не зависела от азимута собственной плоскости поляризатора. В нуль-эллипсометрах задается комбинация азимутов  $P$  и  $C$  чтобы получить такую эллиптическую поляризацию света, которая дает линейно поляризованный свет при отражении от *объекта*, и тогда может быть найден ортогональный азимут гашения анализатора. Следовательно, интенсивность на выходе нуль-эллипсометра равна нулю (в идеальном случае) или близка к нулю (для большинства измеряемых отражающих систем).

В ненулевых (фотометрических) эллипсометрических методах измерения интенсивность светового пучка на выходе эллипсометра определяется при нескольких комбинациях азимутов оптических элементов *поляризатора*  $P$ , *модулятора-компенсатора*  $M$ , *анализатора*  $A$ . Ненулевые методы широко используются при автоматизации измерений и мониторинге (с обратной связью) процессов изготовления стратифицированных структур для современных приборов и устройств. Уравнения (2–3) определяют *амплитудную* и *фазовую* передаточные функции (ATF и PhTF) измеряемой системы и содержат тригонометрические функции и функции Бесселя, что затрудняет аналитическое решение системы уравнений.

$$\begin{aligned} I(\lambda, t) &= I [I_0 + I_s \sin \delta(t) + I_c \cos \delta(t)], \\ \begin{cases} I_0 = 1 - 2 \cos 2\Psi \cos 2A + \cos 2(P - M) \cos 2M (\cos 2A - \cos 2\Psi) + \\ \quad + \sin 2A \cos \Delta \cos 2(P - M) \sin 2\Psi \sin 2M, \\ I_s = \sin 2(P - M) \sin 2A \sin 2\Psi \sin \Delta, \\ I_c = \sin 2(P - M) [\sin 2M (\cos 2\Psi - \cos 2A) + \sin 2A \cos 2M \sin 2\Psi \cos \Delta]. \end{cases} \\ \delta(t) \simeq A \sin \omega t, \quad \begin{cases} \sin \delta(t) = 2J_1(A) \sin \omega t + 2J_3(A) \sin 3\omega t + \dots, \\ \cos \delta(t) = J_0(A) + 2J_2(A) \cos 2\omega t + 2J_4(A) \cos 4\omega t + \dots \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

$\delta(t)$  — фазовый сдвиг, вносимый пьезоэлектрическим модулятором, а  $J_n(A)$  — функции Бесселя  $n$  — порядка от  $A$ . Из уравнений, приведенных выше видно, что уравнения для интенсивности на выходе эллипсометра

сильно упрощаются, если  $I_0 = 1$ ,  $(P - M) = 45^\circ$ ,  $A = 45^\circ$  и  $M = 45^\circ$  (или  $0^\circ$ ).

$$\begin{cases} I_0 = 1, M = 0^\circ, \\ I_s = \sin 2\Psi \sin \Delta, \\ I_c = \sin 2\Psi \cos \Delta. \end{cases} \quad \begin{cases} I_0 = 1, M = 45^\circ, \\ I_s = \sin 2\Psi \sin \Delta, \\ I_c = \cos 2\Psi. \end{cases} \quad (3)$$

Паре углов  $\Psi$  и  $\Delta$  соответствует комплексное число  $\rho = \tan(\Psi) \times \exp(j\Delta)$ , которое отображается на сфере Пуанкаре точкой с координатами  $(R, \theta, \varphi) = (1/2, \pi - 2\Psi, \Delta)$ , что соответствует декартовым координатам, отсчитываемым от центра сферы:  $(x, y, z) = R(\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta) = 1/2(\sin 2\Psi \sin \Delta, \sin 2\Psi \cos \Delta, -\cos 2\Psi)$ . Расстояние на сфере Пуанкаре между двумя точками, соответствующим эллипсометрическим углам  $(\Psi_c, \Delta_c)$  и  $(\Psi_e, \Delta_e)$   $(x, y, z) = 1/2(\sin 2\Psi \sin \Delta, \sin 2\Psi \cos \Delta, -\cos 2\Psi)$ .

Длина хорды  $r$ , соединяющая эти точки, равна:

$$\begin{aligned} r^2 &= (x_c - x_e)^2 + (y_c - y_e)^2 + (z_c - z_e)^2 = \\ &= \frac{1}{4} \left\{ \sin^2 2\Psi_c + \sin^2 2\Psi_e + \cos 2\Psi_c + \cos 2\Psi_e - 2 \cos 2\Psi_c \cos 2\Psi_e \right\} = \\ &= 1/2 \{ 1 - \cos 2\Psi_c \cos 2\Psi_e - \sin 2\Psi_c \sin 2\Psi_e \cos(\Delta_c - \Delta_e) \}. \end{aligned} \quad (4)$$

Длина дуги  $R$ , соединяющая эти же точки, равна:

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{4(\Psi_c - \Psi_e)^2 + 4(\Delta_c - \Delta_e)^2} = \sqrt{(\delta\Psi)^2 + (\delta\Delta)^2}. \quad (5)$$

Очевидно, что чем меньше длина дуги  $R$ , тем точнее найденное решение, отсюда и получаем наиболее распространенную форму  $\chi^2$  в виде суммы квадратичных отклонений.

И, наконец, третий подход заключается в выборе функции ошибки из *принципа максимального правдоподобия*. Суть его состоит в том, что в качестве искомого набора параметров следует выбрать такой, при котором полученные экспериментальные данные наиболее вероятны. Если ошибки измерений  $a_i$  независимы и подчиняются нормальному закону распределения со стандартными отклонениями  $\sigma_i$ , то

$$\chi^2 = \sum \left( \frac{a_{ei} - a_{ci}}{\sigma_i} \right)^2. \quad (6)$$

Таким образом, в случае нормального закона распределения ошибок измерений наиболее правдоподобным оказывается набор параметров, соответствующий минимальной сумме квадратов отклонений, нормированных на величину соответствующих дисперсий —  $\sigma_i^2$ . Очевидно, что значения дисперсий (точность измерений) и, следовательно, вероятность получения данного набора экспериментальных данных зависит, при прочих равных условиях, от метода измерения.

Отсюда следует форма фотометрической функции ошибки  $\chi^2$ , выраженная через сумму среднеквадратичных отклонений  $I_s$  и  $I_c$  или их выражений через эллипсометрические углы  $\Psi$  и  $\Delta$  ( $\sin 2\Psi \sin \Delta$  и  $\sin 2\Psi \cos \Delta$ ). Напомним, что все известные эллипсометрические методы измерений, так или иначе, основаны на измерении интенсивности света.

### 3 Используемые в эллипсометрии функции ошибки

Результаты анализа трудов международной конференции по спектральной эллипсометрии [6] приведены в Таблице, где даны примеры функционалов (функции ошибки), используемых различными авторами, и даны ссылки на работы, где они опубликованы. К сожалению, не существует универсальной формы функционала, пригодной для любого типа задач или хотя бы, определенного класса обратных задач эллипсометрии, поэтому в каждом конкретном случае форма функционала выбирается по усмотрению исследователя. Например, в Таблице приведены функционалы в виде квадрата ненормированного модуля разности комплексных относительных коэффициентов отражения  $\rho$  (1) и в виде нормированной разности комплексных относительных коэффициентов отражения  $\rho$ , где весовые коэффициенты определены экспериментально (2).

Таблица

	Функция ошибки	источник
1	$Error = 2 \langle  \Psi_M \exp(i\Delta_M) - \Psi_C \exp(i\Delta_C)  \rangle$	Tomuo Yamaguchi et al., p. 264–269
2	$\chi^2 = \frac{1}{N-M-1} \sum_i \left( \left[ \frac{(\Psi_{mi} - \Psi_{ci})}{\sigma_{\Psi i}} \right]^2 + \left[ \frac{(\Delta_{mi} - \Delta_{ci})}{\sigma_{\Delta i}} \right]^2 \right)$	F. K. Urban III, David Barton, p. 119–123.
3	$MSE = \sqrt{\frac{1}{2N-M} \sum_{i=1}^N \left\{ \left[ \tan(\psi_i^{mod}) - \tan(\psi_i^{exp}) \right]^2 + \left[ \cos(\Delta_i^{mod}) - \cos(\Delta_i^{exp}) \right]^2 \right\}}$	Samuel A. Alterovitz, Blaine Johs., p. 124–127; P. Petric, et al., p. 259–263.
4	$MSE = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_E \left( \left( \varepsilon_1^{meas} - \varepsilon_1^{fit} \right)^2 + \left( \varepsilon_2^{meas} - \varepsilon_2^{fit} \right)^2 \right)}$	L. I. Kamlet, F. L. Terry Jr., p. 177–182.
5	$\xi_0^2 = \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N \left[ \left( \frac{\Psi_j^{mod} - \Psi_j^{exp}}{\sigma_{\Psi,j}^{exp}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta_j^{mod} - \Delta_j^{exp}}{\sigma_{\Delta,j}^{exp}} \right)^2 \right]$	C. M. Herzingern et al., p. 281–285.
6	$Err = \langle  \Psi_m \exp(i\Delta_m) - \Psi_c \exp(i\Delta_c)  \rangle$	Z.-T. Jiang, et al., and L. Asinovsky, p. 298–302.
7	$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (\Delta_{cal} - \Delta_{exp})^2 + (\Psi_{cal} - \Psi_{exp})^2}$	Y. Z. Hu, C. Y. Zhao, W. X. Gao, E. A. Irene, p.416–419.

В строке 3 **Таблицы** представлена функция ошибок, для которой суммируются квадраты разностей  $\tan \Psi$  и  $\cos \Delta$ , что вообще говоря, соответствует суммированию квадратов разности сомножителей действительных и мнимых частей  $\rho$ :  $\rho = \tan \Psi \cos \Delta + i \tan \Psi \sin \Delta$ . В строке 4 **Таблицы** приведен функционал в виде суммы  $N$  квадратичных невязок комплексных частей диэлектрических функций, который наиболее часто и успешно используется при решении спектральных обратных задач эллипсометрии (ОЗЭ).

Как показала практика, чаще всего в качестве минимизируемого функционала используется сумма квадратичных невязок эллипсометрических углов  $\Psi$  и  $\Delta$ . Как правило, используются нормированные невязки, с учетом точности регистрации эллипсометрических углов, и с разной формой усреднения (2, 5, 7), но иногда выбирается ненормированная сумма невязок (1, 6). Поэтому сравнивая величину минимума функционала как критерия успешности найденного решения, необходимо учитывать саму форму целевой функции. Основным недостатком  $\chi^2$ , использующих угол  $\Delta$ , является скачок функции невязок при переходе  $0 \rightarrow 2\pi$ , который был устранён автором в специальной программе. Рассмотрим несколько типов функционалов, полученных из уравнения интенсивности на выходе (2):

$$\begin{aligned}
 1. \chi^2 &= \frac{1}{2k} \sum_1^{2k} |R_p \cos \Psi_e - R_s \sin \Psi_e \exp(j\Delta_e)|^2; \\
 2. \chi^2 &= \frac{1}{2k} \sum_1^{2k} \left( \frac{\delta Re \rho}{\sigma_{Re \rho}} \right)^2 + \left( \frac{\delta Im \rho}{\sigma_{Im \rho}} \right)^2; \\
 &\quad \sigma_{Re \rho} = \sigma_{Im \rho} = 0.1 \\
 3. \chi^2 &= \frac{1}{2k} \sum_1^{2k} \left( \frac{\delta I_s}{\sigma_{I_s}} \right)^2 + \left( \frac{\delta I_c}{\sigma_{I_c}} \right)^2, \sigma_{I_s} = \sigma_{I_c} = 0.03, \\
 &\quad I_s = \sin 2\Psi \sin \Delta, I_c = \sin 2\Psi \cos \Delta; \\
 4. \chi^2 &= \frac{1}{2k} \sum_1^{2k} \left( \frac{\delta \Psi}{\sigma_{\Psi}} \right)^2 + \left( \frac{\delta \Delta}{\sigma_{\Delta}} \right)^2, 2\sigma_{\Psi} = \sigma_{\Delta} = 0.1; \\
 5. \chi^2 &= \frac{1}{2k} \sum_1^{2k} \left( \frac{\delta \tan \Psi}{\sigma_{\tan \Psi}} \right)^2 + \left( \frac{\delta \cos \Delta}{\sigma_{\cos \Delta}} \right)^2, \\
 &\quad \sigma_{\tan \Psi} = \sigma_{\cos \Delta} = 0.1; \\
 6. \chi^2 &= \frac{1}{2k} \sum_1^{2k} \left( \frac{\delta Re \varepsilon}{\sigma_{Re \varepsilon}} \right)^2 + \left( \frac{\delta Im \varepsilon}{\sigma_{Im \varepsilon}} \right)^2, \\
 &\quad \sigma_{Re \varepsilon} = \sigma_{Im \varepsilon} = 0.7; \\
 7. \chi^2 &= \frac{1}{2k} \sum_1^{2k} \left( \frac{\delta (\Psi \cos \Delta)}{\sigma_{\Psi \cos \Delta}} \right)^2 + \left( \frac{\delta (\Psi \sin \Delta)}{\sigma_{\Psi \sin \Delta}} \right)^2, \\
 &\quad \sigma_{\Psi \cos \Delta} = \sigma_{\Psi \sin \Delta} = 1.
 \end{aligned} \tag{7}$$

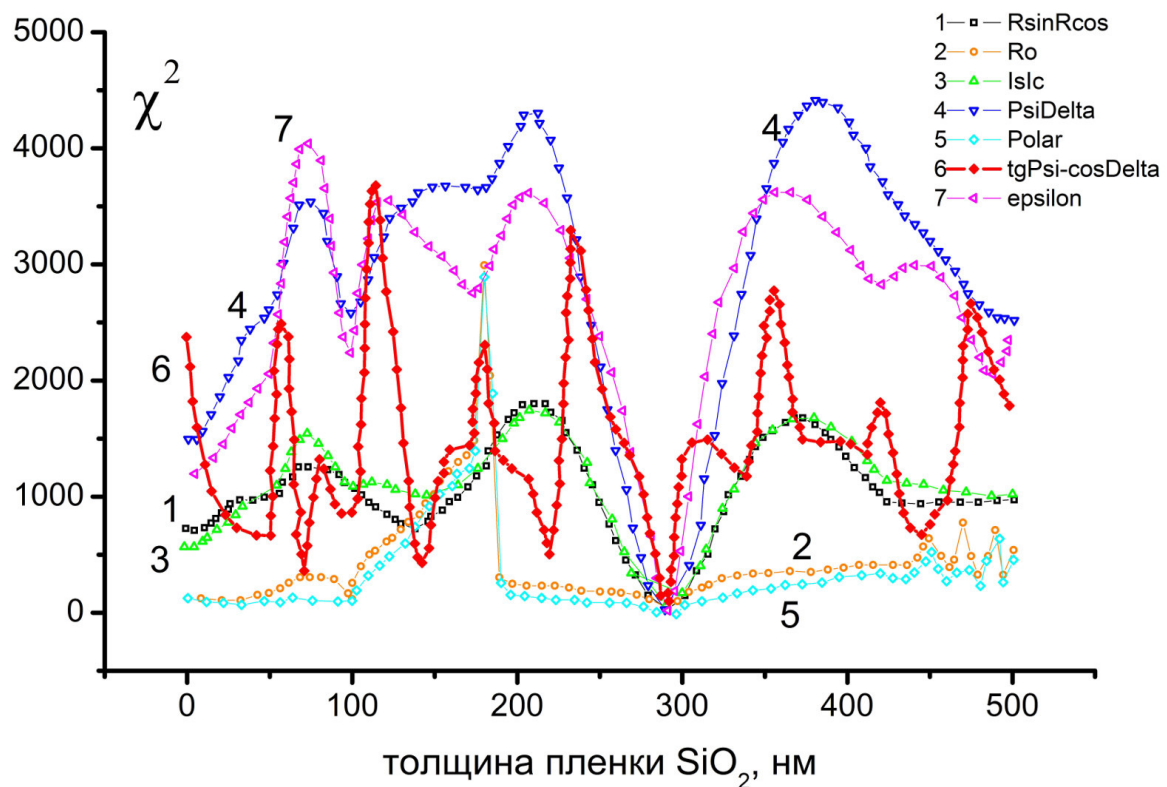


Рис. 1: Количество локальных минимумов для каждого из приведенных выше функционалов при решении простейшей задачи поиска двух параметров.

## 4 Обзор методов решения обратной задачи эллипсометрии (ОЗЭ)

### 4.1 Метод номограмм

Номограммный метод был предложен Арчером [9] в 1962 году и улучшен Саксеной [10] через три года и на протяжении многих лет он был единственным методом решения ОЗЭ для интерпретации эллипсометрических измерений и состоял в отображении на комплексной плоскости эллипсометрических углов ( $\Psi$  и  $\Delta$ ) двух семейств линий - линий равной толщины пленки вместе с линиями равных комплексных коэффициентов преломления.

### 4.2 Компьютерные методы решения ОЗЭ

Прежде всего, это очень полезно прочесть §4.5 под названием "Numerical inversion of the exact equation of reflection ellipsometry" в книге R.M.A. Azzam and N.M. Bashara [5], где авторами были рассмотрены некоторые аспекты решения ОЗЭ. Например, анализируются случаи аналитического решения, выбор функции ошибки ( $E_r$ ), скорость сходимости при минимизации  $E_r$ , выбор углов падения и в дополнение, влияние экспериментальной ошибки. Совершенно ясно, что не существует единого способа решения, и каждая задача требует конкретных подходов.

### 4.3 Поиск двух параметров

Решение для поиска двух параметров (для прозрачных пленок) является простейшим случаем, однако, надо помнить, что существует возможность решений, сильно зависящих от объема симплекса и стартовой точки поиска в нём. Например, при анализе нано структур, содержащих двойной диэлектрик, в ОНО-структурах для флэш-памяти, т.е. переход к задаче поиска четырех параметров [4, 7]. В этом случае точность может

быть увеличена в несколько раз с помощью статистической обработки результатов ОЗЭ, полученных заданием стартовых точек генератором случайных чисел и последовательным уменьшением объема симплекса [8]. Более того, необходим анализ чисто математических проблем, связанных с обусловленностью, однозначностью и взаимной зависимостью найденных решений ОЗЭ [2, 7].

#### 4.4 Поиск трех параметров

Ранее в [1] был разработан метод поиска множества точных решений с использованием одной пары эллипсометрических углов, где для устранения неоднозначности дополнительные измерения должны быть выполнены. Решение можно получить в виде пространственной (трёхмерной:  $n-k-d$ ) спирали, каждая точка которой соответствует точному решению эллипсометрического уравнения. Точка пересечения двух трехмерных спиралей дает единственное решение. Таким образом, карта параметров пленки (толщина, коэффициенты преломления и поглощения) была создана для пленки теллурида ртути  $HgTe$ . Кроме того, был проведен анализ общей неоднозначности ОЗЭ и выявлено существование нескольких семейств решений ОЗЭ [3]. Все выше упомянутые рассуждения касаются измерений на одной длины волны.

#### 4.5 ОЗЭ спектральной эллипсометрии

Спектральная эллипсометрия требует моделирования и иногда разделения задачи на две или несколько подзадач, так что две части спектра - области прозрачности и области сильного поглощения - могут быть использованы для успешного решения ОЗЭ, например, как работах [8, 11]. Задание адекватной модели структуры пленки обеспечивает надежность результата ОЗЭ-решения. Модель должна принимать во внимание, что свойства пленки отличается от объемных свойств материала. Полезно использовать осцилляторную модель Лоренца для описания диэлектрической проницаемости каждой пленки, чтобы получить однозначное соответствие по всему спектру экспериментальных данных и вычисленных согласно математической модели, с помощью метода наименьших квадратов (например, Левенберга — Марквардта алгоритм). Минимизация функционала в этом случае выполняется только для нескольких коэффициентов формулы Лоренца, при подгонке спектра, содержащего более трех сот комплексных чисел.

### Выводы

Математическое моделирование полупроводниковых структур, решение обратных задач численными методами и изучение проблем, связанных с точностью полученных характеристик нано размерных пленок, являются важными вопросами прикладной математики. Измерения оптических констант, их дисперсии и толщины металлических пленок являются жизненно важными, наряду с вопросами технологии и математического описания и моделирования. Для требуемой функциональности устройства требуется точное знание всех свойств пленок.

### Список литературы

- [1] S.N. Svitashva, The exact solution of inverse equation of reflection ellipsometry problem for the absorbing films, DAN SSSR, vol. 318, No. 5 (1991) 1154–1158.
- [2] S.N. Svitashva, Some Aspects of Solution the Inverse Ellipsometric Problem for Strongly Absorbing Films, Optoelect., Instrum. & Data Process., No. 4 (1996) 108–114.
- [3] V.G. Polovinkin, S.N. Svitashva, The analysis of general ambiguity inverse ellipsometric problem, Thin Solid Films, 313–314 (1998) 128–131.
- [4] V.A. Gritsenko, Svitashva, I.P. Petrenko. S.N. and H. Wong, J.B. Hu, and I.H. Wilson, Study of Excess Silicon at  $Si_3N_4$ /Thermal  $SiO_2$  Interface Using EELS and Ellipsometric measurements, Journal of Electrochemical Society, 146, No. 2, (1999) 780–785.
- [5] R.M.A. Azzam and N.M. Bashara, Ellipsometry and polarized light, second ed., North-Holland, 1979.
- [6] Thin Solid Films, 313–314 (1998) — Proceedings of the Second International Conference on Spectroscopic Ellipsometry, USA, 1997.

- [7] Svetlana Svitashева, Modeling Methods of Optical Inhomogeneous Structures. Application of Ellipsometry, book, Lambert Academic Publishing, 2013.
- [8] S.N. Svitashева, and K.S. Zhuravlev, Dependences of the Optical Characteristics of  $Al_xGa_{1-x}N$  Films on the Substrate Composition and Polarity, Optoelect., Instrum. & Data Process., 47, No. 8 (2011) 488–489.
- [9] R.J. Archer, Determination of the properties of films on Silicon by the method of ellipsometry, J. Opt. Soc. Am., 52, No. 9 (1962) 970.
- [10] N. Saxena, Changes in the phase and amplitude of polarized light reflected from a film-covered surface and their relations with thickness, J. Opt. Soc. Am., 12, No. 2, (1965) 226.
- [11] S.N. Svitashева Optical Constants of MBE n-type GaAs Films doped by Si or Te, JEMAA, Vol. 2, No. 6, (2010) 357–361 DOI: 10.4236/jemaa.2010.26046.

*Свиташева Светлана Николаевна — д.ф.-м.н., с.н.с., Институт физики полупроводников, СО РАН;  
e-mail: Svitashева@isp.nsc.ru.*

*Дата поступления — 24 мая 2017 г.*