

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ СКАЧКА ФАЗЫ ПРИ ОТРАЖЕНИИ СВЕТА

© 2016 г. В.А. ШВЕЦ

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск,
Новосибирский государственный университет
e-mail: shvets@isp.nsc.ru

В методах спектрометрии отражения или пропускания измеряется интенсивность отражённого (прошедшего) света и рассчитываются энергетические коэффициенты отражения или пропускания. Как правило, скачок фазы при этом остаётся вне рассмотрения. Между тем, фазовый сдвиг волны при её отражении представляет дополнительную информацию об исследуемом объекте и может характеризовать его свойства, как это показано в работе [1], где представлены результаты микроволнового зондирования криосферных образований. Существующие методы измерения фазы наиболее развиты в СВЧ диапазоне [2]. В видимом диапазоне спектра для измерения фазовых характеристик отражения используются интерференционные методы [3], которые предполагают проведение достаточно сложных и кропотливых измерений. Фазу отражённой волны можно определить также из анализа измеренных спектров с использованием соотношений Крамерса-Кронига [4], но для этого необходимы измерения в широком спектральном диапазоне.

В настоящей работе предложен простой метод экспериментального определения фазы коэффициента отражения. Он основан на измерении энергетических коэффициентов отражения и/или пропускания исследуемого образца, помещённого в оптически прозрачные среды с различными показателями преломления.

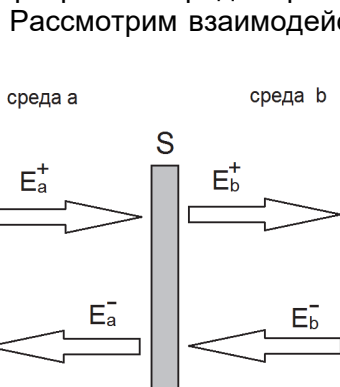


Рис. 1. Схема взаимодействия световых волн с образцом.

Рассмотрим взаимодействие света с образцом и используем для этого формализм матрицы рассеяния, изложенный в монографии [5]. Матрица рассеяния \hat{S} связывает электрические поля волн по обе стороны образца, ограниченного средами «а» и «б» и бегущих в положительном (E^+) и отрицательном (E^-) направлениях (рис. 1):

$$\begin{pmatrix} E_a^+ \\ E_a^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_b^+ \\ E_b^- \end{pmatrix}$$

Элементы матрицы можно выразить через коэффициенты отражения и пропускания. Рассматривая поочерёдно волну, падающую на образец в положительном и отрицательном направлениях, приходим к следующим соотношениям:

$$S_{11} = \frac{1}{T}, S_{12} = \frac{-\tilde{R}}{T}, S_{21} = \frac{R}{T}, S_{22} = \frac{T\tilde{T}-R\tilde{R}}{T}$$

Здесь $T = \frac{E_b^+}{E_a^+}$, $\tilde{T} = \frac{E_a^-}{E_b^-}$ - комплексные амплитудные коэффициенты пропускания при падении света на образец слева и справа, соответственно; $R = \frac{E_a^-}{E_a^+}$, $\tilde{R} = \frac{E_b^+}{E_b^-}$ - комплексные амплитудные коэффициенты отражения для аналогичных случаев падения света. Из-

меряемые энергетические коэффициенты отражения и пропускания равны соответственно $\mathcal{R} = |R|^2$ и $\mathcal{T} = |T|^2$.

Для определения комплексного коэффициента отражения R рассмотрим две экспериментальные ситуации при падении света из области «а»: (1) обе среды «а» и «b» имеют один и тот же показатель преломления, равный 1 (воздух); (2) показатель преломления среды «b» предполагаем по-прежнему равным 1, а показатель преломления среды «а» равным n (жидкость). Матрицу рассеяния \hat{S}_1 во втором случае можно найти последовательным умножением слева матрицы \hat{S} на матрицу виртуального слоя воздуха нулевой толщины и матрицу границы раздела \hat{I}_{n1} сред с показателями преломления n и 1. Матрица виртуального слоя является единичной из-за нулевой толщины и не влияет на конечный результат. Однако включение её в систему позволяет связать матрицы \hat{S} и \hat{S}_1 между собой, поскольку исходная матрица \hat{S} определена по отношению к внешней среде с показателем преломления, равным 1. В результате получаем:

$$\hat{S}_1 = \hat{I}_{n1} \hat{E} \hat{S} = \frac{1}{nt} \begin{pmatrix} 1 & -r \\ -r & 1 \end{pmatrix} \hat{S}$$

Здесь r, t – коэффициенты отражения и пропускания Френеля для границы раздела «воздух – среда с показателем преломления n ». При нормальном падении эти коэффициенты выражаются формулами:

$$r = \frac{n-1}{n+1}, t = \frac{2}{n+1}$$

Вычисляя элементы первого столбца матрицы \hat{S}_1 получаем амплитудные коэффициенты отражения и пропускания системы для второй экспериментальной ситуации, выраженные через R и T :

$$R_1 = \frac{R-r}{1-rR}, T_1 = \frac{ntT}{1-rR}$$

Энергетические коэффициенты отражения и пропускания, измеряемые в этом эксперименте, выражаются формулами:

$$\mathcal{R}_1 = \left| \frac{R-r}{1-rR} \right|^2 \quad (1)$$

$$\mathcal{T}_1 = \frac{1}{n} |T_1|^2 = nt^2 \left| \frac{T}{1-rR} \right|^2 \quad (2)$$

Возможны ещё экспериментальные ситуации, когда среда b имеет показатель преломления n , а показатель преломления среды a равен n или 1. Мы не будем их рассматривать, так как при этом получаются более сложные математические формулы, которые тоже содержат информацию о фазе.

Чтобы рассчитать фазу комплексного коэффициента отражения, разложим R на вещественную и мнимую части: $R = R' + iR''$ и подставим в уравнение (1). После несложных алгебраических преобразований, а также учитывая, что $(R')^2 + (R'')^2 = \mathcal{R}$, получаем выражения для вещественной и мнимой частей комплексного коэффициента отражения через измеряемые в эксперименте величины \mathcal{R} и \mathcal{R}_1 и коэффициент отражения Френеля:

$$R' = \frac{\mathcal{R}_1 (1 + r^2 \mathcal{R}) - \mathcal{R} - r^2}{2r(\mathcal{R}_1 - 1)} \quad (4)$$

$$R'' = \pm \sqrt{\mathcal{R} - (R')^2} \quad (5)$$

Для нахождения фазы коэффициента отражения можно использовать любое из соотношений: $\cos \varphi = R' / \sqrt{\mathcal{R}}$ или $\sin \varphi = R'' / \sqrt{\mathcal{R}}$. При этом фаза определена с точностью до знака из-за неопределённости в выражении (5).

Если структура полупрозрачная и её пропускание отлично от нуля, то вместо соотношения (1) можно воспользоваться уравнением (1) и получить формулу для R' , альтернативную уравнению (4):

$$R' = \frac{(1 + r^2 \mathcal{R}) \mathcal{T}_1 - nt^2 \mathcal{T}}{2r \mathcal{T}_1} \quad (6)$$

Обе формулы (4) и (6) дают эквивалентные в математическом смысле выражения для R' , однако для структур с малым пропусканием пользоваться выражением (6)

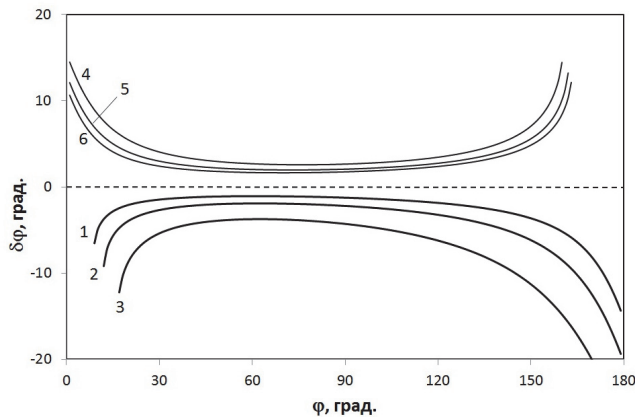


Рис. 2. Расчётные ошибки определения фазы коэффициента отражения $\delta\varphi$ в зависимости от φ . Значения коэффициента отражения: $\mathcal{R}=0.3$ (кривые 1, 4), 0.5 (2, 5), 0.7 (3, 6). Вычисления фазы проводились по формуле (4) (кривые 1 – 3) и формуле (6) (кривые 4 – 6).

что измеряемой величиной является не сам угол φ , а $\cos \varphi$. В наиболее благоприятной области значений φ от 20 до 150° ошибка $\delta\varphi$ составляет 1 -2°.

нужно осторожно из-за большего влияния измерительных ошибок.

Влияние ошибок измерения на точность определения фазы показано на рис. 2. Погрешности определения фазы $\delta\varphi$ рассчитывалась как разность между заданным значением φ и полученным в результате вычислений по формулам (4) или (6). При этом в рассчитанные значения коэффициентов \mathcal{R} , $\mathcal{R}_1 \mathcal{T}$ и \mathcal{T}_1 в (4) и (6) вносили отклонения разного знака:

$$\delta\mathcal{R} = 0.005 \mathcal{R}, \quad \delta\mathcal{R}_1 = -0.005 \mathcal{R}_1,$$

$$\delta\mathcal{T} = 0.005 \mathcal{T}, \quad \delta\mathcal{T}_1 = -0.005 \mathcal{T}_1,$$

которые имитировали экспериментальные ошибки. Из расчётов видно, что ошибки $\delta\varphi$ возрастают вблизи $\varphi=0$ и $\varphi=180^\circ$ из-за того,

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д., Цыренжапов С.В., Орлов А.О. О коэффициенте отражения электромагнитных волн от границы воздух - лед в сантиметровом диапазоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2008, т. 2, вып. 5, с. 30-32.
2. Дворяшин Б.В., Кузнецов Л.И. Радиотехнические измерения. – М. Советское радио, 1978, 360 с.
3. Карташёв А.И., Эцин И.Ш. Методы измерения малых изменений разности фаз в интерференционных устройствах // УФН. – 1972, т. 106, вып. 4, с. 687-721.
4. Лупашко Е.А., Милославский В.К., Шкляревский И.Н. Применение дисперсионных соотношений Крамерса-Кронига для определения фазового сдвига, возникающего при отражении света от тонких диэлектрических слоёв // Оптика и спектроскопия. – 1968, т. 24, вып. 2, с. 257-262.
5. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. – М.: Мир, 1981. 583 с.