

С. А. АЛЕКСЕЕВ, Н. В. МАТВЕЕВ

## СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЕМНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассматривается новый способ измерения поляризационной чувствительности приемников оптического излучения, основанный на гармоническом анализе выходного сигнала исследуемого приемника излучения, установленного в поляризационной схеме поляризатор—дискретный анализатор—приемник. Проведено численное моделирование погрешности измерения поляризационной чувствительности. Приведены результаты экспериментальных исследований поляризационной чувствительности кремниевых фотодиодов и пироприемников.

*Ключевые слова:* поляризационная чувствительность приемника, эллипсометрия.

**Введение. Постановка задачи.** Поляризационная чувствительность оптического приемного тракта приводит к появлению систематических погрешностей измерений, производимых с использованием поляриметрической и эллипсометрической аппаратуры. Это обуславливает необходимость получения информации о наличии и величине поляризационной чувствительности конкретных образцов приемников излучения. Другим фактором, обуславливающим актуальность данной задачи, является метрологическая аттестация поляризационно-чувствительных приемников.

Известные методы измерения поляризационной чувствительности в основном базируются на прямом фотометрировании потока поляризационного излучения, т.е. измерении двух составляющих чувствительности приемника излучения для ортогональных компонентов поляризации и последующем вычислении их отношения [1, 2].

Новый способ измерения, представленный в настоящей статье, должен иметь повышенную точность, обеспечивать возможность получения независимых оценок параметров, характеризующих поляризационную чувствительность, в процессе эллипсометрических измерений, а также обладать высокой степенью быстродействия [3].

**Основные соотношения методики.** Перечисленные задачи могут быть решены с использованием динамического фотометрического метода бескомпенсаторной эллипсометрии.

Метод основан на гармоническом анализе выходного сигнала исследуемого приемника излучения, установленного в поляризационной схеме поляризатор—анализатор—приемник.

Анализатор в такой схеме может принимать несколько дискретных угловых положений  $A_i$  в пределах полного оборота (рис. 1, здесь  $s$  — приемная площадка фотоприемника). Для идеальных элементов оптической системы выходной сигнал приемника представляет собой гармоническую функцию от удвоенного угла поворота анализатора, фаза которой строго соответствует азимуту поляризатора. Если приемник излучения обладает поляризационной чувствительностью, то в угловом спектре выходного сигнала добавляется четвертая гармоника угла поворота ( $I_{4A}$ ) и изменяется основная составляющая ( $I_{2A}$ ):

$$I_{2A} = \frac{1}{4} S_0 I_0 [(1 - K) \cos 2A - (1 + K) \cos(2A - 2P)],$$

$$I_{4A} = \frac{1}{8} S_0 I_0 (1 - K) \cos(4A - 2P),$$

где  $P$  — азимут поляризатора,  $A$  — азимут анализатора,

$K = K_y/K_x$  — поляризационная чувствительность приемника,  $I_0$  — интенсивность сигнала на входе системы (после поляризатора),  $S_0$  — чувствительность приемника.

Изменение составляющей  $I_{2A}$  приводит к изменению фазы основного сигнала, которое может быть зарегистрировано в поляриметрической схеме с большей степенью точности, чем соответствующее изменение амплитуды.

Основное расчетное соотношение данной методики (1-й способ):

$$K = \frac{\operatorname{tg} 2\varphi_{2A}(1 + \cos 2P) - \sin 2P}{\operatorname{tg} 2\varphi_{2A}(1 - \cos 2P) + \sin 2P}, \quad (1)$$

где  $\varphi_{2A}$  — фаза основной гармоники.

Также независимую оценку параметра  $K$  можно получить на основе регистрации отношения амплитуд четвертой и основной гармоник:

$$C = \frac{I_{4A}}{I_{2A}} = \frac{1 - K}{2\sqrt{(1 - K)^2 + (1 + K)^2 + 2(1 + K)^2 \cos 2P}}. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) позволяет определить оценку параметра  $K$  по экспериментально измеренному значению  $C$  (2-й способ):

$$K = \frac{-1 \pm \sqrt{1 - VU}}{V}, \quad (3)$$

где  $V = 8C^2(1 - \cos 2P) - 1$ ;  $U = 8C^2(1 + \cos 2P) - 1$ .

Анализ уравнения (3) показывает, что второе его решение — со знаком „минус“ — соответствует определению поляризационной чувствительности в виде  $K_- = -\frac{S_y}{S_x} = -\frac{1}{K}$ , что не несет дополнительной физической информации.

Регистрация амплитуд и фаз гармоник достаточно просто может быть реализована по выборке  $I_i$  значений выходного сигнала приемника при разных ориентациях  $A_i$  анализатора (см. рис. 1) с помощью дискретного преобразования Фурье. Выходной сигнал в этом случае может быть представлен выражением

$$I_i = I_0(a_0 + a_2 \cos 2A_i + b_2 \sin 2A_i + a_4 \cos 4A_i + b_4 \sin 4A_i),$$

где коэффициенты Фурье вычисляются согласно экспериментальным данным по формулам

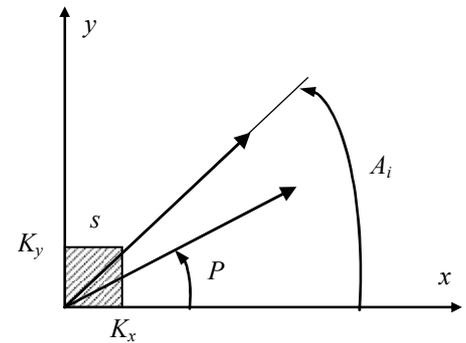


Рис. 1

$$a_2 = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} I_i \cos 2A_i, \quad b_2 = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} I_i \sin 2A_i;$$

$$a_4 = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} I_i \cos 4A_i, \quad b_4 = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} I_i \sin 4A_i,$$

где  $N$  — число ориентаций анализатора в пределах полного оборота.

Фазы и амплитуды гармоник определяются далее расчетным путем:

$$\operatorname{tg} 2\varphi_{2A} = b_2/a_2, \quad I_{2A}^2 = (a_2^2 + b_2^2), \quad I_{4A}^2 = (a_4^2 + b_4^2).$$

Такая методика обеспечивает эффективную фильтрацию гармоник при высокой точности измерений [4].

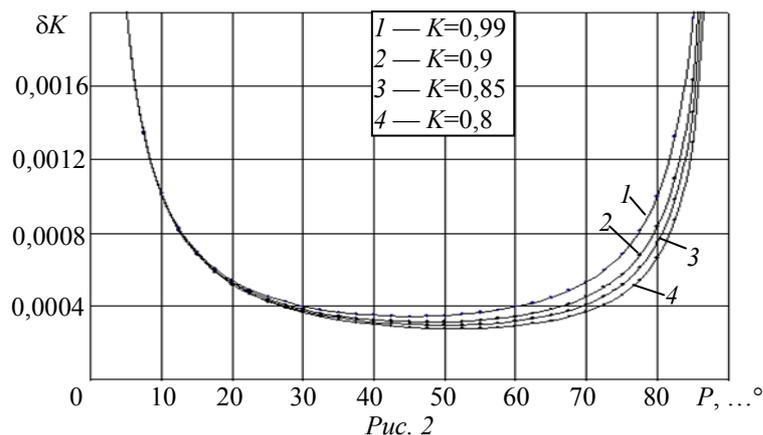
**Численное моделирование погрешности измерения поляризационной чувствительности.** Задаваясь абсолютной погрешностью измерения фазы  $\delta\varphi$  основной составляющей, соответствующей погрешности измерения азимута поляризованного излучения динамическим фотометрическим эллипсометром, определим погрешность измерения параметра  $K$  как

$$\delta K = \left| \frac{dK}{d\varphi} \right| \delta\varphi. \quad (4)$$

Выражение (4) имеет вид функциональной зависимости  $\delta K = f(\delta\varphi, P, K)$ , определяемой при подстановке уравнения (1) в выражение (4):

$$\delta K = \frac{2 \sin 2P}{(1 - \cos 2P + \sin 2P \operatorname{tg} 2\varphi_{2A})^2 \cos^2 2\varphi_{2A}} \delta\varphi. \quad (5)$$

Результаты расчета поляризационной чувствительности по формуле (5) для  $\delta\varphi=0,01$ , представленные на рис. 2, показывают, что минимальная погрешность  $\delta K$  обеспечивается при азимутах поляризатора, близких к  $45^\circ$  относительно осей максимальной и минимальной чувствительности приемника, и практически не зависит от величины измеряемого параметра  $K$ .



Аналогичные расчеты, проведенные для второго способа измерения, позволяют получить следующее выражение для погрешности  $\delta K$ :

$$\delta K = \left| \frac{dK}{dC} \right| (1 - C) \frac{\delta I}{I}, \quad (6)$$

где  $\delta I/I$  — относительная погрешность измерения амплитуд основной и четвертой гармоник в спектре выходного сигнала.

Значение  $\frac{dK}{dC}$  в выражении (6) может быть получено дифференцированием уравнения (3) при подстановке соответствующих значений параметров, входящих в данное выражение. Результаты расчета при  $\delta I/I = 0,1\%$ , представленные на рис. 3, показывают, что с ростом поляризационной чувствительности происходит уменьшение погрешности  $\delta K$ . Существует слабая зависимость погрешности от азимута поляризатора, достигающая минимума при  $P=90^\circ$ .

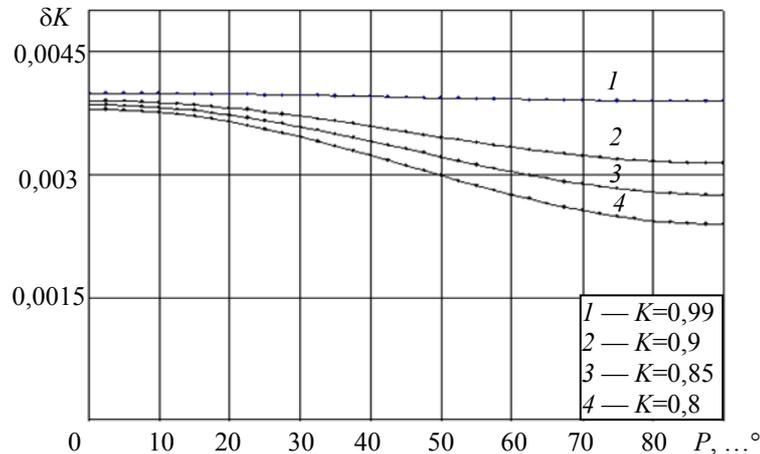


Рис. 3

Сопоставление представленных зависимостей позволяет сделать вывод, что способ определения поляризационной чувствительности по изменению фазового сдвига основной гармонической составляющей обладает на порядок большей точностью, чем при анализе отношения амплитуд четвертой и основной гармоник. С другой стороны, величина  $\varphi_{2,4}$  является информационным сигналом при проведении эллипсометрических измерений, и, таким образом, для использования непосредственно в рабочих схемах эллипсометров предпочтителен второй способ. Коррекция систематической погрешности в этом случае может быть выполнена по следующей методике: 1) анализ четвертой гармоники углового положения анализатора; 2) определение значения  $K$ ; 3) расчет и внесение поправок к фурье-коэффициентам основной гармоники по определенному значению  $K$ . В поляриметрических схемах может быть вычислена соответствующая поправка к измеряемому азимуту поляризованного излучения.

**Результаты экспериментов.** Экспериментальные исследования показали наличие поляризационной чувствительности отдельных образцов кремниевых фотодиодов на уровне 1—3 % (по величине  $(1-K) \cdot 100\%$ ). При удалении входного окна фотоприемника это значение снижалось до уровня 0,2—0,5 %, что указывает на преобладающее влияние входного окна и его расположения относительно чувствительной площадки приемника на механизм поляризационной чувствительности. Для оптического тракта пироэлектрического приемника излучения, включающего в себя фокусирующую германиевую линзу, входное окно и чувствительный элемент приемника, получены более высокие (до 5 %) значения поляризационной чувствительности, что указывает на необходимость ее учета в процессе эллипсометрических измерений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буров Л. И., Гулаков И. Р. Поляризационная чувствительность фотокатодов фотоприемников излучения // Журн. прикладной спектроскопии. 1981. Т. 51, вып. 2. С. 313—315.
2. Чен Б. Б., Свердлик Л. Г. Поляризация лазерного излучения в пыли и облаке в центрально-азиатском районе // Вестн. Кыргызско-Российского Славянского университета. 2003. Т. 3, № 5. С. 90—96.

3. Пат. 2426078 РФ. Способ измерения поляризационной чувствительности приемника оптического излучения (варианты) / *С. А. Алексеев, Н. В. Матвеев*. 2011.
4. *Алексеев С. А., Рондарев В. С.* Случайные погрешности в эллипсометрах с вращающимся анализатором // *Автометрия*. 1985. № 4, вып. 2. С. 41—44.

***Сведения об авторах******Сергей Андреевич Алексеев***

- канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники;  
E-mail: [alekseev@grv.ifmo.ru](mailto:alekseev@grv.ifmo.ru)

***Николай Вадимович Матвеев***

- аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: [matveev\\_nv@mail.ru](mailto:matveev_nv@mail.ru)

Рекомендована кафедрой  
твердотельной оптоэлектроники

Поступила в редакцию  
10.04.12 г.