

УДК 681.5+548.55

УМЕНЬШЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ТРАКТА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ИЗМЕРЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

С. Э. Притчин, К. В. Макаров, А. П. Юрченко

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: pritchinse@ukr.net

Остаточные напряжения в полупроводниковых пластинах и подложках возникают в результате выращивания слитков и последующих технологических операций. Эти напряжения оказывают влияние на многие важные параметры полупроводниковых приборов, включая плотность дислокаций в подложках арсенида галлия, деформацию и механическую жесткость. В работе рассмотрены вопросы уменьшения погрешности автоматизированного комплекса измерения остаточных напряжений. Определены факторы, влияющие на погрешность измерения. Показано, что на общую погрешность измерения оказывают влияние погрешности установки элементов оптического тракта, включающего в себя анализатор, поляризатор и четвертьволновую пластину. Определены значения случайной и систематической погрешности оптического тракта автоматизированного комплекса измерения остаточных напряжений, которые составили $\pm 1^0$, что приводит к погрешности измерения 0,7 МПа, и погрешность в установке четвертьволновых пластин, которая составляет $\pm 1^0$ и что приводит к ошибке измерения 0,5 МПа.

Ключевые слова: остаточные напряжения, метод поляриметрии, погрешность измерения.

ЗМЕНШЕННЯ ПОХИБКИ ОПТИЧНОГО ТРАКТУ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ ВИМІРЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУГ

С. Е. Притчин, К. В. Макаров, А. П. Юрченко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: pritchinse@ukr.net

Залишкові напруги в напівпровідникових пластинах і підкладках виникають у результаті вирощування злитків і подальших технологічних операцій. Ці напруги впливають на багато важливих параметрів напівпровідникових приладів, включаючи щільність дислокацій в підкладках арсеніду галію, деформацію і механічну жорсткість. У роботі розглянуті питання зменшення похибки автоматизованого комплексу вимірювання залишкових напруг. Установлено фактори впливають на похибку вимірювання. Показано, що на загальну похибку вимірювання впливають похибки установки елементів оптичного тракту, що включає в себе аналізатор, поляризатор і чвертьхвильову пластину. У роботі визначено значення випадкової і систематичної похибки оптичного тракту автоматизованого комплексу вимірювання залишкових напружень, які склали $\pm 1^0$, що призводить до похибки вимірювання 0,7 МПа, і похибка в установці чвертьхвильових пластин, яка становить $\pm 1^0$, що призводить до помилки вимірювання 0,5 МПа.

Ключові слова: залишкові напруги, метод поляриметрії, похибка вимірювання.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Остаточные напряжения в полупроводниках влияют на большинство их параметров. От величины остаточных напряжений зависит структурное совершенство, электрические и оптические свойства подложек, механические свойства и устойчивость к нагрузкам.

В настоящее время существуют различные методы и методики измерения остаточных напряжений [1, 2] которые не позволяют их использование для измерения данного параметра в полупроводниках, и в частности в подложках арсенида галлия.

Для измерения остаточных напряжений в подложках арсенида галлия (GaAs) широко используются методы поляриметрии, в основе которых лежит измерение двойного лучепреломление (двулучепреломление) [3].

Метод поляриметрии основан на измерении степени поляризации света и угла поворота плоскости поляризации света при прохождении его через оптически активные вещества, в нашем случае полупроводник. Учитывая то, что полупроводники прозрачны в инфракрасной области, измерение остаточных напряжений производится с использованием ИК источников излучения.

Точность метода находится в прямой зависимости от толщины измеряемого образца. Полупроводниковые пластины в виде подложек в настоящее время имеют толщины, которые не позволяют с достаточной точностью измерять остаточные напряжения существующей аппаратурой. Так, например, подложки арсенида галлия для промышленного применения изготавливаются толщиной 400 мкм для диаметра подложки 50,8 мм, 600 мкм – для подложек диаметром 76,2 и 700 мкм – для подложек диаметром 101,6 мм.

Одним из путей повышения точности измерения остаточных напряжений является уменьшение погрешности метода и аппаратуры. В работе [4] рассмотрены факторы, влияющие на погрешности измерения остаточных напряжений в подложках арсенида галлия, и даны решения по снижению погрешностей путем повышения чувствительности приемного тракта и использованием фазочувствительного контура.

В тоже время вопрос влияния ошибок оптического тракта на точность измерения величины остаточных напряжений методом поляриметрии остался не рассмотренным.

Целью работы является определение влияния элементов оптической системы автоматизированного комплекса измерений остаточных напряжений полупроводниковых материалов на погрешность измерения, и уменьшение этой погрешности.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Как показано в работах [5, 6], погрешность, связанная с оптической схемой, возникает вследствие несоответствия длины волны четвертьволновых пластин и номинального наклона оптических элементов, которые включают в себя анализатор и поляризатор.

Рассмотрим оптическую схему полярископа, представленную на рис. 1 и состоящую из источника ближнего ИК-излучения, поляризатора, двух четвертьволновых пластинок, анализатора и детектора ИК излучения.

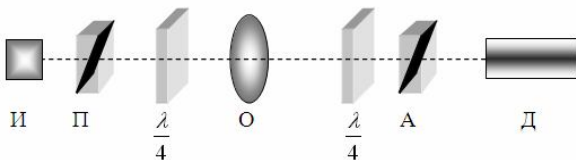


Рисунок 1 – Схема полярископа: И – источник ИК-излучения; П – поляризатор; $\lambda/4$ – четвертьволновая пластинка; О – образец; А – анализатор; Д – датчик ИК-излучения

Распространение света в полярископе может быть описано вектором Стокса и матрицей Мюллера [7]. Для ИК-излучения, распространяющегося вдоль направления Z (рис. 2), электрическое поле может быть разложено по осям x и y, и описано выражениями:

$$E_x = E_{0x} \left[\cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} z - \omega t \right) + \delta_x \right]$$

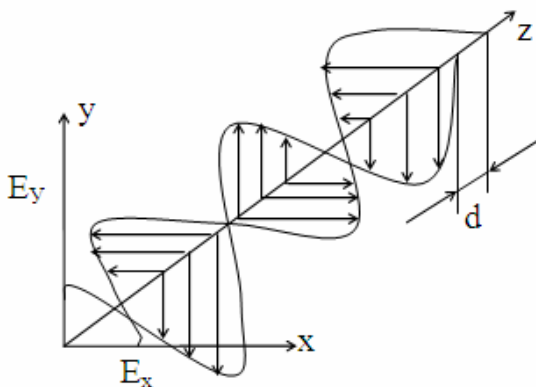


Рисунок 2 – Прохождение ИК излучения в полярископе

$$E_y = E_{0y} \left[\cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} z - \omega t \right) + \delta_y \right],$$

где E_x, E_y являются величинами электрического поля вдоль оси x и y; δ_x, δ_y – фазы излучения; ω – частота; λ – длина волны; t – время.

Относительное запаздывание δ фазы, между E_x и E_y вычисляется разностью $\delta_x - \delta_y$. Это излучение может также быть выражено через вектор Стокса как

$$S = \begin{Bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{Bmatrix},$$

где $s_0 = E_{x0}^2 + E_{y0}^2$; $s_1 = E_{x0}^2 - E_{y0}^2$;
 $s_2 = 2 E_{x0} E_{y0} \cos \delta$; $s_3 = 2 E_{x0} E_{y0} \sin \delta$.

В вышеприведенных уравнениях, первый компонент s_0 является интенсивностью ИК излучения, а другие три компонента описывают фазу. Эти четыре компонента зависят друг от друга, и удовлетворяют условию $s_0^2 = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2$. Для произвольно ориентированного поляризованного ИК излучения вектор Стокса S определяется как

$$S_0 = I_a [1, 0, 0, 0]^T,$$

где T является транспонированной матрицей, I_a – интенсивность ИК-излучения.

Опишем идеальный линейный поляризатор матрицей Мюллера P (β), в следующем виде:

$$P(\beta) = \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\beta & \sin 2\beta & 0 \\ \cos 2\beta & \cos^2 2\beta & \sin 2\beta \cos 2\beta & 0 \\ \sin 2\beta & \sin 2\beta \cos 2\beta & \sin^2 2\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где β – угол между основной осью поляризатора и кристаллографической осью образца.

Образец и четвертьволновую пластину можно рассматривать как фазовращатель, который описывается матрицей Мюллера следующим образом:

$$M(\theta, \delta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ 1 & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}$$

где коэффициенты $a_{22} - a_{44}$ принимают следующие значения:

$$a_{22} = \cos^2 2\theta + \sin^2 \theta \cos \delta;$$

$$a_{23} = (1 - \cos \delta) \sin 2\theta \cos 2\theta;$$

$$a_{24} = \sin 2\theta \sin \delta;$$

$$a_{32} = (1 - \cos \delta) \sin 2\theta \cos 2\theta;$$

$$a_{33} = \sin^2 2\theta + \cos^2 \theta \cos \delta;$$

$$a_{34} = -\cos 2\theta \sin \delta ; a_{42} = -\sin 2\theta \sin \delta ;$$

$$a_{43} = \cos 2\theta \sin \delta ; a_{44} = \cos \delta .$$

где θ – угол между основной осью четвертьволновой пластины и кристаллографической осью.

Для идеальной четвертьволновой пластины у которой не наблюдается несоответствие длины волны, $\delta = \pi/2$, матрица Мюллера запишется в следующем виде:

$$M\left(\theta, \frac{\pi}{2}\right) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ 1 & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & -\cos 2\theta \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \end{bmatrix} .$$

Тогда круговой полярископ, показанный на рис. 1, можно проанализировать связью матриц Мюллера как:

$$S = S_m + P(\beta)M\left(\alpha, \frac{\pi}{2}\right) \times$$

$$\times M\left(\theta, \delta\right)M\left(\phi, \frac{\pi}{2}\right)P(0)S_0 \quad (1)$$

где S_m – коэффициент, который учитывает фоновое освещение; $P(0)$ и $P(\beta)$ описывают поляризатор и анализатор соответственно; $M(\phi, \pi/2)$, $M(\theta, \delta)$ и $M(\alpha, \pi/2)$ являются первой четвертьволновой пластиной, образцом и второй четвертьволновой пластиной соответственно.

Проверку неточности совмещения оптических осей поляризатора и анализатора мы выполняли на установке, структурная схема которой представлена на рис. 3.

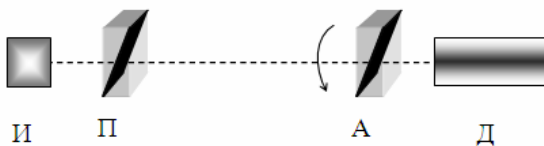


Рисунок 3 – Структурная схема установки для проверки неточности установки поляризатора: И – источник ИК-излучения; П – поляризатор; Д – датчик ИК-излучения

Теоретически излучение на выходе анализатора, можно описать матрицами Мюллера как

$$S = P(\theta)P(0)S_0 ,$$

а интенсивность выходящего излучения запишется как

$$I = I_0 + I_a \sin(\theta) .$$

В данном исследовании поляризатор был зафиксирован в положение 0^0 , и анализатор вращался от 0^0 до 360^0 с шагом 5^0 . Полученные результаты представлены на рис. 4.

Рассмотрим влияние на погрешности измерения остаточных напряжений отклонение от соосности четвертьволновых пластин. В схеме полярископа

пара поляризатор – четвертьволновая пластина используется для того чтобы получить циркулярно-поляризованное излучение, и любое неточное совмещение оптической оси ухудшит качество круговой поляризации.

Поляризатор, оптическая схема которого состоит из поляризатора, четвертьволновых пластин и анализатора, можно описать матрицами Мюллера в виде:

$$S = S_0 + P\left(\frac{\pi}{2}\right)M\left(\theta, \frac{\pi}{2}\right)P(0) ,$$

где $\theta=0,5,\dots,360^0$. Интенсивность излучения определяется как

$$I = I_0 + I_a(1 - \cos^2(\theta)) .$$

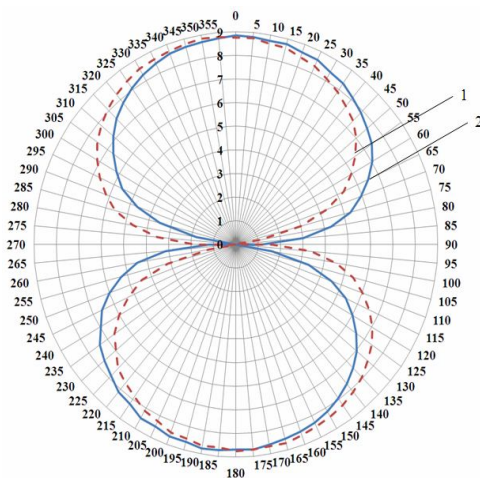


Рисунок 4 – Зависимость интенсивности ИК-излучения, (В) от угла поворота анализатора при закрепленном поляризаторе: 1 – теоретические значения; 2 – экспериментальные значения

Проверку неточности совмещения оптических осей поляризатора и анализатора мы выполняли на установке, структурная схема которой представлена на рис. 5.

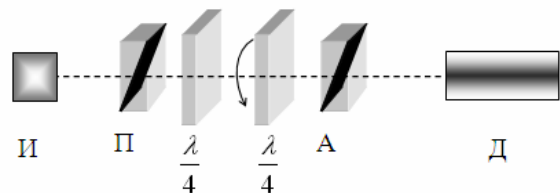


Рисунок 5 – Структурная схема установки для проверки неточности установки поляризатора И – источник ИК-излучения, П – поляризатор, $\lambda/4$ – четвертьволновая пластина, А – анализатор; Д – датчик ИК-излучения

Полученные результаты измерения соосности четвертьволновых пластин и группы анализатор – поляризатор показаны на рис. 6.

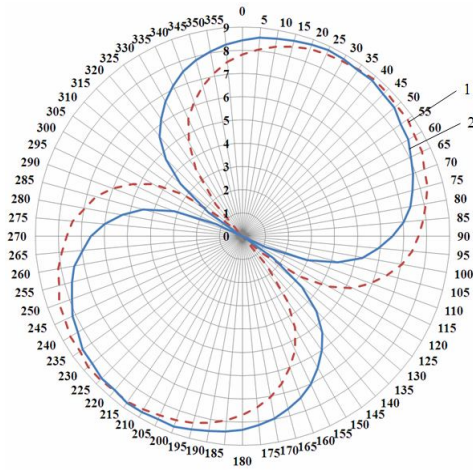


Рисунок 6 – Зависимость интенсивности ИК-излучения, (В) от угла поворота четвертьволновой пластины при закрепленном поляризаторе и анализаторе: 1 – теоретические значения; 2 – экспериментальные значения

С учетом второй четвертьволновой пластины для оценки погрешности необходимо ввести смещение $\Delta\phi$ в пределах $\pm 1^\circ$ в выражение (1). Тогда схема полярископа может быть описана следующим уравнением:

$$S_i = P(\beta_i)M(\alpha_i, \frac{\pi}{2})M(\theta, \delta) \times M(\frac{\pi}{4} + \Delta\phi, \frac{\pi}{2})P(0)S_0$$

где α_i и β_i являются углами поворота четвертьволновой пластины. Для второй пластины систематическая ошибка сдвига фаз, вызванная несоосностью, определяется выражением

$$\Delta\delta = 2\Delta\alpha \sin 2\theta \sin^2 \delta$$

Случайную ошибку второй пластины можно найти следующим образом:

$$S_i = P(\beta_i)M(\alpha_i, \Delta\alpha_i, \frac{\pi}{2}) \times M(\theta, \delta)M(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2})P(0)S_0$$

Тогда общую погрешность, вызванную несоосностью оптических элементов, можно получить при помощи следующих выражений:

$$\Delta\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \delta}{\partial \alpha_i} \Delta\alpha_i \right)^2};$$

$$\Delta\theta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \theta}{\partial \alpha_i} \Delta\alpha_i \right)^2}$$

Анализ случайной и систематической погрешности оптического тракта позволил определить, что

ошибка установки поляризатора $\pm 1^\circ$ приводит к погрешности измерения 0,7 МПа, погрешность в установке четвертьволновых пластин $\pm 1^\circ$ приводит к ошибке измерения 0,5 МПа.

ВЫВОДЫ. 1. Показано, что на погрешность измерения остаточных напряжений в полупроводниковых материалах методом поляриметрии оказывают влияние, кроме аппаратурной части приемного тракта, и погрешности установки элементов оптического тракта, включающего в себя анализатор, поляризатор и четвертьволновую пластину.

2. Получены теоретические выражения, описывающие зависимость величины погрешности от угла поворота анализатора при неподвижном поляризаторе, и погрешности, вызванные поворотом четвертьволновой пластины при закрепленном анализаторе и поляризаторе. В результате практических экспериментов установлена величина поправки $\Delta\phi$, значение которой составляет $\pm 1^\circ$.

3. Установлено, что случайная и систематическая погрешность оптического тракта автоматизированного комплекса измерения остаточных напряжений, вызванная установкой поляризатора, составляет $\pm 1^\circ$, что приводит к погрешности измерения 0,7 МПа, и погрешности в установке четвертьволновых пластин составляет $\pm 1^\circ$, что приводит к ошибке измерения 0,5 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wood. Method for the determination of residual stresses GOST 11603–73 – [Expires on 01.01.1975]. М. Interstate standard. – Publisher standards. – 1998. – P. 11.
2. Wheels of railway rolling stock. Methods for determination of residual stresses GOST R 54093–2010 – [Valid from 01.07.2011]. М. National Standard of the Russian Federation standard. – Publisher standards. – 2011. – 20 p.
3. Автоматизированный комплекс для измерения внутренних напряжений в пластинах GaAs / А.П. Оксанич, С.Э. Притчин, В.Е. Краскевич, В.В. Батареев // Складні системи і процеси. – Запоріжжя, 2006. – № 2. – С. 40–50.
4. Усовершенствование метода измерения остаточных напряжений в подложках арсенид галлия / А.П. Оксанич, С.Э. Притчин, В.А. Тербан // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – Харьков, 2012. – Вып. 161. – С. 222–228.
5. Patterson E. A. Simulation of errors in automated photoelasticity // Experimental Mechanics. – 1998. – Vol. 38. – PP. 132–139.
6. On image analysis for birefringence measurements in photoelasticity / E. A. Patterson, W. Ji, Z. F. Wang // Optics and Lasers in Engineering. –1997. – Vol. 28. – PP. 17–36.
7. Theocaris P.S. Matrix theory of photoelasticity. – Springer-Verlag, New York, 1979. – P. 352.

**ERROR REDUCTION OF THE OPTICAL PATH OF AN AUTOMATED COMPLEX
FOR RESIDUAL STRESS MEASUREMENT**

S. Prytchyn, K. Makarov, A. Yurchenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: pritchinse@ukr.net

Residual stresses in semiconductor substrates and wafers are resulted due to ingots growing and subsequent technological operations. These stresses impact on many important parameters of semiconductor devices, including density of dislocations in gallium arsenide substrates, deformation, and mechanical rigidity. The paper discusses the problems of error reduction of an automated system for residual stresses measurement. The factors affecting the accuracy of measurements are defined. It is shown that setting error of the elements of optical path, that includes analyzer, polarizer, and a quarter-wave plate, affects the total error of measurement. The authors have defined the values of random and systematic errors of optical path of an automated system for residual stress measurement. They amount to $\pm 1^0$, which leads to a measurement error of 0,7 MPa. It has been also defined a setting error of the quarter-wave plates, which is $\pm 1^0$ and, therefore, results in a measurement error of 0,5 MPa.

Key words: residual stresses, the polarimetry method, measurement error.

REFERENCES

1. Wood. Method for determination of residual stresses GOST 11603-73 – [Expires on 01.01.1975]. M. interstate standard. – Publisher standards. – 1998. – 11 p.
2. Wheels of railway rolling stock. Methods for determination of residual stresses GOST R 54093-2010 – [Valid from 01.07.2011]. M. National Standard of the Russian Federation standard. – Publisher standards. – 2011. – 20 p.
3. Oksanych, A.P., Pritchyn, S.E., Kraskevich, V.E., Batareev, V.V. (2006), “An automated system for measurement of internal stresses in the GaAs plates”, *Skladni systemy i protsesy*, no 2, pp. 40–50.
4. Oksanych, A.P., Pritchyn, S.E., Terban, V.A. (2012), “Improvement of a method for measuring residual stresses in the gallium arsenide substrate”, *Automatic control systems and automation devices*, no.161. pp. 222–128.
5. Patterson, E.A. (1998), “Simulation of errors in automated photoelasticity”, *Experimental Mechanics*, vol. 38, pp. 132–139.
6. Patterson, E.A., Ji, W., Wang, Z.F. (1997), “On image analysis for birefringence measurements in photoelasticity”, *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 28, pp. 17–36.
7. Theocaris, P.S. (1979), “Matrix theory of photoelasticity”, Springer-Verlag, New York., USA.

Стаття надійшла 24.01.2014.