

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ  
В ПОДЛОЖКАХ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ**

**С. Э. Притчин**

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

Арсенид галлия является основой изготовления быстродействующих электронных устройств, элементов солнечной энергетики, оптоэлектронных систем, систем инфракрасной оптики. Остаточные напряжения, формируемые в слитках арсенида галлия, оказывают большое влияние практически на все параметры подложки. Измерения этого параметра крайне важно, но в тоже время не существует методики измерения остаточных напряжений, которую можно использовать в заводских условиях. Рассмотрен вопрос разработки методики измерения остаточных напряжений в подложках арсенида галлия. Определены выражения, позволяющие вычислить параметры напряженного состояния. На основе анализа установлена методика RCA подготовки подложек к измерениям. Определена система позиционирования подложки в измерительном тракте в соответствии с кристаллографической ориентацией. Относительная погрешность разработанной методики составила 9 %.

**Ключевые слова:** арсенид галлия, остаточные напряжения, методика измерения.

**РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУГ  
У ПІДКЛАДАХ АРСЕНІДУ ГАЛЛІЮ**

**С. Е. Притчин**

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

Арсенід галію є основою виготовлення швидкодіючих електронних пристроїв, елементів сонячної енергетики, оптоелектронних систем, систем інфрачервоної оптики. Залишкові напруги, що виникають в злитках арсеніду галію, дуже впливають практично на всі параметри підкладки. Вимірювання цього параметра надто важливо, але в той же час не існує методики виміру залишкових напруг, яку можна використовувати в заводських умовах. Розглянуто питання розробки методики виміру залишкових напруг у підкладах арсеніду галію. Визначені вирази, які дозволяють обчислити параметри напруженого стану. На основі аналізу встановлена методика RCA підготовки підкладок до вимірюванням. Визначена система позиціонування підкладки у вимірювальному тракті відповідно до кристаллографічної орієнтації. Відносна похибка розробленої методики склала 9 %.

**Ключові слова:** арсенід галію, залишкові напруги, методика вимірювання.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Арсенид галлия в настоящее время является одним из полупроводниковых материалов, область применения которых постоянно расширяется.

Технология производства слитков арсенида галлия приводит к возникновению в слитках достаточно высоких остаточных напряжений, которые в дальнейшем переходят на подложки. Мероприятия по снижению величины остаточных напряжений, такие как отжиг, не позволяют до конца решить проблему остаточных напряжений [1].

Остаточные напряжения уменьшают механическую прочность подложки, что приводит к ее разрушению в процессе механических обработок, таких как шлифовка и полировка. Деформации подложки, вызванные остаточными напряжениями, приводят к браку изделий при проведении процессов эпитаксии и литографии.

Существует несколько методов и методик измерения остаточных напряжений [2, 3], в тоже время ни одна из этих методик не решает поставленную задачу измерения остаточных напряжений в подложках арсенида галлия. Можно сказать, что на сегодняшний день не существует методики измерения этого параметра в заводских условиях.

Несколько лучше обстоит дело с аппаратурой измерения уровня остаточных напряжений. В последнее время ведется большая работа по разработке и модернизации существующих установок и комплексов использующих метод фотоупругости [4].

Из сказанного выше видно, что задача измерения уровня остаточных напряжений в условиях заводских лабораторий является крайне актуальной.

Целью работы является разработка и апробация методики измерения уровня остаточных напряжений в подложках арсенида галлия, что позволит производить предварительную дефектовку партий подложек и, как следствие, увеличить выход готовой продукции.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Рассмотрим сущность метода фотоупругости применительно к решению задачи измерения уровня остаточных напряжений в подложках арсенида галлия.

Как показано в работе [5], в том случае, если остаточные напряжения отсутствуют в подложке, то показатель преломления не зависит от направления распространения и состояния поляризации луча, распространяющегося в подложке. Если в подложке присутствуют напряжения, то формируются два ортогональных направления, для которых показатель преломления принимает наибольшее  $n_1$  и наименьшее  $n_2$ , при этом разность этих показателей преломления определяется разностью главных напряжений и чувствительностью к напряжениям в подложке.

В общем случае пьезооптические свойства кристаллов с кубической решеткой, к которым относится GaAs, описываются матрицей пьезооптических коэффициентов [6]:

$$\begin{pmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{21} & \pi_{22} & \pi_{23} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{31} & \pi_{32} & \pi_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{66} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где коэффициенты  $\pi_{ij}$  характеризуют изменение  $B$  – диэлектрической непроницаемости – в направлении оси  $X$  (при  $i=1$ ), в направлении оси  $Y$  (при  $i=2$ ), в направлении оси  $Z$  (при  $i=3$ ). Индексы, значение которых больше трех, характеризуют направление осей, составляющих угол  $\pi/4$  с осями  $X$  и  $Y$ , при  $i=4$ ,  $Y$  и  $Z$  – при  $i=5$ ,  $Z$  и  $X$  – при  $i=6$ . Эти изменения вызваны действием напряжения  $\sigma_x$ , если  $j=1$ ,  $\sigma_y$ , если  $j=2$ ,  $\sigma_z$ , если  $j=3$ ,  $\tau_{xy}$  – если  $j=4$ ,  $\tau_{yz}$  – если  $j=5$  и  $\tau_{zx}$  – если  $j=6$ .

На основании положений изложенных в работе [7] можно записать что:

$$\begin{aligned} \pi_{11} &= \pi_{22} = \pi_{33}, \\ \pi_{12} &= \pi_{21} = \pi_{13} = \pi_{31} = \pi_{23} = \pi_{32}, \\ \pi_{44} &= \pi_{55} = \pi_{66}, \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда можно записать выражения для напряжений в системе координат  $OXY$ :

$$\begin{aligned} \sigma X &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\beta, \\ \sigma Y &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\beta, \\ \tau XY &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\beta, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\beta$  – угол между положительным направлением оси  $OX$  и направлением  $\sigma_1$ .

Умножая соответствующие элементы матрицы (3) на компоненты тензора напряжений в точке (4) и учитывая, что в случае плоско-напряженного состояния для подложки GaAs ориентации (100)

$$\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{zx} = \tau_{yz} = \tau_{zy} = 0, \quad (4)$$

можно найти изменение диэлектрической непроницаемости как

$$\begin{aligned} \Delta B_x &= \pi_{11}\sigma_x + \pi_{12}\sigma_y, \\ \Delta B_y &= \pi_{11}\sigma_y + \pi_{12}\sigma_x, \\ \Delta B_{xy} &= \pi_{44}\tau_{xy}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\Delta B_{xy}$  – изменение диэлектрической непроницаемости в направлении биссектрисы угла между осями  $X$  и  $Y$ .

Для определения главных значений показателя преломления подложки GaAs запишем уравнение оптической индикатрисы, которая при отсутствии внутренних напряжений имеет вид сферы радиуса  $n_0$ :

$$\frac{x^2}{n_0^2} + \frac{y^2}{n_0^2} + \frac{z^2}{n_0^2} = 1, \quad (6)$$

где  $n_0$  – показатель преломления ненапряженной подложки.

Если провести сечение этой сферы поверхностью (100) то в сечении получится окружность радиуса  $n_0$ :

$$\frac{x^2}{n_0^2} + \frac{y^2}{n_0^2} = 1. \quad (7)$$

Так как диэлектрическая проницаемость и показатель преломления связаны соотношением

$$B_0 = \frac{1}{n_0^2}, \quad (8)$$

то (8) преобразуется к виду

$$B_0 x^2 + B_0 y^2 = 1. \quad (9)$$

Для напряженного кристалла сечение индикатрисы будет представлять собой эллипс, описываемый уравнением

$$x^2(B_0 + \Delta B_x) + y^2(B_0 + \Delta B_y) + 2xy\Delta B_{xy} = 1. \quad (10)$$

Для упрощения выражения (10) обозначим коэффициенты при  $x^2$ ,  $y^2$  и  $xy$ , соответственно через  $A$ ,  $B$  и  $C$ , получим

$$Ax^2 + By^2 + 2Cxy = 1 \quad (11)$$

Уравнение (11) описывает эллипс, оси которого не совпадают с осями системы координат  $XOY$ . Необходимо привести выражение (11) к каноническому виду  $Ax^2 + By^2 = 0$ , где коэффициенты  $A$  и  $B$  являются корнями уравнения

$$\lambda^2 - (A + B)\lambda + \begin{vmatrix} A & C \\ C & B \end{vmatrix} = 0, \quad (12)$$

или, раскрывая определитель матрицы получим,

$$\lambda^2 - (A + B)\lambda + AB - C^2 = 0, \quad (13)$$

откуда получим:

$$\lambda_{1,2} = B_0 + \frac{\Delta B_x + \Delta B_y}{2} \pm \sqrt{\frac{(\Delta B_x + \Delta B_y)^2}{4} + \Delta B_{xy}^2}. \quad (14)$$

В этом случае можно записать что  $\Delta B_x + \Delta B_y = 0$ .

Для этого уравнение эллипса, оси которого совпадают с осями развернутой системы  $X_1OY_1$ , запишем в виде

$$B(\varphi) = B_0 + \Delta B_{\max} \cos 2\varphi, \quad (15)$$

где  $B(\varphi)$  – значение диэлектрической непроницаемости в направлении  $u$  относительно оси  $OX_1$ ;  $\Delta B_{\max}$  – максимальное изменение диэлектрической непроницаемости.

Тогда можно предположить справедливость следующих равенств:

$$\Delta B_x = \Delta B_{\max} \cos 0 = \Delta B_{\max}, \quad (16)$$

$$\Delta B_y = \Delta B_{\max} \cos 2 \cdot \frac{\pi}{2} = -\Delta B_{\max},$$

Следовательно  $\Delta B_x = -\Delta B_y$ , что и требовалось доказать.

Записав (14) в виде

$$\lambda_{1,2} = B_0 \pm \sqrt{\frac{(\Delta B_x - \Delta B_y)^2}{4} + \Delta B_{xy}^2}. \quad (17)$$

Подставляя в (17) значения изменений диэлектрической проницаемости из (5) и учитывая (8), получим

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{n_0^2} \pm \sqrt{\frac{(\pi_{11} - \pi_{12})^2 (\sigma_x - \sigma_y)^2}{4} + \pi_{44}^2 \tau_{xy}^2}, \quad (18)$$

Данное выражение описывает главные значения диэлектрической проницаемости:

$$B_{\max} = \frac{1}{n_0^2} + \Delta B_{\max} \quad (19)$$

$$B_{\min} = \frac{1}{n_0^2} - \Delta B_{\max}, \quad (20)$$

или с учетом (8)

$$n_1 = n_{\max} = \frac{1}{\sqrt{B_{\min}}} \quad (21)$$

$$n_2 = n_{\min} = \frac{1}{\sqrt{B_{\max}}}. \quad (22)$$

Выполнив преобразование, получим следующее выражение:

$$n_1 = n_0 + \frac{n_0^3}{4} (\sigma_1 - \sigma_2) \sqrt{(\pi_{11} - \pi_{12})^2 \cos^2 2\beta + \pi_{44}^2 \sin^2 2\beta}, \quad (23)$$

$$n_2 = n_0 - \frac{n_0^3}{4} (\sigma_1 - \sigma_2) \sqrt{(\pi_{11} - \pi_{12})^2 \cos^2 2\beta + \pi_{44}^2 \sin^2 2\beta}. \quad (24)$$

Разность главных значений показателей преломления равна:

$$\Delta n = n_1 - n_2 = \frac{n_0^3}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \times \sqrt{(\pi_{11} - \pi_{12})^2 \cos^2 2\beta + \pi_{44}^2 \sin^2 2\beta}. \quad (25)$$

Следовательно, чувствительность подложки ориентации (100) к внутренним напряжениям равна:

$$C_{100} = \frac{n_0^3}{2} \sqrt{(\pi_{11} - \pi_{12})^2 \cos^2 2\beta + \pi_{44}^2 \sin^2 2\beta}. \quad (26)$$

Определим угол, соответствующий максимальной скорости распространения нормального к плоскости плоскополяризованного инфракрасного излучения. Этот угол соответствует минимальному значению показателя преломления и максимальному значению диэлектрической проницаемости. Для этого уравнение эллипса запишем в полярной системе координат

$$B(\varphi) = B_0 + \Delta B_{\max} \cos 2(\varphi - \alpha), \quad (27)$$

где  $\alpha$  – угол между осью OX и направлением, соответствующим наибольшей скорости распределения излучения.

Подставляя в (26) значения  $\varphi = 0$  и  $\varphi = \pi/4$ , найдем  $B_x$  и  $B_{xy}$ :

$$B_x = B_0 + \Delta B_{\max} \cos(-2\alpha) = B_0 + \Delta B_{\max} \cos 2\alpha, \quad (28)$$

$$B_{xy} = B_0 + \Delta B_{\max} \cos 2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = B_0 + \Delta B_{\max} \sin 2\alpha, \quad (29)$$

откуда

$$\Delta B_x = \Delta B_{\max} \cos 2\alpha, \quad (30)$$

$$\Delta B_{xy} = \Delta B_{\max} \sin 2\alpha, \quad (31)$$

Разделив (30) на (31), получим

$$\frac{\Delta B_{xy}}{\Delta B_x} = \frac{\sin 2\alpha}{\cos 2\alpha} = \operatorname{tg} 2\alpha,$$

или, учитывая (2) и (5) получим:

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\pi_{44}}{(\pi_{11} + \pi_{12})} \operatorname{tg} 2\beta, \quad (32)$$

откуда

$$\beta = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left( \frac{(\pi_{11} - \pi_{12}) \operatorname{tg} 2\alpha}{\pi_{44}} \right). \quad (33)$$

Выражение (33) позволяет определить угол наклона  $\beta$  главных напряжений к координатным осям по известному углу наклона оси, называемой "быстрой осью" и соответствующей наибольшей скорости распространения света. Анализ (33) показывает, что главные направления в подложке ориентации (100) совпадают с направлениями главных напряжений только в двух случаях, когда

$$\operatorname{tg} 2\alpha = 0, \quad (34)$$

или

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \infty, \quad (35)$$

что соответствует значениям азимута быстрой оси  $\alpha = 0$  и  $\alpha = \pi/4$ .

В остальных случаях эти направления не совпадают, и угол рассогласования между ними определяется соотношением пьезооптических коэффициентов  $\frac{(\pi_{11} - \pi_{12})}{\pi_{44}}$ .

Как известно подложки ориентации (111) являются изотропными. Для таких подложек главные направления совпадают с главными напряжениями, следовательно  $\alpha = \beta$ . Направление "быстрой оси" совпадает с направлением наибольшего из напряжений. Таким образом, чувствительность подложек ориентации (111) к внутренним напряжениям равна

$$C_{111} = \frac{n_0^3}{6} (2\pi_{44} + (\pi_{11} - \pi_{12})). \quad (36)$$

Таким образом, выражения (27), (33) и (36) позволяют определить все компоненты плосконапряженного состояния для пластин (100) и (111).

Методика измерения остаточных напряжений в подложках арсенида галлия включает в себя ряд этапов:

- подготовка подложек к измерениям;
- ориентация подложки относительно направления ИК излучения;
- измерение остаточных напряжений методом поляриметрии.

Для подготовки подложек к измерениям нами были проанализированные различные методики [8, 9] и выбрана методика подготовки RCA, суть которой заключается в следующем:

- обезжиривание в ПАВ с последующей промывкой в дистиллированной воде;
- травление в растворе  $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 1:1:5$  при  $70^\circ\text{C}$  в течение 15 мин для удаления органических компонентов с последующей промывкой в дистиллированной воде;
- травление в растворе  $\text{HF}:\text{H}_2\text{O} = 1:20$  при выдержке 15 с в установке травления с последующей промывкой в дистиллированной воде;
- травление в течение 15 с в 4,7 %-ом растворе  $\text{HF}$  с последующей промывкой в дистиллированной воде.

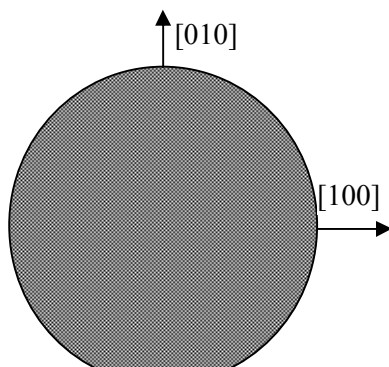


Рисунок 2 – Позиционирование подложки арсенида галлия в измерительном тракте поляриметра

Как показано в работе [10], величина остаточные напряжения зависит от кристаллографического направления. Поэтому для повторяемости измерений величины остаточных напряжений необходимо производить позиционирование подложки в измерительном тракте поляриметра. Учитывая, что подложки ориентации (111) являются изотропными, их ориентация в приемном тракте не влияет на результат измерений. Подложки ориентации (100) необходимо устанавливать в направлении оси [010] направленной вертикально. Такая ориентация обеспечивает наибольшую чувствительность приемного тракта при измерении остаточных напряжений.

Учитывая сложность измерения величины остаточных напряжений, вызванную толщиной подложки, составляющей 600 мкм для подложек диаметром 76,2 и 700 мкм – для подложек диаметром 101,6 мм, что требует высокочувствительной аппаратуры, в качестве средства измерения используется поляриметр, предложенный в [11].

Для оценки погрешности разработанной методики нами был проведено сравнение полученных ре-

зультатов измерения остаточных напряжений по разработанной методике и методом рентгеноструктурного анализа.

Измерение остаточных напряжений выполнялись для подложек ориентации (100) и (111) в девяти точках, положение которых определялось по специально изготовленному шаблону, который представлен на рис. 3.

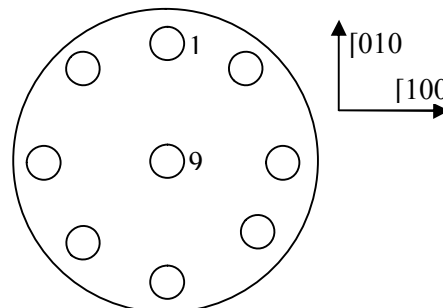


Рисунок 3 – Расположение точек, в которых производилось измерение остаточных напряжений, и направление ориентации подложки при проведении измерений

Сравнительные результаты измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Величины остаточных напряжений в подложках арсенида галлия

№ точки	Остаточные напряжения, МПа (рентген.-стр. метод)		Остаточные напряжения, МПа (разработ. методика)	
	(100)	(111)	(100)	(111)
1	8,7	6,2	8,1	5,7
2	2,1	6,0	1,8	5,2
3	7,9	5,8	7,4	6,3
4	1,8	5,8	1,4	5,2
5	8,0	6,0	8,3	5,4
6	1,7	6,2	2,1	6,1
7	7,5	6,0	7,9	6,4
8	2,3	5,9	1,9	5,2
9	1,3	0,9	0,9	1,3

Сравнение результатов измерения остаточных напряжений показали достаточно хорошее совпадение. Рассчитанное значение относительной погрешности разработанной методики составило 9 %.

**ВЫВОДЫ.** 1. Получены выражения, позволяющие определить все параметры напряженного состояния подложек арсенида галлия.

2. Предложена методика подготовки поверхности подложек для проведения измерений остаточных напряжений.

3. Разработана методика измерения остаточных напряжений в подложках арсенида галлия. Относительная погрешность методики составила 9 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Surface annealing of gallium arsenide studied with low-energy positrons / H.E. Evans, P.C. Rice-Evans, D.L. Smith, G.A. Gledhill and A.M. Moore // J. Phys.: Condens. Matter. – 1992. – PP. 1859–1863.
2. Quantitative measurement of stress in silicon by photoelasticity and its application. / H. Kotake, Shin.

Takasu // *J. Electrochem. Soc.* – 1980. – Vol. 127(1). – PP. 179–184.

3. Nondestructive measurement of in plane residual stresses in thin silicon substrates by infrared transmission / Tiewu Zheng, S. Danyluk // *Materials Evaluation*. – 2001. – Vol. 59(10). – PP. 1227–1233.

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. Введение в фотомеханику. Поляризационно-оптический метод / А.Дюрелли, У. Райли; пер. с англ.; под ред. Н.И. Пироговского. – М.: Мир, 1970. – 484 с.

6. Метод фотоупругости. В 3-х т., Т. 2. Методы поляризационно-оптических измерений. Динамическая фотоупругость / Н.А. Стрельчук, Г.Л. Хесин. – М.: Стройиздат, 1975. – 367 с.

7. Quantitative photoelastic measurement of resi-

dual strains in undoped semi-insulating gallium arsenide / M. Yamada // *Appl. Phys.* – 1985. – Lett. 47. – PP. 365–367.

8. The production technology of semi-conductor structures / B. Shwartz, H. Robbins // *J. Electrochem. Soc.* – 1976. – Vol. 1906. – PP. 123–128.

9. The evolution of silicon wafer cleaning technology / W. Kern // *J. Electrochem. Soc.* – 1990. – Vol. 137. – № 6. – PP. 1887–1890.

10. Определение влияния кристаллографической ориентации на механические свойства арсенида галлия / С.Э. Притчин // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – Част. 3. – С. 209–211.

11. Уменьшение погрешности оптического тракта автоматизированного комплекса измерения остаточных напряжений / С.Э. Притчин, К.В. Макаров, А.П. Юрченко // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. – 2014. – Вып. 1/2014 (84). – С. 29–33.

### TECHNIQUE DEVELOPMENT FOR MEASUREMENT OF RESIDUAL STRESSES IN GALLIUM ARSENIDE SUBSTRATES

#### S. Prytchin

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

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

Gallium arsenide is a basis for the manufacturing of high-speed electronic devices, solar energy components, optoelectronic systems, infrared optics. Residual stresses generated in GaAs ingots have a great impact on virtually all the parameters of the substrate. Residual stresses measurement is very important, but at the same time there is no residual stress measurement techniques that can be used in factory conditions. The paper deals with the development of the measuring methods for residual stress in gallium arsenide substrates. We have defined expressions that allow for parameters calculation of the stress state. Based on the analysis, it was defined the RCA methodology for preparing substrates for measurements. The system of substrate positioning in the measurement path in accordance with its crystallographic orientation was determined. Relative error of the developed method is 9 %.

**Key words:** gallium arsenide, residual stresses, measurement technique.

#### REFERENCES

1. Evans, H.E. Rice-Evans, P.C., Smith, D.L. Gledhill, G.A., and Moore, A.M. (1992), “Surface annealing of gallium arsenide studied with low-energy positrons”, *J. Phys.: Condens. Matter*, pp. 1859–1863.

2. Kotake, H., Takasu, Shin. (1980), “Quantitative measurement of stress in silicon by photoelasticity and its application”, *J. Electrochem. Soc.*, no. 127(1), pp. 179–184.

3. Tiewu Zheng, Danyluk, S. (2001), “Nondestructive measurement of in plane residual stresses in thin silicon substrates by infrared transmission”, *Materials Evaluation*, no. 59(10), pp. 1227–1233.

4. Oksanych, A.P., Pritchyn, S.E., Terban, V.A. (2012), “Improvement of the method for measuring residual stresses in the gallium arsenide substrate”, *Automatic control systems and automation devices*, Kharkiv, no. 161. pp. 222–228.

5. Diurelli, A., Raili, U. (1970), *Vvedenie v fotomehaniku. Poliarizatsionno-opticheskii metod* [Introduction to photomechanics. The polarizing and optical method], Trans. from English by N.I. Pirogovskii, Mir, Moscow, Russia.

6. Strelchuq, N.A., Khesin, G L. (1975), *Metody poliarizatsionno-opticheskikh izmerenii* [Methods of

polarization and optical measurements], Stroiizdat, Moscow, Russia.

7. Yamada, M. (1985), “Quantitative photoelastic measurement of residual strains in undoped semi-insulating gallium arsenide”, *Appl. Phys.*, lett. 47, pp. 365–367.

8. Shwartz, B., Robbins, H. (1976), “The production technology of semi-conductor structures”, *J. Electrochem. Soc.*, vol. 1906, pp. 123–128.

9. Kern, W. (1990), “The evolution of silicon wafer cleaning technology”, *J. Electrochem. Soc.*, vol. 137, no. 6, pp. 1887–1890.

10. Pritchyn, S.E. (2012), “Opredelenie vliianiia kristallograficheskoi` orientatsii na mehanicheskie svoi`stva arsenida galliia”, *Tekhnichna elektrodinamika*, no. 3, pp. 209–211.

11. Pritchyn, S.E., Maqarov, K.V., Iurchenko, A.P. (2014), “Umenshenie pogreshnosti opticheskogo traqta avtomatizirovannogo qompleksa izmereniia ostatochnykh napriazhenii”, *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, vol. 1, no. 1(85), pp. 29–33.

Стаття надійшла 30.03.2014.