

АНАЛИЗ ФОРМ ДЕФОРМАЦИЙ ПЛАСТИН АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ В ПРОЦЕССЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

А. П. Оксанич, М. Г. Когдась

Кременчугский университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: kogdasMAX@yahoo.com

Проанализированы основные влияния механической и тепловой обработки на процесс изготовления пластин GaAs, применяемых при производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем. Каждая из этих сфер использования накладывает свои собственные требования относительно качества кристалла. Получены сложные формы деформации пластин GaAs в плоскости (100) диаметром 100 мм. Установлено, что при обработке пластин большего диаметра с ориентацией (100) возникает сложный изгиб, эпюры которого имеют экстремумы в одном из кристаллографических направлений $\langle 001 \rangle$. Показано, что в пластинах GaAs (100) вступают в силу упругие постоянные модуль Юнга и коэффициент Пуассона, которые в плоскости (100) являются анизотропными. Установлено, что деформация пластин арсенида галлия больше в направлениях [001] и [010], что также подтверждается результатами распределения главных напряжений ($\sigma_1 - \sigma_2$). Кроме того, установлено, что в момент остывания, при достижении температуры, равной $\approx 75\%$ температуры плавления, пластина начинает терять устойчивость.

Ключевые слова: деформация, изгиб, упругие постоянные.

АНАЛІЗ ФОРМ ДЕФОРМАЦІЙ ПЛАСТИН АРСЕНІДУ ГАЛІЮ У ПРОЦЕСІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

А. П. Оксанич, М. Г. Когдась

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: kogdasMAX@yahoo.com

Проаналізовано основні впливи механічної і теплової обробки на процес виготовлення пластин GaAs, що застосовуються при виробництві напівпровідникових приладів та інтегральних схем. Кожна з цих сфер використання накладає свої власні вимоги щодо якості кристалу. Отримані складні форми деформації пластин GaAs у площині (100) діаметром 100 мм. Встановлено, що при обробці пластин великого діаметру з орієнтацією (100) виникає складний вигин, епюри якого мають екстремуми в одному із кристаллографічних напрямків $\langle 001 \rangle$. Показано, що в пластинах GaAs (100) вступають в силу пружні постійні модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона, які в площині (100) є анізотропними. Встановлено, що деформація пластин арсеніду галію є більшою в напрямках [001] і [010], що також підтверджується результатами розподілу головних напруг ($\sigma_1 - \sigma_2$). Також встановлено, що в момент охолодження, при досягненні температури, що дорівнює $\approx 75\%$ температури плавлення, пластина починає втрачати стійкість.

Ключові слова: деформація, вигин, пружні постійні.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В процессе изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем пластины арсенида галлия подвергаются различным механическим и термическим воздействиям – шлифовке и полировке, диффузии примесей, разделению на заготовки и т.д.

При этом в пластинах арсенида галлия возникают дефекты, снижающие их механическую прочность и ухудшающие электрические параметры приборов.

Исследование пластической деформации имеет большое практическое значение для повышения эффективности производства полупроводниковых приборов и интегральных схем, т.к. способствует улучшению параметров и повышению надежности этих важнейших изделий электронной техники.

В работе [1] показано, что пластическая деформация пластин во время высокотемпературной обработки возникает вследствие температурного градиента между краем и центром пластины. В работе [2] показано влияние дислокаций на величину механической прочности.

Деформация пластин также приводит к искажению формы и размеров элементов топологии интегральных схем и влияет на один из важных параметров – суммарное отклонение от параллельности и плоскостности.

Таким образом, можно утверждать, что деформация пластин может усложнить технологические стадии, такие как фотолитография, диффузия, эпитаксия и т.д., а также могут изменить электрические характеристики готовых полупроводниковых устройств и микросхем

Целью данной работы является исследование сложных форм деформаций пластин арсенида галлия, возникших в процессе механической и тепловой обработки.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для кристаллов закон Гука можно записать в матричной форме:

$$\varepsilon_m = \sum_{n=1}^6 S_{nm} \sigma_n, \quad (m=1..6) \quad (1)$$

где ε_m – деформация, σ_n – механическое напряжение, S_{nm} – матрица коэффициентов податливости.

Арсенид галлия имеет кубическую структуру кристалла, поэтому, если совместить растягивающие и сдвиговые напряжения с основными кристаллографическими направлениями в плоскости $\langle 100 \rangle$, то матрица S_{nm} примет вид:

$$S_{nm} = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} \end{vmatrix} \quad (2)$$

Из работы [3] известно, что основные упругие постоянные модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν связаны с соответствующими коэффициентами податливости:

$$E = 1/S_{11}, \quad \nu = -S_{12}/S_{11}. \quad (3)$$

В плоскости (100) величины E и ν меняются в зависимости от кристаллографических направлений, в частности $E_{<011>}^{макс} = 121 \text{ ГПа}$ и $E_{<001>}^{мин} = 85 \text{ ГПа}$, $\nu_{<011>}^{мин} = 0,01$ и $\nu_{<001>}^{макс} = 0,315$.

Из (3) следует, что

$$S_{11} = 1/E, \quad S_{12} = -\nu/E \quad (4)$$

Из закона Гука (1) и (4), получим

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= 1/E [\sigma_{11} - \nu(\sigma_{22} + \sigma_{33})], \\ \varepsilon_{22} &= 1/E [\sigma_{22} - \nu(\sigma_{33} + \sigma_{11})], \\ \varepsilon_{33} &= 1/E [\sigma_{33} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{22})]. \end{aligned} \quad (5)$$

В случае тонких пластин, компоненты напряжений $\sigma_{33}=0$, следует ($\varepsilon_{11}=\varepsilon_1$, $\varepsilon_{22}=\varepsilon_2$, $\sigma_{11}=\sigma_1$, $\sigma_{22}=\sigma_2$):

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= (E/(1-\nu^2)) \cdot (\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2) \\ \sigma_2 &= (E/(1-\nu^2)) \cdot (\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1) \end{aligned} \quad (6)$$

Если главные напряжения σ_1 и σ_2 действуют по основным кристаллографическим направлениям [001] и [010] в плоскости (100). В этом случае из (6) следует:

$$\sigma_1 = \frac{E_{<001>(100)}}{1-\nu_{<001>(100)}^2} (\varepsilon_1 - \nu_{<001>(100)} \varepsilon_2) \quad (7)$$

$$\sigma_2 = \frac{E_{<001>(100)}}{1-\nu_{<001>(100)}^2} (\varepsilon_2 - \nu_{<001>(100)} \varepsilon_1)$$

Если главные напряжения σ_1 и σ_2 действуют по кристаллографическому направлению [011] в плоскости (100), то из (6) следует:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E_{<011>(100)}}{1-\nu_{<011>(100)}^2} (\varepsilon_1 - \nu_{<011>(100)} \varepsilon_2) \\ \sigma_2 &= \frac{E_{<011>(100)}}{1-\nu_{<011>(100)}^2} (\varepsilon_2 - \nu_{<011>(100)} \varepsilon_1) \end{aligned} \quad (8)$$

Из [4] известно что «жесткость» пластины равна

$$G = \frac{Eh^3}{12-(1-\nu^2)}. \quad (9)$$

Значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона занесены в табл. 1.

Таблица 1 – Результат расчета упругих постоянных модуля Юнга, коэффициента Пуассона и жесткости

	Плоскость (100)		
	<010>	<011>	<001>
$E \cdot 10^{11} \text{ Па}$	0,85	1,21	0,85
ν	0,315	0,01	0,315
$G \cdot 10^8 \text{ Па}$	0,265	0,324	0,265

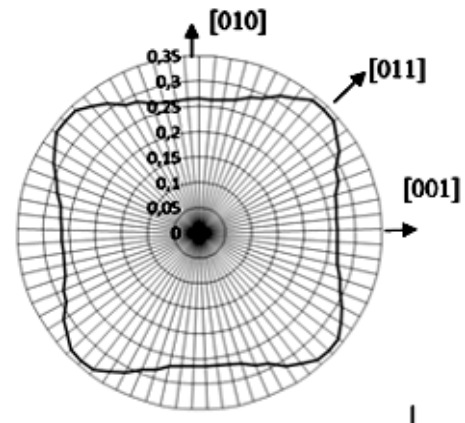


Рисунок 1 – График рассчитанного значения жесткости (G , Па) в плоскости (100) пластины GaAs

Под действием главных напряжений σ_1 и σ_2 пластина теряет устойчивость в одном из слабых направлений [100], например, в направлении <100>. При этом, вследствие высокого значения коэффициента Пуассона при возникновении деформации ε_1 действующее напряжение в перпендикулярном направлении уменьшается, и пластина устойчивость в этом направлении не теряет. При дальнейшем росте напряжения пластине выгодно потерять устойчивость, изогнувшись в другую сторону, т.к. при этом напряжения, возникающие за счет действия коэффициента Пуассона, складываются с приложенными напряжениями, тогда как при изгибе в одну сторону напряжение, возникающее за счет коэффициента Пуассона, вычитается из приложенного напряжения. При этом возникает "антикластический" изгиб.

Воздействие различных факторов приводит к возникновению в пластинах GaAs внутренних напряжений. Эти напряжения приводят к упругой деформации (изгибу) пластин арсенида галлия.

Расчет главных нормальных компонент внутренних напряжений производился при использовании соотношений (7) и (8) путем построения кругов Мора по экспериментально измеренным изгибам в трех направлениях [001], [011] и [010] для плоскости (100). Величина деформаций ε рассчитывалась из соотношения:

$$\varepsilon = \frac{2}{3} \cdot \frac{h}{R} = \frac{2}{3} \cdot \frac{8fh}{D^2} \quad (10)$$

где f – изгиб пластины; R – радиус изгиба;
 D – диаметр пластины, h – толщина пластины.

Результаты рассчитанных и измеренных значений (полученных на установке «Полярон-4») главных напряжений (σ_1 – σ_2) представлены на рис. 2.

◆ σ_1 – σ_2 (теор. расчет)

△ Полярон-4 (Эксперимент)

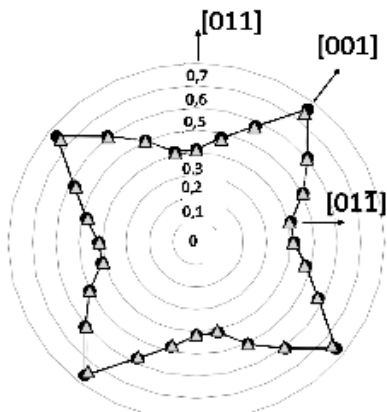


Рисунок 2 – Наспределение разности главных напряжений ($\sigma_1 - \sigma_2$) · 10¹¹ Па в пластине GaAs в плоскости (100)

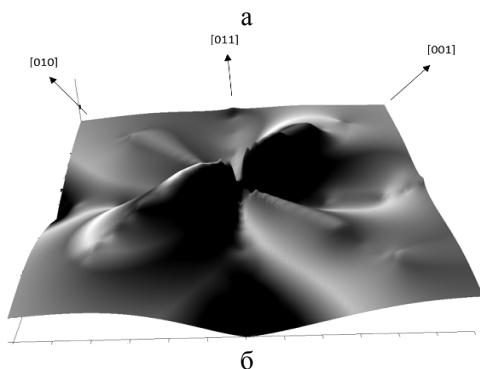
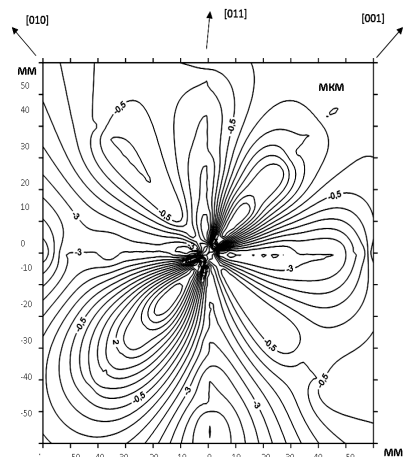


Рисунок 3 – Изгибы пластины GaAs № 1 в плоскости (100) в зависимости от кристаллографического направления (а – эпюры; б – 3D изображение)

Резка слитка GaAs на пластины толщиной 5 мм производилась на станке «Алмаз-4» с частотой вращения диска 1500 оборотов в минуту. Данные характеристики станка не влияли на деформацию пластины, тогда как увеличение числа оборотов диска до 3000 обор./мин. приводило к увеличению изгиба пластины на 30–40 %, а также к растрескиванию пластин по кристаллографическим направлениям [001] и [010].

Далее пластины GaAs подвергались двухсторонней алмазной полировке до толщины 1,2 мм. Измерения сложных форм деформаций производились на разработанной нами установке «Микрон-1» [5].

Были проведены измерения пяти пластин арсенида галлия с ориентацией (100), три пластины вырезаны из средней части слитка (рис. 3–5), две из нижней части слитка (рис. 6, 7), легированными хромом, с концентрацией примесей $5 \cdot 10^{14}$ см⁻³, удельным сопротивлением 10^7 Ом·см, диаметром 92 мм. По результатам измерений были построены эпюры изгибов и 3D изображения деформаций в зависимости от кристаллографического направления (рис. 3–7). Как видно из рисунков деформация пластин арсенида галлия больше в направлениях [001] и [010], что также подтверждается результатами распределения главных напряжений (σ_1 – σ_2) (рис. 2).

Также на пластинах вырезанных из нижней части слитка (рис. 6, 7) деформации уменьшаются, так как внутренние напряжения уменьшаются в два раза относительно верхней части слитка [6].

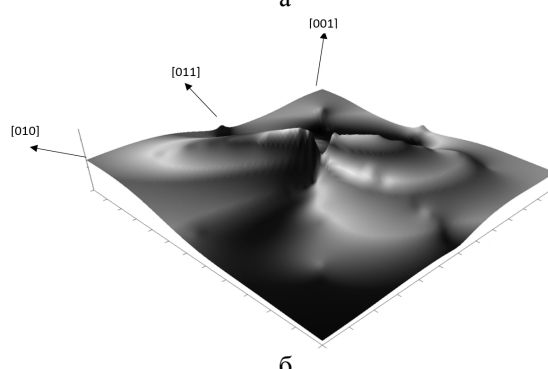
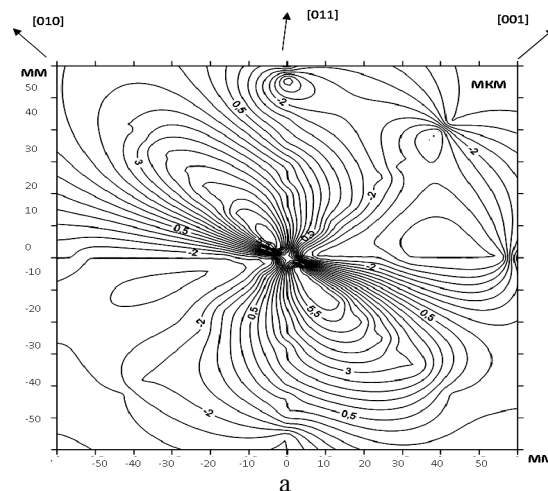
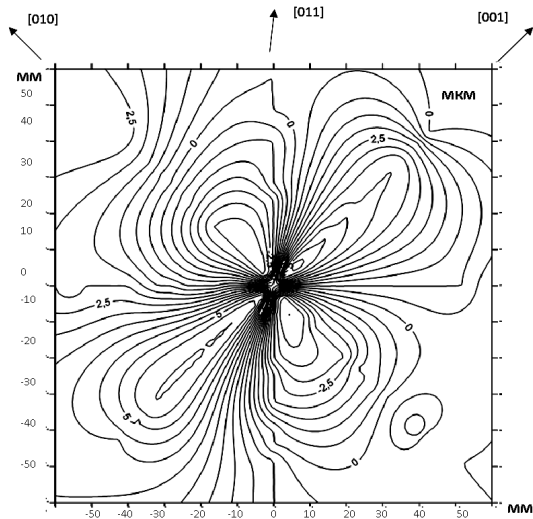
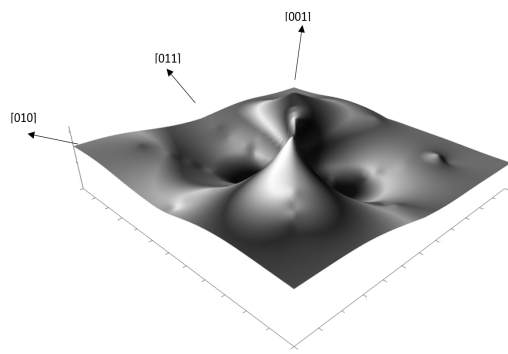


Рисунок 4 – Изгибы пластины GaAs № 2 в плоскости (100) в зависимости от кристаллографического направления (а – эпюры; б – 3D изображение)

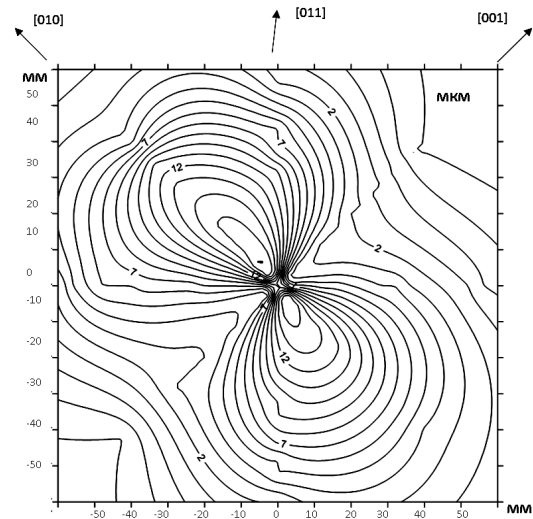


а

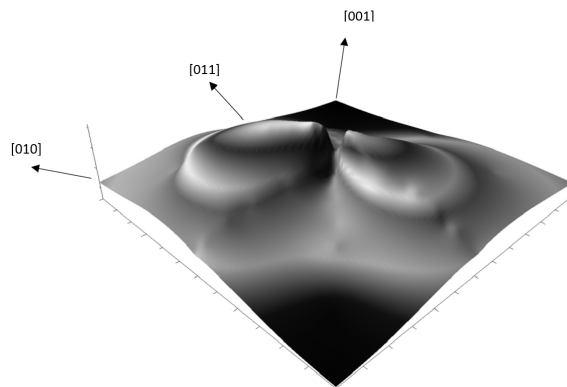


б

Рисунок 5 – Изгибы пластины GaAs № 3 в плоскости (100) в зависимости от кристаллографического направления (а – эпюры; б – 3D изображение)



а



б

Рисунок 6 – Изгибы пластины GaAs № 4 в плоскости (100) в зависимости от кристаллографического направления (а – эпюры; б – 3D изображение)

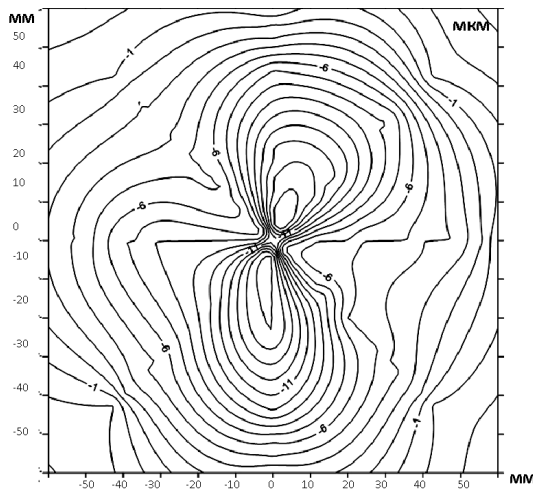
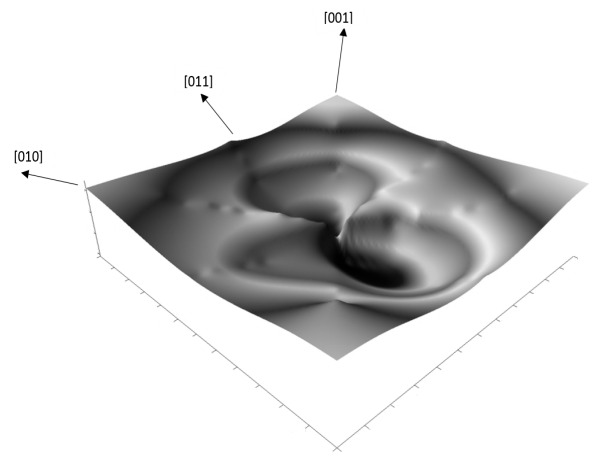


Рисунок 7 – Изгибы пластины GaAs № 5 в плоскости (100) в зависимости от кристаллографического направления (а – эпюры; б – 3D изображение)



Таким образом, величина прогиба по различным кристаллографическим направлениям возникает

при изменении величины упругих напряжений ($\sigma_1 - \sigma_2$) и отношение упругих констант $(1 - \nu)/E$.

Как видно из рис. 3–7, эпюры изогнутости имеют вид «розетки», вытянутой в большинстве случаев вдоль одного из направлений $\langle 001 \rangle$. Направления с «положительным» изгибом выбраны по $[001]$, а направления с «отрицательным» изгибом – по $[010]$.

Пластины изгибались равновероятно как по направлению $[001]$, так и по направлению $[010]$. Изогнувшись в одном «слабом» направлении по поверхности структуры, наиболее возможно продолжение изгиба в этом направлении. Одновременно пластина изгибается в направлении, перпендикулярном предыдущему, благодаря зависимости коэффициента Пуассона.

В момент остывания, при достижении температуры равной $\approx 75\%$ температуры плавления [7], пластина начинает терять устойчивость, изгибается и по кристаллографическим направлениям в ней возникают неоднородные напряжения изгиба, максимальная величина которых превышает значения напряжений сжатия и, следовательно, превышает предел пластичности, из-за которого возникает пластическая деформация, приводящая к изгибу пластины после охлаждения.

ВЫВОДЫ.

1. Впервые определено распределение формы деформации пластин GaAs диаметром 100 мм после механической обработки в зависимости от кристаллографических направлений.

2. Установлено, что при обработке пластин GaAs большего диаметра с ориентацией (100) возникает сложный изгиб, эпюры которого имеют экстремумы в одном из кристаллографических направлений $\langle 001 \rangle$.

3. Установлено, что для пластин GaAs, ориентированной в плоскости (100) жесткость пластины определяется выражением $(1-\nu)/E^2$. Эти пластины в направлении $[001]$ имеют жесткость на 26 % ниже, чем в направлении $[011]$. Таким образом, анизотропия упругих свойств влияет на величину и анизотропию изгиба.

4. Установлено, что при достижении температуры равной $\approx 75\%$ температуры плавления, пластина

начинает терять устойчивость, изгибается и по кристаллографическим направлениям в ней возникают неоднородные напряжения изгиба, из-за которых возникает пластическая деформация, приводящая к изгибу пластины после охлаждения.

5. Установлено, что разность главных напряжений $(\sigma_1 - \sigma_2)$ носит аномальный (островковый) характер, в направлениях $[001]$ и $[010]$, и влияет на величину изгиба пластины по кристаллографическим направлениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pommier S. Plane strain crack closure and cyclic hardening // Engineering Fracture Mechanics. – 2002. – Vol. 69, iss. 1. – PP. 25–44.
2. Aifantis E.S. On the Microstructural Origin of Certain Inelastic Models // J. Eng. Mater. Technol. – 1984. – Vol. 106, iss. 4. – P. 326.
3. Turley J. and Sines G. The anisotropy of Young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio in cubic materials // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1971. – Vol. 4. – PP. 264–271.
4. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости / Пер. с англ. под ред. Г.С. Шапиро. – М.: Наука, 1979. – С. 34–53.
5. Оксанич А.П., Когдась М.Г. Автоматизированный комплекс «Микрон-1» для измерения сложных форм деформаций пластин Арсенида Галлия // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – Харьков, 2013. – Вип. 164. – С. 25–32.
6. Когдась М.Г. Исследование зависимости внутренних напряжений в Арсениде Галлия от кристаллографических направлений и технологических процессов // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 3/2014 (86). – С. 29–32.
7. Jordan A.S. An evaluation of the thermal and elastic constants affecting GaAs crystal growth // Journal of Crystal Growth. – 1980. – Vol. 49. – PP. 631–642.

ANALYSIS OF THE SHAPE DEFORMATION OF PLATES GAAS PROCESS MECHANICAL WORKING

A. Oksanich, M. Kogdas

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: kogdasMax@yahoo.com

Analyzed the main effects of mechanical and thermal treatment on the GaAs wafer fabrication process are used in the manufacture of semiconductor devices and integrated circuits. Each of those areas of use imposes their own requirements regarding the quality of the crystal. The paper presents complex forms of GaAs wafer deformation in the plane (100) of 100 mm diameter. Established that the treatment of larger diameter wafers with (100) orientation arises complex bending epures which are extremes in one of the crystallographic directions $\langle 001 \rangle$. Shown that in the (100) GaAs plates, come into force the elastic constants of Young's modulus and Poisson's ratio, which in the plane (100) are anisotropic. Established that the deformation of gallium arsenide wafers more along the $[001]$ and $[010]$, which is also confirmed by the distribution of the principal stresses $(\sigma_1 - \sigma_2)$. It is also established that when cooling at a temperature of $\approx 75\%$ of the melting point, the wafer begins to lose stability.

Key words: deformation, bending, elastic constants.

REFERENCES

1. Pommier, S. (2002) "Plane strain crack closure and cyclic hardening", *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 69, no. 1, pp. 25–44.
2. Aifantis, E.S. (1984) "On the Microstructural Origin of Certain Inelastic Models", *J. Eng. Mater. Technol.*, vol. 106, no. 4, p. 326.
3. Turley, J. and Sines, G. (1971) "The anisotropy of Young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio in cubic materials", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 4, pp. 264–271.
4. Timochenko, S.P., Gudier, J. (1979) "Theory of resiliency", Nauka, Moscow, pp. 34–53.
5. Oksanich, A.P., Kogdas, M.G. (2013) "Automated complex "Micron-1" for measuring complex shapes deformations GaAs wafers", *Automated control systems and automation devices*, vol. 164, pp. 25–32.
6. Kogdas, M.G. (2014) "Dependence investigation internal stresses in gallium arsenide on the crystallographic direction and technological processes", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, iss. 3 (86), pp. 29–32.
7. Jordan, A.S. (1980) "An evaluation of the thermal and elastic constants affecting GaAs crystal growth", *Journal of Crystal Growth*, vol. 49, pp. 631–642.

Стаття надійшла 16.07.2014.