УДК 621.315.592

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ ОТ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

М. Г. Когдась

Кременчугский университет им. Михаила Остроградского

ул. Первомайская 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. Тел. (053)662-00-23 E-mail: kogdasMAX@yahoo.com

Проанализированы основные области применения приборов, изготовленных на основе GaAs, являющихся быстродействующими микросхемами, СВЧ-устройствами, мобильных телефонов и деталей инфракрасной оптики. Каждая из этих сфер использования накладывает свои собственные требования относительно качества кристалла. В работе получены распределения внутренних напряжений в пластинах GaAs в плоскости (100) диаметром 40 и 100 мм. Установлено что внутренние напряжения в плоскости (100) распределены по направлениям [001] и [010], а также имеют островковый характер. Показано, что в пластинах GaAs (100) вступают в силу упругие постоянные – модуль Юнга и коэффициент Пуассона, которые в плоскости (100) являются анизотропными. Также получены значения внутренних напряжений в пластинах GaAs: для пластин диаметром 40 мм напряжения не превышали $3{,}7\cdot10^4$Па, а в пластинах диаметром 100 мм – $5{,}3\cdot10^7$ Па, что приводило к растрескиванию кристалла при остывании и обработке.

Ключевые слова: внутренние напряжения, полярон, фотоупругость, двулучепреломление.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ВНУТРІШНІХ НАПРУГ В АРСЕНІДІ ГАЛІЮ ВІД КРИСТАЛОГРАФІЧНИХ НАПРЯМКІВ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

М. Г. Когдась

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

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

Проаналізовані основні області застосування приладів, виготовлених із GaAs, які є швидкодіючими мікросхемами, СХЧ пристроями, мобільних телефонів і деталей інфрачервоної оптики. Кожна з цих сфер використання накладає свої власні вимоги щодо якості кристалу. У роботі отримано розподіл внутрішніх напруг у пластинах GaAs у площині (100) діаметром 40 і 100 мм. Встановлено, що внутрішні напруги в площині (100) розподілені за напрямками [001] і [010]. Також встановлено, що напруги мають острівцевий характер. Показано, що в пластинах GaAs (100) вступають в силу пружні постійні – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона, які в площині (100) є анізотропними. Також отримано значення внутрішніх напруг у пластинах GaAs: для пластин діаметром 40 мм напруги не перевищували $3{,}7\cdot10^4$Па, а в пластинах діаметром 100 мм – $5{,}3\cdot10^7$ Па, що призводило до розтріскування кристала при охолодженні і обробці.

Ключові слова: внутрішні напруження, полярон, фотопружність, двопроменезаломлення.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Использование арсенида галлия для изготовления оптических элементов, используемых в ИК области, приводит к необходимости исследования влияния структурных несовершенств кристаллов на их оптические свойства и внутренние напряжения в них.

Наличие существенных внутренних напряжений в кристаллах может привести к их растрескиванию как во время охлаждения (на завершающей стадии роста), так и при их механической обработке. Эти эффекты наиболее ярко выражены для монокристаллов большего диаметра (более 100 мм).

Если монокристалл GaAs пластически деформируется под действием внешней силы, то при ее удалении внутри кристалла останутся напряжения. Такие напряжения были изучены при помощи дифракции рентгеновских лучей [1]. Однако использование данного метода ограничено, поскольку напряжения меняются на расстояниях, значительно превышающих ширину рентгеновского пучка. Поэтому данный метод, пусть и способен обнаруживать напряжения и их величину, является достаточно грубым для изучения распределения напряжений по поверхности исследуемых образцов. Вторым методом, который лишен данных недостатков и применяется для измерения внутренних напряжений, является метод фотоупругости. Он дает полную картину [2, 3] представления о масштабах, направлении и распределении внутренних напряжений

Когда электромагнитное излучение передается через материал с одинаковой легкостью во всех направлениях, материал называется изотропным. Как правило, это определяет оптический характер кристаллов в кубической системе, большинство из кристаллических материалов анизотропны, однако, и передача электромагнитной волны будет изменяться по скорости в соответствии с направлением луча в кристалле.

Связанным с анизотропией является свойство двойного лучепреломления, что приводит к появлениям фотоупругой картины распределения внутренних напряжений.

Наличие двулучепреломления в арсениде галлия можно интерпретировать как результат деформации,

вызванной большими температурными градиентами и неравномерным распределением температуры, возникающей в процессе затвердевания и охлаждении до комнатной температуры.

Из сказанного можно сделать вывод, что контроль внутренних напряжений с использованием метода фотоупругости в монокристаллах арсенида галлия является весьма актуальной задачей.

Целью работы является определение зависимости внутренних напряжений в пластинах GaAs от кристаллографических направлений и влияния на них распределенных упругих постоянных (модуль Юнга и коэффициент Пуассона).

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Метод фотоупругости [4] является экспериментальным методом определения распределения напряжений в материале, где математические методы становятся довольно громоздким. В отличие от аналитических методов определения напряжения, метод фотоупругости дает достаточно точную картину распределения напряжений даже вокруг резких разрывов в материале. Метод служит важным инструментом для определения критических точек напряжения в материале и часто используется для определения факторов концентрации напряжений в образцах.

Метод основан на свойстве двулучепреломления, которым обладают полупроводниковые материалы прозрачные в близком к ИК-спектре длин волн. Свойство двулучепреломления проявляется многими полупроводниковыми кристаллами, прозрачными в инфорокрасной области спектра. Но фотоупругие материалы обладают свойством двулучепреломления только по применению к ним напряжения, и величина показателей преломления в каждой точке в материале будет напрямую связана с состоянием напряжения в этой точке. Когда луч света проходит через фотоупругий материал, он становится поляризованным и распространяется вдоль двух основных направлений напряжения, и каждый из них получает различные показатели преломления. Разница в показателях преломления приводит к относительной разности фаз между двумя компонентами волн, которые обычно называются фазовой задержкой, как показано на рис. 1.

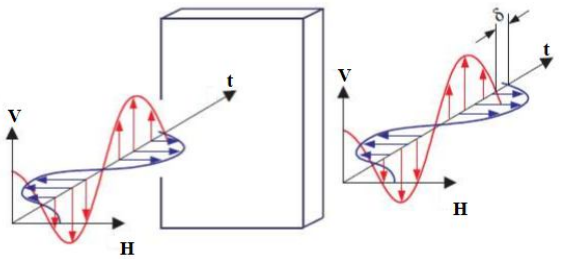

Рисунок 1 – Схематическая диаграмма, отображающая эффект двулучепреломления: H – горизонтальная поляризация, V – вертикальная поляризация, δ – фазовая задержка

Фотоупругость может быть применена к трех- и двухразмерным состояниям напряжения [5]. Однако применение фотоупругости к двум размерным системам плоскости напряжения легче проанализировать особенно, когда толщина образца намного меньше по сравнению с измерениями в плоскости. В этом случае, в плоскости действует одно усилие, поскольку другие компоненты напряжения будут равны нулю [6].

Когда свет проходит через изотропные среды, им управляет закон Снеллиуса рефракции и отражения, как показано на рис. 2.

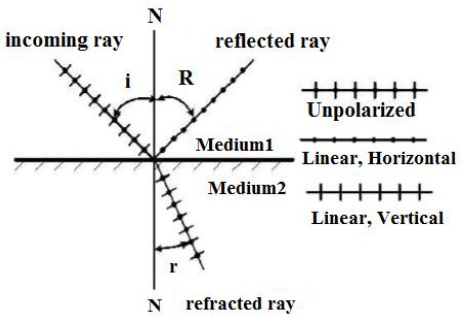

Рисунок 2 – Закон Снеллиуса для изотропной среды

Данный рисунок описывает отражение и рефракцию поступающего светового луча. Отраженный свет (R) является поляризованной плоскостью, а преломленный свет (r) – единственный световой луч без поляризации.

Кристаллические монокристаллы, такие как арсенид галлия, являются оптически анизотропными, преломят единственный падающий луч и произведут два преломленных луча, названные обычным (r1) и развернутым (r2) лучем, как показано в рис. 3.

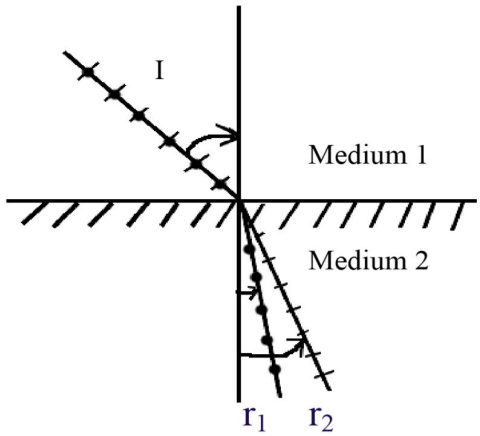

Рисунок 3 – Диаграмма распространения света через анизотропный материал

Это явление и называется двойным лучепреломлением. Один из преломленных лучей экстраординарен в том смысле, что он нарушает Закон Снел-

лиуса так, чтобы луч в анизотропном твердом теле распространялся на отличной скорости и направлении к обычному лучу. Эти два показателя преломления для обыкновенного и необыкновенного луча равны только в направлении оптической оси.

Если падающие лучи – параллельны к оптической оси, то оба луча будут распространяться в том же самом направлении и вести себя как будто в изотропной среде. Однако, если луч падающего света будет перпендикулярен оптической оси, то развернутый луч будет распространяться быстрее, но в том же самом направлении, как и нормальный луч.

Фотоупругое явление происходит, когда падающие лучи перпендикулярны оптической оси, два луча, выходящие из кристалла, тогда перпендикулярны и поляризованы. При появлении света, относительная разность фаз преломленных лучей сформирует интерференционные полосы.

Для измерения внутренних напряжений методом фотоупругости мы применили круговой полярископ. На рис. 4. представлен разработанный в работе [7] автоматизированный комплекс для измерения внутренних напряжений, данный комплекс построен на основе кругового полярископа.

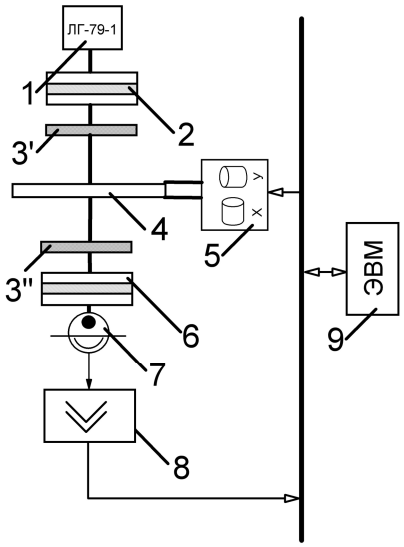

Рисунок 4 – Структурная схема автоматизированного комплекса для измерения внутренних напряжений

Комплекс включает в себя инфракрасный газовый лазер ЛГ–79–1, с длинной волны 1,15 мкм (1), поляризатор (2) и анализатор (6). После четверть волновой пластины (3’) поляризация становится эллиптической и поступает на исследуемую пластину арсенида галлия (4), закрепленную на сканаторе (5). При помощи сканатора осуществляется перемещение пластины по осям X и Y с шагом от 1 мм, для измерения внутренних напряжений по всей поверхности пластины. После прохождения пластины пучком света, если в измеряемой точке есть внутренние напряжения получаем двулучепреломление. Сигнал поступает на фотоприемник (7), усиливается и фильтруется при помощи электронно-блока (8) и через АЦП поступает на ЭВМ (9). Система позволяет измерять образцы диаметром до 100 мм.

В поперечном сечении растущего кристалла напряжение является самым большими на поверхности растущего кристалла, а уровень напряжений в кристалле существенно увеличивается с увеличением диаметра. Величина и распределение напряжения в растущем слитке главным образом определены характером обмена высокой температуры кристалла с окружающей средой.

В зависимости от области пластичности в растущем кристалле (использование метода Чохральского), температурные особенности при формировании остаточных тепловых напряжений, могут быть схематически различимы:

1) при действии радиальных потоков высокой температуры, которые являются последствием охлаждения боковой поверхности слитка (область пластичности является большей в осевом направлении);

2) ближе к центру кристаллизации под влиянием осевого температурного распределения (область пластичности является небольшой в осевом направлении).

Диаграмма остаточного напряжения в этом случае является последствием характера изменений остаточного температурного градиента.

Исследование внутренних напряжений в арсениде галлия проводились на пластинах диаметром 40 мм., выращенных в направлении [100], легированных хромом, с концентрацией примесей $5\cdot10^{14}$ см$^{-3}$, удельным сопротивлением 10^7 Ом·см, а также на пластинах диаметром 100 мм. выращенных в направлении [100], легированные хромом, с концентрацией примесей $5\cdot10^{14}$ см$^{-3}$, удельным сопротивлением 10^7 Ом·см. Пластины вырезаны перпендикулярно направлению [100], по две пластины с краев слитка и по пять пластин – из средины слитка.

Каждая из пластин подвергалась двухсторонней алмазной полировке до толщины 1,2 мм.

Рентгеновским методом в плоскости пластины GaAs (100) определялись кристаллографические направления.

При помощи автоматизированного комплекса (рис. 4) производились измерения распределения внутренних напряжений по всей поверхности исследуемых пластин с шагом 1 мм. Измерения производились по следующей схеме (рис. 5).

При помощи разработанного нами программного обеспечения были построены линии равных внутренних напряжений в зависимости от кристаллографических направлений, которые представлены на рис. 6–11 в пластинах GaAs диаметром 40 мм.

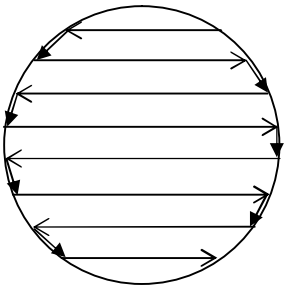

Рисунок 5 – Полная модель измерения внутренних напряжений

Пластина из верхней части слитка (рис. 6) имела средний уровень внутренних напряжений $3{,}7 \cdot 10^4 \pm 4 \cdot 10^2$ Па. Уровень остаточных напряжений в верхней части слитка примерно в два раза выше, чем в нижней части. Полученные картины распределения внутренних напряжений практически симметричны, что говорит о равномерном температурном градиенте по диаметру слитка. Это вызвано большой скоростью остывания поверхности слитка в процессе вытягивания, что является причиной пластических деформаций и образования внутренних напряжений.

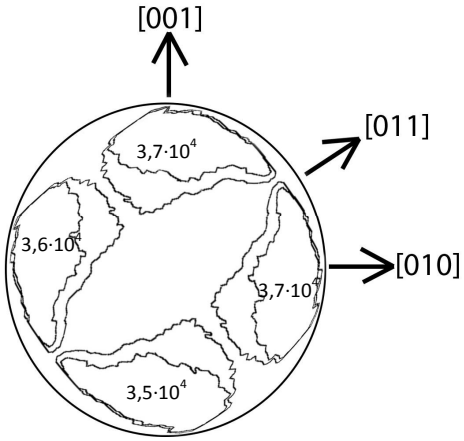

Рисунок 6 – Линии равных напряжений в верхней части слитка (d=40 мм)

Из рис. 6–11 также можно утверждать, что напряжения в арсениде галлия, выращенном методом Чохральского в направлении [100], возникают по направлениям [001] и [010], а по направлению [011] имеют минимальное значение или и вовсе отсутствуют.

Из полученных результатов измерений внутренних напряжений, можно утверждать, что под действием термических напряжений в слитке возникает пластическая деформация которая и приводит к формированию внутренних напряжений в слитке. Если монокристалл пластичен по длинне большей по сравнению с диаметром, то внутренние напряжения образуются в основном под действием радиальных потоков тепла, возникающих из-за охлаждения боковой поверхности слитка. Если кристалл пластичен в узкой зоне вблизи фронта кристаллизации, то внутренние напряжения образуются вблизи поверхности роста и определяются осевым распределением температуры.

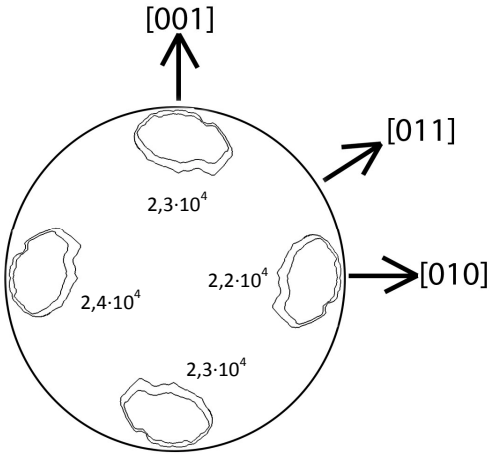

Рисунок 7 – Линии равных напряжений в средней части слитка (d=40 мм)

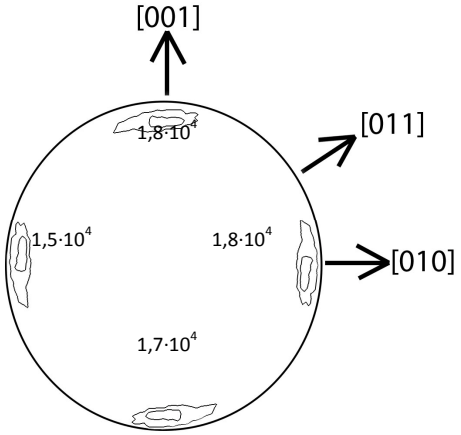

Рисунок 8 – Линии равных напряжений в нижней части слитка (d=40 мм)

На рис. 9–11 показаны картины распределения внутренних напряжений для пластин GaAs диаметром 100 мм из разных частей слитка. Пластины из верхней части слитка имеют крайне высокие напряжения $\approx 5{,}3 \cdot 10^7$ Па, что в некоторых случаях приводило к растрескиванию слитка.

Также на полученных картинах распределения внутренних напряжений можно увидень, что из-за большого диаметра слитка GaAs, внутренние напряжения имеют не равномерное распределение значений.

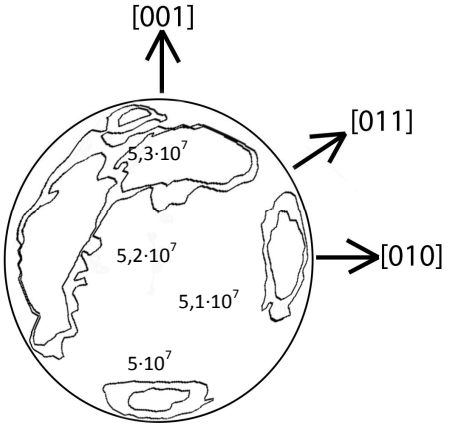

Рисунок 9 – Линии равных напряжений в верхней части слитка (d=100 мм)

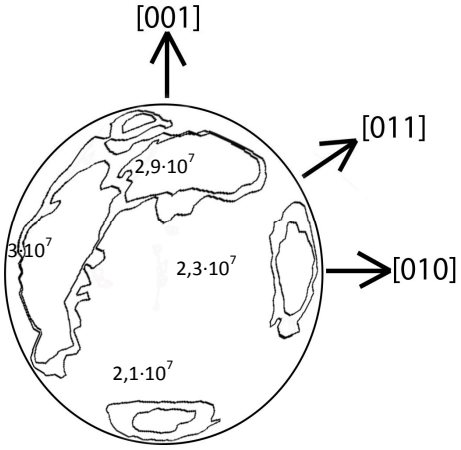

Рисунок 10 – Линии равных напряжений в средней части слитка (d=100 мм)

Как видно из рис. 6–11, линии равных напряжений в плоскости (100) пластин GaAs имеют островковый характер, симметрия которого определяется анизотропией распределения модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν в плоскости (100) [8].

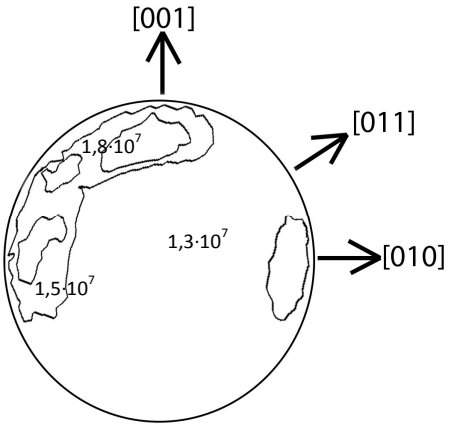

Рисунок 11 – Линии равных напряжений в нижней части слитка (d=100 мм)

Распределение внутренних напряжений и упругих постоянных (модуль Юнга (E) и коэффициента Пуассона (ν)) в плоскости (100) представлено на рис. 12.

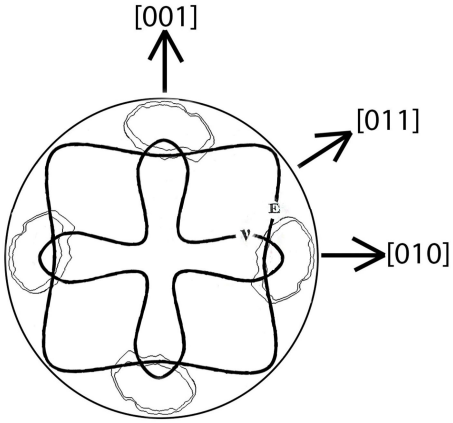

Рисунок 12 – Распределение внутренних напряжений и упругих постоянных в плоскости пластины GaAs (100) (max E=1,21·10^{12}дин/см^2, min E=0,85·10^{12}дин/см^2, max ν=0,315, min ν=0,01)

ВЫВОДЫ. 1. Получены распределения и определены значения внутренних напряжений в слитках GaAs, диаметром 40 и 100 мм, по их длине. В слитках диаметром 40 мм значения внутренних напряжений не превышали $3{,}7 \cdot 10^4$ Па, а в слитках диаметром 100 мм напряжения достигали значений 5,3·10^7 Па, что приводило к растрескиванию кристалла при остывании и обработке.

2. Показано что при выращивании слитков GaAs методом Чохральского в направлении [100] вступают в силу упругие постоянные модуль Юнга и коэффициент Пуассона, которые в плоскости (100) являются анизотропными.

3. Впервые определено, что распределение внутренних напряжений в полуизолирующем GaAs, применяемом для изготовления оптических линз, имеет островковый характер, распределяется в кристаллографических направлениях [001] и [010].

4. Ввиду аномальности распределения внутренних напряжений в плоскости пластины GaAs (100) (структурного совершенства), данный критерий может служить для определения оптического качества (пропускания) изготовляемых, из GaAs, линз для ИК-оптики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Barrett C.S. (1952), Structure of Metals, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, p. 316.

2. Cloud G. (2008), “Optical methods in experimental mechanics: Part 34: Photoelasticity VI – The circular polariscope”, Experimental Techniques, vol. 32, no. 6, pp. 21–23.

3. Jing-Fung Lin et al. (2005) “Measurements of the principal axis and phase retardation using a new circular polariscope and the Senarmont setup”, Proceedings of

the SPIE – The International Society for Optical Engineering, vol. 5852, no. 1, pp. 240–244.

4. Метод фотоупругости: В 3 т. / Под общ. ред. Н.Л. Стрельчука. – М.: Стройиздат, 1975. – Т. 2: Методы поляризационно упругих измерений. Динамическая фотоупругость. – С. 14–45.

5. Ramesh K. (2000), Digital photoelasticity advanced techniques and applications, Springer-Velag, New York, p. 405.

6. Seong-Min Jeong and Kitamura T. (2007), «Structural transformation of single crystal silicon under uniaxial stress», Key Engineering Materials, vol. 345, no. 2, pp. 963–966.

7. Автоматизированный комплекс измерения внутренних напряжений в пластинах GaAs / А.П. Оксанич, С.Э. Притчин, В.Е. Краскевич, В.В. Батареев // Складні системи і процеси. – 2006. – № 2. – С. 40–50.

8. Wortman J.J. and Evens R.A. Yong's modulus, Shear Modulus, and Poisson's Patio in Silicon and Germanium // J. Appl. Ph. – 1965. – Vol. 3, № 1.

STUDY OF INTERNAL STRESSES IN GALLIUM ARSENIDE DEPENDENCY ON THE CRYSTALLOGRAPHIC DIRECTIONS AND TECHNOLOGICAL PROCESSES

M. Kogdas

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

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

The principal spheres of application of GaAs devices are high-speed circuits, microwave devices, mobile phones and the details of infrared optics. Each of those areas of use imposes their own requirements regarding the quality of the crystal. The paper presents the distribution of the internal stresses obtained in GaAs wafers in the plane (100) with a diameter of 40 and 100 mm. It is established that the internal stresses in the plane (100) are distributed along the [001] and [010] directions and have an island character. It is shown that in the (100) GaAs wafers the elastic constants of Young's modulus and Poisson's ratio come into force, which are anisotropic in the plane (100). Also, it was obtained the values of internal stresses in the GaAs wafers: for the plates of 40 mm diameter stresses do not exceed $3{,}7\cdot10^4$ Pa, and for the 100 mm wafers – $5{,}3\cdot10^7$ Pa. This results in a crystal cracking during its cooling and proseccing. This criterion can be used to determine the optical quality of the lenses manufactured from GaAs using in infrared optics.

Key words: internal stresses, polaron, photoelastics, birefringence.

REFERENCES

1. Barrett, C.S. (1952), *Structure of Metals*, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, USA.

2. Cloud, G. (2008), "Optical methods in experimental mechanics: Part 34: Photoelasticity VI – The circular polariscope", *Experimental Techniques*, vol. 32, no. 6, pp. 21–23.

3. Jing-Fung Lin *et al*. (2005), "Measurements of the principal axis and phase retardation using a new circular polariscope and the Senarmont setup", *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 5852, no. 1, pp. 240–244.

4. Strelchuk, N.L. (1975), *Photoelastichnie metody* [Photoelastic method], Stroiizdat, Moscow, Russia.

5. Ramesh, K. (2000), *Digital photoelasticity advanced techniques and applications*, Springer-Velag, New York, USA.

6. Seong-Min Jeong and Kitamura T. (2007), "Structural transformation of single crystal silicon under uniaxial stress", *Key Engineering Materials*, vol. 345, no. 2, pp. 963–966.

7. Oksanych, A.P. Pritchin, S.E., Kraskevich, V.E., Batareew, V.V. (2006), "An automated system for the measurement of internal stresses in the plates GaAs", *Sistemi i Skladni procesy,* no. 2, pp. 48–56.

8. Wortman, J.J. and Evens, R.A. (1965), "Yong's modulus, Shear Modulus, and Poisson's Patio in Silicon and Germanium", *J. Appl. Ph.,* vol. 3, no. 1.

Стаття надійшла 23.05.2014.