

УДК 621.315.592

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ ФОТОУПРУГИХ ПОСТОЯННЫХ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

А. П. Оксанич, М. Г. Когдась

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: kogdasMax@yahoo.com

Производство полупроводниковых материалов развивается с каждым годом, так что эта тенденция ведет к увеличению спроса на более эффективные методы контроля производства. Поэтому изучение и разработка контроля структурного совершенства является очень важной задачей для развития качества полупроводниковых материалов. В данной работе разработан метод получения экспериментальных значений фотоупругих постоянных в пластинах GaAs с различной кристаллографической ориентацией. В результате эксперимента получены значения пьезооптических постоянных π_{11} – π_{12} , π_{44} для арсенида галлия.

Ключевые слова: полупроводник, пьезооптические постоянные, фотоупругие постоянные.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЧИСЛЕННЯ ФОТОУПРУГИХ ПОСТІЙНИХ АРСЕНІДУ ГАЛІЮ

А. П. Оксанич, М. Г. Когдась

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: kogdasMax@yahoo.com

Виробництво напівпровідникових матеріалів розвивається з кожним роком, так що ця тенденція сприяє збільшенню попиту на розробку більш ефективних методів контролю виробництва. Тому вивчення і розробка контролю структурної досконалості є дуже важливим завданням для розвитку якості напівпровідникових матеріалів. Розроблено метод отримання експериментальних значень фотопружних постійних у пластинках GaAs із різною кристаллографічною орієнтацією. У результаті експерименту отримано значення п'єзооптичних сталих π_{11} – π_{12} , π_{44} для арсеніду галію.

Ключові слова: напівпровідник, п'єзооптичні постійні, фотопружні сталі.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В последние десятилетия в связи с интенсивным развитием технологий выращивания монокристаллов методом Чохральского резко повысился интерес к изучению физических явлений, лежащих в основе ростовых процессов.

Важнейшей технологической задачей является получение однородных монокристаллов все большего диаметра и длины с совершенной структурой и заданными электрофизическими свойствами. Особый интерес представляет изучение роли допустимых остаточных напряжений, возникающих вследствие теплового несоответствия материала или загрязнения пластины. Изучение остаточных напряжений, играет ключевую роль в процессах выращивания монокристаллов. Более глубокое понимание внутренних напряжений в материалах может значительно улучшить технологию производства.

Интерес к фотоупругим методам контроля структурного совершенства материала не ослабевает на протяжении многих лет.

Эти методы позволяют без разрушения объекта исследования проследить за развитием дефектов в объеме материала в процессе производства важнейших типов полупроводниковых материалов. В сочетании с методами травления и рентгеновской топографии они дают возможность получить информацию о механизмах генерации дефектов.

Изучение и развитие фотоупругих методов измерений структурного совершенства является весьма актуальной задачей для развития и контроля качества полупроводниковых материалов.

Целью данной работы является разработка метода экспериментального получения фотоупругих постоянных для пластин арсенида галлия.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. За последние десятилетия было разработано множество аналитических методов для измерения напряжений в полупроводниковых пластинах и структу-

рах. Наиболее же распространенные методы контролируют изменения в упругих свойствах пластин или структур.

Дифракция рентгеновского излучения предлагает самую высокую чувствительность и поэтому широко используется как в промышленности, так и в научных целях. Эта неразрушающая, одноточечная техника измеряет изменения в кристаллической решетке, но при этом оставляет большие промежутки, что приводит к неточностям полученных данных [1].

Акустическая микроскопия представляет собой совокупность методов визуализации микроструктуры и формы малых объектов с помощью ультразвуковых и гиперзвуковых волн. Недостатком акустической микроскопии является то, что измерение должно осуществляться с учетом связей жидкости и образца, который должен быть развернут с целью представления двумерного изображения [2].

Лазерное сканирование обычно используется, чтобы вывести остаточные напряжения в тонких пленках, измеряя изменения в подложках. Для использования данного метода необходимо точно знать толщины и упругие свойства, как подложки, так и слоев пленки. Однако, поскольку данный метод обеспечивает усредненную информацию, то полученных данных не будет хватать и проведение измерений нужно проводить несколько раз [3].

Применение поляризационно-оптического метода, т.е. метода фотоупругости, для наблюдения внутренних напряжений основано на эффекте возникновения двулучепреломления, что, в свою очередь, является весьма эффективным и точным экспериментальным средством определения напряжений и деформаций. Данный метод обладает преимуществом по сравнению с рассмотренными выше методами, т.к. он выявляет общую картину распределения напряжений, а не сведения лишь для отдельных точек.

Проанализировав некоторые методы неразрушающего контроля, нами был выбран метод фотоупругости, поскольку он обладает некоторыми преимуществами перед остальными.

Метод фотоупругости [4] основан на эффекте изменения скорости света в напряженном теле. Эта задача решается для полупроводниковых материалов, прозрачных в близкой инфракрасной области спектра, где могут быть использованы электронно-оптические преобразователи инфракрасного излучения в электрический сигнал.

Наиболее широкое применение, в полупроводниковом производстве, в настоящее время находят кристаллы арсенида галлия, имеющие кристаллическую кубическую решетку, для описания напряженного состояния таких кристаллов удобно использовать оси декартовой системы координат, совместимые по направлению с осями симметрии четвертого порядка.

Для изучения внутренних напряжений на практике чаще всего используют достаточно тонкие полупроводниковые пластины. В этих условиях компонента напряжений, направленная нормально к поверхности пластины, близка к нулю, поэтому рассматривают только нормальные напряжения σ_x , σ_y и касательное напряжение τ_{xy} .

Пьезооптический коэффициент варьируется же в зависимости от направления наблюдения и главных напряжений. Анизотропно пьезооптический коэффициент может быть выведен из общей связи между тензором напряжений и тензором диэлектрической непроницаемости B ,

$$\Delta B = \pi \sigma, \quad (1)$$

где π – пьезооптический коэффициент, который может быть выражен матрицей 6x6 в Декартовой системе координат. Для кристалла кубической решетки основными коэффициентами являются π_{11} , π_{12} , π_{44} , поэтому уравнение (1) можно записать в матричной форме

$$\begin{bmatrix} \Delta B_1 \\ \Delta B_2 \\ \Delta B_3 \\ \Delta B_4 \\ \Delta B_5 \\ \Delta B_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & & & \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & & & \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & & & \\ & & & \pi_{44} & & \\ & & & & \pi_{44} & \\ & & & & & \pi_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Для тонких пластин касательные напряжения τ_{yz} , τ_{zx} и нормальное напряжение σ_z можно приравнять к нулю. Выражение (2) можно привести к виду

$$\begin{aligned} \Delta B_1 &= \pi_{11} \sigma_x + \pi_{12} \sigma_y, \\ \Delta B_2 &= \pi_{11} \sigma_y + \pi_{12} \sigma_x, \\ \Delta B_6 &= \pi_{44} \tau_{xy}. \end{aligned} \quad (3)$$

Учитывая малость значений $\pi_{11} - \pi_{12}$, π_{44} максимальный и минимальный показатели преломления будут равны:

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

$$n_1 = n_0 - \frac{n_0^3}{4} (\sigma_1 - \sigma_2) \sqrt{(\pi_{11} - \pi_{12})^2 \cos^2 2\beta + \pi_{44}^2 \sin^2 2\beta} \quad (5)$$

Разность главных значений показателей преломления равна:

$$\Delta n = n_1 - n_2 = \frac{n_0^3}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \sqrt{(\pi_{11} - \pi_{12})^2 \cos^2 2\beta + \pi_{44}^2 \sin^2 2\beta}. \quad (6)$$

Следовательно, фотоупругая постоянная пластины (100) к внутренним напряжениям равна:

$$C_{100} = \frac{n_0^3}{2} \sqrt{(\pi_{11} - \pi_{12})^2 \cos^2 2\beta + \pi_{44}^2 \sin^2 2\beta}. \quad (7)$$

Пластины с ориентацией поверхности (111) изотропны по своим пьезооптическим свойствам [5]. В случае этих пластин главные направления совпадают с главными напряжениями. Фотоупругая постоянная пластины (111) к внутренним напряжениям равна:

$$C_{111} = \frac{n_0^3}{6} (2\pi_{44} + (\pi_{11} - \pi_{12})). \quad (8)$$

Соотношения (7) и (8) позволяют определить все компоненты плосконапряженного состояния для пластины (100), (111).

Анализ литературы позволил определить значения π_{mn} , приводимые различными авторами для арсенида галлия (табл. 1).

Таблица 1 – Пьезооптические постоянные для арсенида галлия

$\pi_{11}-\pi_{12}, 10^{-12}$ Па ⁻¹	$\pi_{44}, 10^{-12}$ Па ⁻¹	Источник
-0,23	-0,073	[6]
-0,225	-0,072	[7]

Используя метод фотоупругости, нами была разработана методика определения фотоупругих постоянных.

Рассмотрим сущность этой методики.

Образец устанавливается на установку перед вращающимся анализатором, и нагружается одноосным усилием, которое регистрируется динамометром. Направление нагружения для образцов (111) выбирают произвольно, а для (100) – [010] или [001].

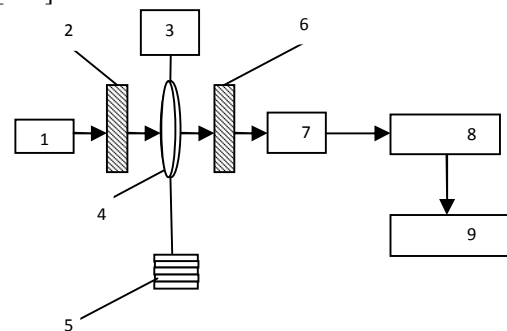


Рисунок 1 – Структурная схема методики эксперимента: 1 – источник инфракрасного излучения; 2 – поляризатор; 3 – динамометр; 4 – исследуемая пластина; 5 – грузы; 6 – анализатор; 7 – фотоприемник; 8 – электронный блок; 9 – ЭВМ

Известно, что в центральной части нагруженной пластины имеется обширная область с размерами порядка 0,1 от его диаметра, разность главных напряжений в которой изменяется весьма незначительно и может быть найдена из выражения

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{8P}{\pi d D}, \quad (9)$$

где D – диаметр диска, мм; P – усилие, приложенное к диску, кг; d – толщина диска, мм.

Напряжение, снимаемое с фотоприемника (7) пропорционально интенсивности света после вращающегося анализатора (6):

$$U = U_0 + U_0 \sin 2\omega_m d \cdot \sin 2\Delta, \quad (10)$$

где U_0 – постоянная составляющая, пропорциональная средней интенсивности света; ω_m – частота модуляции.

Переменная составляющая, снимаемая с фотоприемника (7), равна

$$U_{\sim} = U_0 \sin 2\omega_m d \cdot \sin 2\Delta. \quad (11)$$

где Δ – оптическая разность хода.

Как показано в [4], $n_1 - n_2 = C(\sigma_1 - \sigma_2)$, тогда

$$\Delta = \frac{2\pi C(\sigma_1 - \sigma_2)}{\lambda} d, \quad (13)$$

$$\frac{U_{\sim}}{U_0} = \frac{2\pi C d}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2). \quad (12)$$

Откуда

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\lambda}{2\pi C d} \frac{U_{\sim}}{U_0}, \quad (14)$$

где λ – длина волны лазерного излучения.

Разность главных напряжений вычисляет ЭВМ (9) (рис. 1).

$$C = \frac{\lambda}{2\pi d} \frac{U_{\sim}}{U_0 (\sigma_1 - \sigma_2)}. \quad (15)$$

Значение C в данном случае после подстановки (9) в (14) определяется по формуле:

$$C = \frac{\lambda D}{16 P} \frac{U_{\sim}}{U_0}, \quad (16)$$

де C – фотоупругая постоянная, Па⁻¹.

Значение C , не зависит от погрешностей электронных узлов установки, что является несомненным преимуществом этого метода.

При нагружении образцов (100) уравнение (7) приводится к виду

$$C_{100} = \frac{n_0^3}{2} (\pi_{11} - \pi_{12}), \quad (17)$$

откуда

$$\pi_{11} - \pi_{12} = \frac{2C_{100}}{n_0^3}. \quad (18)$$

При испытании образцов (111) из уравнения (8) получим соотношение, связывающее все три коэффициента π_{mn} :

$$2\pi_{44} + (\pi_{11} - \pi_{12}) = \frac{6C_{111}}{n_0^3}. \quad (19)$$

Подставив (18) в (19), получим соотношения для π_{44} :

$$\pi_{44} = \frac{1}{n_0^3} (3C_{111} - C_{100}). \quad (20)$$

Показатели преломления для различных полупроводниковых материалов приводятся в [8].

Нами получены следующие значения пьезооптических коэффициентов для арсенида галлия:

$$\pi_{11} - \pi_{12} = -0,22 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1}, \quad \pi_{44} = -0,07 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1},$$

а также рассчитаны фотоупругие постоянные (табл. 2).

Таблица 2 – Фотоупругие постоянные для GaAs различной ориентации

Образец	$C_{111}, \text{Па}^{-1}$	$C_{100}, \text{Па}^{-1}$
GaAs	$-0,217 \cdot 10^{-11}$	$-0,399 \cdot 10^{-11}$

В качестве образцов использовались круглые пластины арсенида галлия марки АГЧТ-1 диаметром 90 и толщиной 600 мкм.

ВЫВОДЫ. Используя метод фотоупругости, была разработана методика определения фотоупругих постоянных для пластин полупроводников с различной кристаллографической ориентацией, а также получены пьезооптические постоянные для арсенида галлия.

ЛИТЕРАТУРА

- X-Ray Diffraction Determination of Stresses in Thin Film / T. Vreeland, A. Dommann, C.J. Tsai and M.-A. Nicolet // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. – 1989. – V. 130. – PP. 3–12.
- Nondestructive Visualization and Characterization of Material Joints Using a Scanning Acoustic Microscope / S.K. Wang, C.C. Lee and C.S. Tsai // Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium. – 1977. – 171 p.
- Thermal stresses and cracking resistance of dielectric films (SiN, Si₃N₄, and SiO₂) on Si substrates / A.K. Sinha, H.J. Levinstein and T.E. Smith // Journal of Applied Physics. – 1978. – Vol. 49. – 2423 p.
- 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. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. / Б.С. Касаткин, А.Б. Кудрин. – Киев: Наукова думка, 1981. – 28 с.

6. Drxon R.W. Photoelastic properties of selected materials and their relevance for applications to acoustic light modulators and scanners // *Journal of applied physics*. – 1967. – Vol. 38. – PP. 5141–5153.

7. Pressure dependence of energy gaps and refractive indices of tetrahedrally bonded semiconductors / Y.F. Tsay, S. Mitra and B. Bendow // *Physical Review B*. – 1974. – Vol. 10. – PP. 1476–1481.

8. Блистанов А.А., Бондаренко В.С. Акустические кристаллы: Справочник / Под ред. М.П. Шаскольской. – М.: Наука, 1982. – С. 29–51; С. 162–180.

EXPERIMENTAL CALCULATION OF PHOTOELASTIC CONSTANTS OF GALLIUM ARSENIDE

A. Oksanich, M. Kogdas'

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

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

Manufacture of semiconductor materials develops every year so this tendency conducts to increase in demand at more effective quality monitoring of manufacture. Therefore, studying and working out of control of structural perfection is a very important problem for quality enhancement of semiconductor materials. For measurement of photoelastic constants the authors have used the photoelastic method, the advantage of which is a possibility of non-destructive research of the object and ability to track the development of defects throughout the material's volume in the course of manufacturing of the major types of semiconductor materials with different crystallographic orientations. On the basis of this method the experimental technique was developed that allows obtaining the values of photoelastic constants in the plates of gallium arsenide with various crystallographic orientation. As a result of the experimental research, values for photoelastic sensitivities C_{100} and C_{111} for the plates of gallium arsenide were got, and also the piezooptic constants were calculated: $\pi_{11} - \pi_{12} = -0,22 \cdot 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$, $\pi_{44} = -0,07 \cdot 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$.

Key words: semiconductor, piezooptic constants, photoelastic sensitivity.

REFERENCES

1. Vreeland, T., Dommann, C.J., Tsai, T.A., and Nicolet, M.-A. (1989), «Diffraction Determination of Stresses in Thin Film», *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 130, pp. 3–12.

2. Wang, S.K., Lee, C.C. and Tsai, C.S. (1977), «Nondestructive Visualization and Characterization of Material Joints Using a Scanning Acoustic Microscope», *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, 171 p.

3. Sinha, A.K., Levinstein, H.J. and Smith, T.E. (1978), «Thermal stresses and cracking resistance of dielectric films (SiN, Si₃N₄, and SiO₂) on Si substrates», *Journal of Applied Physics*, vol. 49, 2423 p.

4. Strel'chuk, N.L. (1975), *Photoelastichnie metody* [Photoelastic methods], Stroizdat, Moscow, Russia.

5. Kasatkin, B.S. and Rydrin, A.B. (1981), *Eksperymental'nie metody issledovania deformaciy i napriajeniy* [Experimental approaches to the strains and stresses], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

6. Drxon, R.W. (1967), «Photoelastic properties of selected materials and their relevance for applications to acoustic light modulators and scanners», *Journal of applied physics*, vol. 38, pp. 5141–5153.

7. Tsay, Y. F., Mitra, S., and Bendow B. (1974), «Pressure dependence of energy gaps and refractive indices of tetrahedrally bonded semiconductors», *Physical Review*, vol.10, pp. 1476–1481.

8. Blistanov, A.A. and Bondarenko V.S. (1982), *Akusticheskie kristalli* [Acoustic crystals], Reference book, Nauka, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 24.05.2013.