

УДК 621.315.592

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ГЕРМАНИЯ**

А. П. Оксанич, В. В. Малеванный

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: oksanich@kdu.edu.ua

Для инфракрасной области спектра, в которой в основном используются полупроводниковые материалы, на сегодняшний день существует ряд нерешенных проблем, в первую очередь, это отсутствие критериев отбора материала с минимальным коэффициентом поглощения. Для этого разработана автоматизированная установка, позволяющая дискретно определять оптическое качество монокристаллических пластин германия, методом определения островков с высоким и низким качеством в областях оптической прозрачности германия. Впервые было предложено принять во внимание анизотропию упругих постоянных и их взаимосвязь с коэффициентом поглощения в плоскости пластины германия. В среде Lab View разработана программа, позволяющая на основании измеренных результатов и используя полную модель измерения напряжения, строить трехмерный график распределенных внутренних напряжений в исследуемых пластинах монокристаллического германия, на котором явно просматривается анизотропия механических свойств германия в плоскости (100).

Ключевые слова: монокристаллический германий, коэффициент поглощения, дискретное управление, анизотропия упругих постоянных.

**РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ТА ПРИСТРОЮ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНОЇ ЯКОСТІ
МОНОКРИСТАЛІЧНОГО ГЕРМАНІЯ**

А. П. Оксанич, В. В. Мальований

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: oksanich@kdu.edu.ua

Для інфрачервоної області спектра, в якій в основному використовуються напівпровідникові матеріали, на сьогоднішній день існує низка невирішених проблем, у першу чергу, відсутність критеріїв відбору матеріалу з мінімальним коефіцієнтом поглинання. Для цього розроблена автоматизована установка, яка дозволяє дискретно визначати оптичну якість монокристалічних пластин германію, методом визначення островків з високою та низькою якістю в областях оптичної прозорості германію. Вперше було запропоновано взяти до уваги анизотропію пружних сталей і їх взаємозв'язок з коефіцієнтом поглинання в площині пластини германію. У середовищі Lab View розроблена програма, що дозволяє на підставі вимірних результатів, використовуючи повну модель вимірювання напруги, будувати тривимірний графік розподілених внутрішніх напружень у досліджуваних пластинах монокристалічного германію, на якому явно проглядається анизотропія механічних властивостей германію в площині (100).

Ключові слова: монокристалічний германій, коефіцієнт поглинання, дискретне управління, анизотропія пружних сталей.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Основными требованиями к кристаллическим материалам для качественной оптики являются максимальная прозрачность в рабочем диапазоне длин волн, однородность по показателю преломления и минимальное количество дефектов кристаллической решетки (малоугловых границ, блоков, дислокаций, вакансий, фазовых включений). Для ИК-области спектра, в которой, в основном, используются полупроводниковые материалы, до настоящего времени имеется ряд нерешенных проблем и, в первую очередь, отсутствие критерия отбора материала с минимальным коэффициентом поглощения.

Известно, что основным материалом в качестве оптической среды для приборостроения (линзы, объективы, окна, фильтры и т. д.) на области спектра 3–5 и 8–14 мкм является монокристаллический германий *n*-типа проводимости. В работе [1] сообщается, что за краем основной полосы поглощения на длине волны 10,6 мкм промышленный высокоомный монокристаллический германий имеет коэффициент поглощения α равный $(4 \pm 2) \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$, и только специальные методы очистки исходного материала и усовершенствование технологии выращивания позволяют

получать образцы с $\alpha \leq 2 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$.

Определение столь малой величины α из измерения пропускания, определяемого с помощью обычных спектральных приборов, связано с необходимостью использования толстых образцов. Из-за большой величины показателя преломления германия ($n=4$) измерение пропускания толстых образцов сопряжено с расфокусировкой излучения в спектральных приборах и, как следствие, с ошибками в измеряемой величине пропускания [2]. Корректное определение α может быть выполнено иными методами на специальном оборудовании [3].

Для подробного исследования кристаллов, например, при определении его пригодности в определенных условиях применения, при определении распределения примесей, а также при контроле технологии выращивания, необходимо знание распределения коэффициента поглощения по всей площади кристалла. Такие подробные исследования распределения слабого оптического поглощения в больших и крупногабаритных кристаллах, диаметр которых превышает 20 мм, можно с успехом проводить, используя метод фотоупругости [4].

Высокопрозрачные в ближней ИК-области монокристаллы германия широко применяются в инфракрасной оптике. Однако, возникающие при выращивании монокристаллов трехмерные дефекты кристаллической решетки – пузырьки, поры, включения посторонних фаз, в силу своей соизмеримости с длинами волн света являются также и оптически дефектами, влияющими на качество пропускания света. Совокупность дефектов меньших размерностей – атомов примесей, вакансий дислокаций приводит к локальным неоднородностям диэлектрической проницаемости и также является источником различных аномалий влияющих в большой степени на основной показатель оптического качества монокристаллического германия – коэффициента поглощения [5].

В работе [5] авторами на интерферометре УР-80 с длиной волны 10,6 мкм были определены в пластинах германия области с наихудшей оптической однородностью с внутренними напряжениями $50 \cdot 10^8$ Па при плотности дислокаций в этих областях порядка 10^5 см^{-2} и области с улучшенной оптической однородностью с внутренними напряжениями в этих областях порядка $1 \cdot 10^8$ Па и плотностью дислокаций порядка $5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$.

Так как пластическая деформация в германии вызывает размытие и сдвиг края поглощения в длинноволновую сторону и, кроме этого, приводит к двулучепреломлению, то для кубических кристаллов это означает появление анизотропии показателя преломления, а это, в свою очередь, даёт возможность использовать в исследованиях метод фотоупругости.

Такая фотоупругость возникает у монокристаллов, полученных при высокотемпературном росте, когда неизбежные температурные градиенты, увеличивающиеся с ростом диаметра выращиваемого монокристалла приводят к пластическим внутренним напряжениям. Выраженное в паскалях значение двулучепреломления, можно использовать для характеристики оптического качества монокристалла. Из сказанного можно сделать вывод, что разработка методик дискретного (пошагового) контроля и исследование оптического качества монокристаллического германия является весьма актуальной задачей.

Цель работы – разработать методику и устройство для дискретного, пошагового контроля оптического качества в пластинах германия диаметром 20–200 мм.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Свет, распространяющийся вдоль направления пластической деформации, испытывает двулучепреломление. Кроме того, пластическая деформация вызывает увеличение коэффициента поглощения, который является основным показателем оптического качества монокристаллического германия.

Изменение спектров поглощения можно интерпретировать как результат влияния деформации на оптические переходы трёх типов:

- а) межзонные прямые;
- б) внутризонные прямые;
- в) переходы соответствующие поглощению сво-

бодными носителями – электронами и дырками [6, 7].

Для определения распределения двулучепреломления (пластической деформации) по плоскости пластины германия нами была разработана экспериментальная установка, изображенная на рис. 1.

Из [8] известна зависимость разности главных напряжений в пластинах полупроводников от отношения постоянной и переменной составляющих напряжения, снимаемого с выхода фотоприемника:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\lambda \arcsin \frac{U_{d\approx}}{U_{d0}}}{2\pi C d},$$

где λ – длина волны источника излучения, мкм; U_{d0} – постоянная составляющая напряжения, снимаемая с фотоприемника, В; $U_{d\approx}$ – переменная составляющая напряжения, снимаемая с фотоприемника, В; C – коэффициент, характеризующий чувствительность полупроводниковой пластины к внутренним напряжениям, Па^{-1} ; d – толщина пластины, мкм.

Для визуализации данных, в частности, распределения полей физических величин, часто используются представлениями цифровых данных в форме полутоновых или цветных графиков, где определенному диапазону чисел соответствует заданный цвет. В настоящее время известно довольно большое число различных методов представления трехмерных объектов и связанных с ними методов визуализации. Мы использовали поверхностную модель, описывающую поверхность объекта в трехмерном пространстве.

Определим ряд задач, которые необходимо решить при представлении двумерных данных в разрабатываемой программе визуализации.

Первая из таких задач – чтение исходных данных пользователя, которые, как правило, хранятся в виде файлов различного типа. Для 3D-визуализации распределения внутренних напряжений данные организованы в виде массива, где номер строки соответствует номеру линии сканирования (координата Y). Положение точки контроля на области сканирования соответствует значению по оси X и является константой, зависящей от шага сканирования, и величина внутреннего напряжения является координатой по оси Z . Полученный массив сохраняется в виде текстового файла.

Второй задачей, следующей за чтением данных, является выбор способа их визуализации. Визуализация может осуществляться в различном виде, например, в форме таблиц чисел, в форме изображений, трехмерных поверхностей, линий уровня и т.п. Задача визуализации должна быть решена таким образом, чтобы оператор мог охватить набор данных не только в целом, но и подробно изучить их произвольный участок, вплоть до значения конкретного элемента. При этом требуется, чтобы эта визуализация, будучи наглядной, являлась достаточно простой и быстрой, а также не замедляла работу оператора.

Третья задача – это обработка и анализ данных.

При проведении эксперимента нами были использованы однопроходная и полная модели измерения внутренних напряжений [8]. Полная модель позволяет провести исследование внутренних напряжений пластины по всей ее поверхности, что

полностью удовлетворяет поставленным задачам. На базе экспериментальной установки нами было разработано устройство, позволяющее производить измерения внутренних напряжений в пластинах германия. Структурная схема устройства изображена на рис. 1.

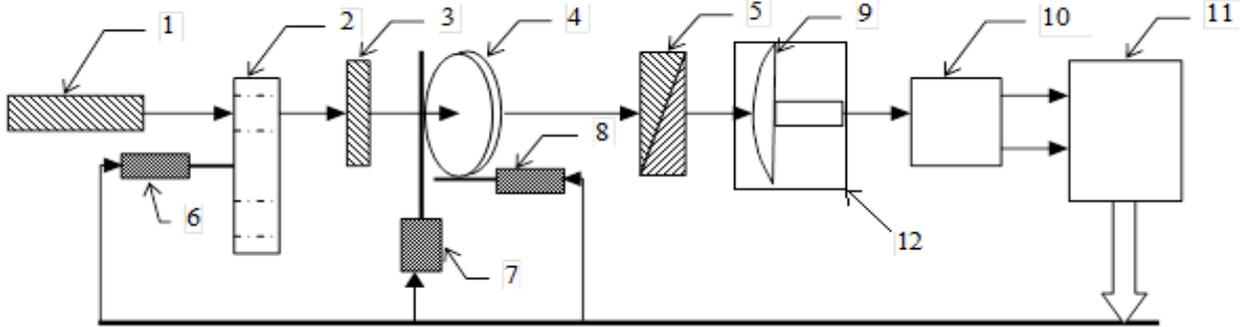


Рисунок 1 – Структурная схема автоматизированной системы определения внутренних напряжений в пластинах германия: 1 – источник поляризованного монохроматического излучения (лазер газовый ЛГ-79-1 с длиной волны $\lambda = 3,3$ мкм); 2 – механический модулятор; 3 – четвертьволновая пластинка; 4 – исследуемая полупроводниковая пластинка; 5 – оптический анализатор; 6 – электрический привод модулятора; 7 – электрический привод сканатора по оси Y; 8 – электрический привод сканатора по оси X; 9 – объектив с фотоприемником; 10, 11 – электронные блоки сопряжения с ЭВМ; 12 – термостат

Особенностью установки является управляемый ЭВМ сканатор, позволяющий перемещать измеряемую пластину германия относительно луча лазера с дискретностью 0,5 мм по оси X и Y. Так как на длине волны $\lambda = 3,3$ мкм показатель преломления германия равен 4,0, то, во избежание расфокусировки изображения, в фотоприёмник вмонтирован специальный короткофокусный объектив с полем зрения 300 мкм, а сам фотоприемник для уменьшения тепловых шумов на данной длине волны помещен в термостат.

В среде LabVIEW была разработана программа, позволяющая на основании данных, которые мы получили, используя полную модель измерения напряжений, строить трехмерный график распределения внутренних напряжений в пластинах полу-

проводников. Лицевая панель интерфейса пользователя представлена на рис. 2.

В данном случае был построен трехмерный график для пластины германия диаметром 51 мм.

В качестве образцов для измерений использовался монокристаллический германий выращенный методом Чохральского ориентации (100) и (111), электронный с удельным сопротивлением 10 Ом·см, концентрация примеси $1,1 \cdot 10^{14}$ см⁻³. Толщина полированных образцов составляла 0,8 мм, диаметр 51 мм. Перед измерением плотности дислокаций пластины травили в специальном травителе. Плотность дислокаций измерялась с помощью микроинтерферометра МИИ-4 по тем же точкам, что и внутренние напряжения.

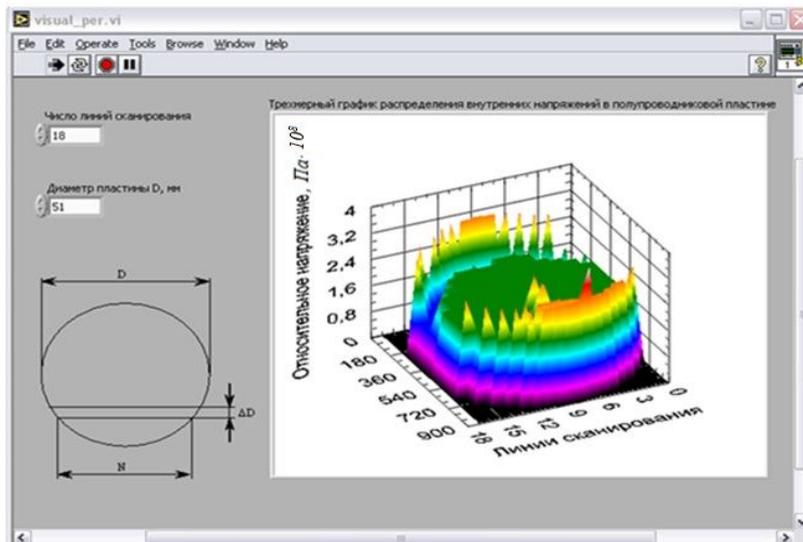


Рисунок 2 – Интерфейс пользователя. Лицевая панель

На рис. 3, 4 представлені лінії рівного внутрішнього напруження в площині пластини германія (100) і (111), вимірені нами по изложенной методике. Как видно из рисунка лінії рівного напруження в площині (100) пластини германія розташовані в областях (островках), симетрія которых определяется анизотропией распределения модуля Юнга и коэффициента Пуассона [9] в плоскости (100). В плоскости (111) упругие постоянные Модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν носят изотропный характер, поэтому распределение внутренних напряжений носит концентрический характер с максимумом в центре и на периферии пластини.

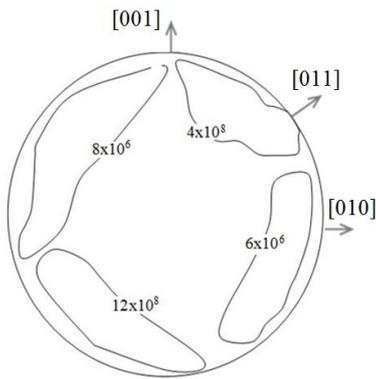


Рисунок 3 – Лінії рівного внутрішнього напруження в площині пластини германія (100), Па

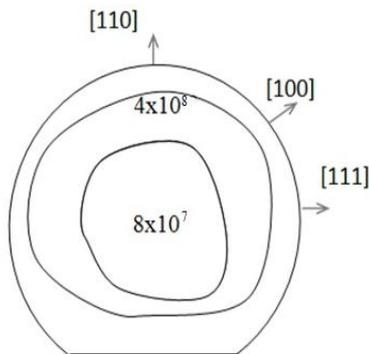


Рисунок 4 – Лінії рівного внутрішнього напруження в площині пластини германія (111), Па

Как видно из рис. 5 и 6, топограмма плотности дислокаций в плоскости (100) пластини германія носит также островковый характер, свойства которого определяются анизотропией упругих постоянных E и ν . В плотности (111) пластини германія топограмма плоскости дислокаций носит характер концентрических окружностей с максимумами значений в центре и на периферии.

По измеренным коэффициентам пропускания света T и коэффициента отражения R в неоднородных островках пластини германія ориентации (100) и (111) был вычислен коэффициент поглощения α по методике [10], разброс которого составил $0,007-0,02 \text{ см}^{-1}$.

Таким образом, для основных видов тепловизионных систем, связанных с передачей и обработкой изображения, основанной на получении контрастной картины с высоким разрешением элементов, в которой обязательным условием является высокая однородность показателя поглощения, этот монокристаллический германій не подходит.

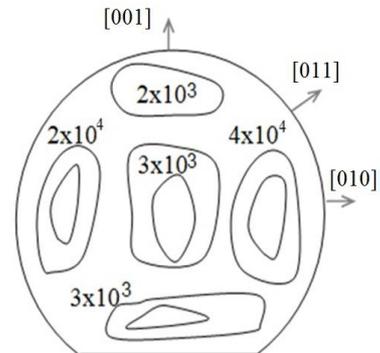


Рисунок 5 – Топограмма плотности дислокаций в плоскости пластини германія (100), см^{-2}

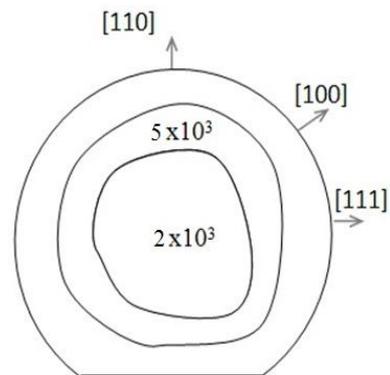


Рисунок 6 – Топограмма плотности дислокаций в плоскости пластини германія (111), см^{-2}

ВЫВОДЫ. 1. Впервые определено, что в области высокой дислокационной активности вдоль кристаллографических направлений скольжения участки разделяются свободными от дислокаций зонами, которые напрямую связаны с анизотропией упругих постоянных модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν .

2. Внутренние напряжения (величина двулучепреломления) зависят от пластической деформации и является неоднородной на микроскопическом уровне начальной стадии деформации. При увеличении деформации появляется неоднородность на макроскопическом уровне путем появления островковых локализованных полос сдвига.

3. Разработанная методика и устройство определения неоднородности двулучепреломления в пластически деформированных пластини германія хорошо согласуется с пространственной гетерогенностью оптических свойств германія, таких как коэффициент пропускания T , коэффициент отражения R и коэффициент поглощения α , что может быть использовано для определения однородности

коэффициента поглощения α и минимального рассеивания при изготовлении пластин германия для прецизионных тепловизионных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карлов И.В., Сисакян Е.В. Оптические материалы для СО-лазеров // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1980. – Т. 44, № 8. – С. 1631–1638.
2. Курик М.В. О точности определения коэффициента поглощения полупроводников // Оптика и спектр. – 1965. – Т. 19, № 6. – С. 964–967.
3. Пправе Г.Г., Чудаков В.С., Янусова Л.Г. О возможности прямых измерений термоупругих напряжений в несовершенных кристаллах, подвергнутых лазерному воздействию // Кристаллография. – 1983. – Т. 28, Вып. 5. – С. 944–950.
4. Чудаков В.С., Пправе Г.Г., Янусова Л.Г. Фотоупругий метод исследования слабого оптического поглощения в кристаллах при параллельном прохождении лучей // Кристаллография. – 1987. – Т. 31, № 6. – С. 1445–1448.

5. Каплунов И.А., Колесников А.И., Долнатов А.Б., Ткач О.И. Механические напряжения и оптические аномалии в кристаллах германия и парателлурифта // Весник ТвГУ. Серия «Физика». – 2004. – № 4(6). – С. 72–80.
6. Осипян Ю.А. Электронные свойства дислокации в полупроводниках. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 320 с.
7. Шикин В.Б., Шикина Ю.В. Заряженные дислокации в полупроводниковых кристаллах // УФН. – 1995. – Т. 165, № 8. – С. 887–917.
8. Оксанич А.П., Притчин С.Э., Краскевич В.Е., Батареев В.В. Автоматизированный комплекс для измерения внутренних напряжений в пластинах GaAs // Складні системи і процеси. – 2006. – № 2. – С. 48–45.
9. Wortman J.J. and Evens R.A. Yong’s modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio in Silicon and Germanium // J. Appl. Ph. – 1965. – Vol. 3, № 1 jan.
10. Каплунов И.А., Колесников А.И., Тальзин И.В. и др. Измерения коэффициентов ослабления света монокристалла германия и парателлурифта // Оптический журнал. – 2005. – Т. 72, № 7. – С. 76–84.

DEVELOPMENT OF TECHNIQUE AND DEVICE FOR OPTICAL QUALITY OF SINGLE-CRYSTAL GERMANIUM STUDY

A. Oksanych, V. Malevani

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: oksanich@kdu.edu.ua

Nowadays there are a number of problematic issues concerning infrared spectrum where semiconductor materials are mostly used. The main problem is the lack of criteria for selecting materials with a minimal absorption coefficient. To solve this problem we have developed an automated plant that allows performing a discrete control of optical quality of single-crystal wafers of germanium by singling out high-quality and low-quality areas of optical germanium. For the first time there has been a suggestion to take into account the anisotropy of elastic constants and their correlation with an absorption coefficient in the plane of germanium wafers. The program developed in the Lab View allows, on the basis of the obtained results while using a complete model of voltage measurement, building a three-dimension graph of internal stress distribution in germanium test wafers, which clearly demonstrates anisotropy of germanium mechanical qualities in the plate (100).

Key words: single-crystal germanium, absorption coefficient, discrete control, anisotropy of elastic constants.

REFERENCES

1. Charles I.V., Sissakian E.V. Optical materials for CO-lasers // Izv. Akademii Nauk SSSR. Ser. Physics. – 1980. – Vol. 44, № 8. – PP. 1631–1638. [in Russian]
2. Couric M.V. On the accuracy of determining the absorption coefficient of semiconductors // Optics and spectrum. – 1965. – Vol. 19, № 6. – PP. 964–967. [in Russian]
3. Prawn G.G., Chudakov V.S., Yanusova L.G. On the possibility of direct measurements of the thermal stress in imperfect crystals under laser action // Crystallography Reports. – 1983. – Vol. 28, Iss. 5. – PP. 944–950. [in Russian]
4. Chudakov V.S., Prawn G.G., Yanusova L.G. Faux-magnetoelastic method of investigation of the weak optical absorption in crystals with parallel propagation of rays // Crystallography Reports. – 1987. – Vol. 31, № 6. – PP. 1445–1448. [in Russian]
5. Kaplunov I.A., Kolesnikov A.I., Dolnатов A.B., Tkach O.I. Mechanical stresses and optical anomalies in germanium crystals paratellurite // Vestnik TvGU. Ser. Physics. – 2004. – № 4 (6). – PP. 72–80. [in Russian]

6. Osipyany Y.A. *Electronic properties of dislocations in semiconductors*. – Moscow: Editorial URSS, 2000. – 320 p. [in Russian]
7. Shikin V.B., Shikin Y.V. Charged dislocations in semiconductor crystals // Uspekhi Fizicheskikh Nauk. – 1995. – Vol. 165, № 8. – PP. 887–917. [in Russian]
8. Oksanych A.P., Pritchyn S.E., Kraskevich V.E., Batareew V.V. An automated system for the measurement of internal stresses in GaAs plates // Skladni Systemy i procesy. – 2006. – № 2. – PP. 48–56. [in Russian]
9. Wortman J.J. and Evens R.A. Yong’s modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio in Silicon and Germanium // J. Appl. Ph. – 1965. – Vol. 3, № 1 jan.
10. Kaplunov I.A., Kolesnikov A.I., Talyzin I.V., Sedov L.V., Shayovich S.L. Measurements of light attenuation coefficients for a single-crystal germanium and paratellurite // Optical journal. – 2005. – Vol. 72, № 7. – PP. 76–84. [in Russian]

Стаття надійшла 25.12.2012.