

Kaevitser Vladilen Iosifovich – Kotel'nikov institute of Radio Engineering and Electronics of RAS; e-mail: kvi43@mail.ru; 1, sq. acad. B.A. Vvedensky, Fryazino, Moscow region, 141190, Russia; phone: +74965652670; deputy director; dr. of eng. sc.

Zakharov Alexandr Ivanovich – e-mail: aizakhar@mail.ru; phone: +74965652432; head of the laboratory; dr. of phis.-math. sc.

Smolyaninov Il'ya Vyacheslavovich – e-mail: ilia159@mail.ru; phone: +74965652451; research assistant.

Tarasov Sergey Pavlovich – Southern Federal University; e-mail: tsp-47@mail.ru; 105/42, Bolshaya Sadovaya street, Rostov-on-Don, 344006, Russia; phone: +78634310635; head of department; dr. of eng. sc.

Soldatov Gennady Valerievich – e-mail: g.soldatov@gmail.com; phone: +78634681890; assistant.

УДК 620.179.16

М.И. Сластен, В.И. Тимошенко

**О СЕРИИ МНОГОКРАТНЫХ ОТРАЖЕНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО
ИМПУЛЬСА В ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦАХ С
ГАРМОНИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ МЕХАНИЧЕСКИМИ
НАПРЯЖЕНИЯМИ**

В настоящее время акустические монокристаллы все более широко используются в различных областях современной радиоэлектроники, лазерной техники, оптико-акустических устройствах обработки информации и т.п. Обеспечение достаточной надежности устройств на основе монокристаллов требует разработки эффективных методов ультразвукового контроля их свойств при выращивании монокристаллов и изготовлении устройств на их основе. Технология выращивания монокристаллов постоянно совершенствуется, что также требует усовершенствования методов контроля их свойств. Ультразвуковой контроль качества монокристаллов разрабатывается непосредственно для каждого конкретного монокристалла с учетом типа его кристаллической решетки, упругих свойств и т.д. В данной работе рассматривается галлий-гадолиевый гранат, обладающий кубической решеткой, упруго изотропный, но оптически анизотропный. Основным дефектом, возникающим при выращивании монокристаллов галлий-гадолииевого граната, является наличие остаточных механических напряжений, отрицательно влияющих на работу, например, устройств обработки информации и т.п. Диагностика остаточных механических напряжений и их идентификация – выяснение характера напряженного состояния – осуществляются с использованием серии многократных отражений ультразвукового импульса, распространяющегося в плоскопараллельном образце монокристалла. Наиболее перспективная в настоящее время технология выращивания монокристаллов галлий-гадолииевого граната приводит к возникновению в выращиваемых монокристаллических слитках остаточных механических напряжений с распределением чередующихся сжатых и растянутых слоев, близким к гармоническому. Такое распределение сжатых и растянутых в большей или меньшей степени слоев приводит к серии многократно отраженных импульсов с особой нетрадиционной синусоидальной огибающей серии. Кроме этого, амплитуды эхоимпульсов в серии зависят, в основном, от неоднородности остаточных механических напряжений, а не их величины. Амплитуды эхоимпульсов в серии могут быть даже равны нулю при существенных по величине остаточных механических напряжениях.

Напряженное состояние; остаточные механические напряжения; гармоническое распределение остаточных механических напряжений; ультразвуковой контроль; акустическая диагностика; идентификация механических напряжений; многократные отражения; огибающая серии эхоимпульсов; акустические монокристаллы; монокристаллические слитки.

M.I. Slasten, V.I. Timoshenko

ABOUT A STRING OF MULTIPLE REVERBERATIONS OF ULTRASONIC PULSE IN PLANE-PARALLEL SAMPLES WITH HARMONICALLY VARYING MECHANICAL STRESSES

Nowadays acoustic mono-crystal is increasingly used in different fields of modern radio-electronics, laser equipment, optical and acoustic devices of information processing and so on. Providing sufficient reliability of devices requires effective methods development of ultrasonic control of their properties while growing mono-crystals and producing devices on their basis. The technology of growing mono-crystals is constantly improving that also requires control methods improvement of their properties. Ultrasonic control of mono-crystals quality is elaborated directly for each separate mono-crystal taking into account the type of its crystal lattice, elastic properties, etc. Gallium gadolinium garnet with cubic lattice, elastically isotropic but optically unisotropic is under consideration. The main defect arising while growing mono-crystals of gallium gadolinium garnet is the presence of residual mechanical stresses negatively influencing the work of data processing, for example, and so on. The diagnostics of residual mechanical stresses and their identification – clarifying the character of stress state – are made using a number of multiple reverberations of impulse spreading in a plane-parallel sample of mono-crystal. The most perspective modern technology of growing mono-crystals of gallium gadolinium garnet results in arising residual mechanical stresses, in growing mono-crystal bars, with the arrangement of alternating pressed and stretched layers close to harmonic one. Such an arrangement of more or less pressed and stretched layers leads to a string of repeatedly reverberated impulses with a peculiar nontraditional side-wave of a string. Besides, echo-impulses amplitudes in a string generally characterize heterogeneity of stressed state and are not connected with the quantity of residual mechanical stresses. Echo-impulses amplitudes in a string can be equal up to zero with the sufficient quantity of residual mechanical stresses.

Stress state; residual mechanical stresses; harmonic arrangement of residual mechanical stresses; ultrasonic control; acoustic diagnostics; identification of mechanical stresses; multiple reverberations; echo-impulses string; acoustic mono-crystals; mono-crystal bars.

Введение. Серии многократных отражений ультразвукового импульса в плоскопараллельных образцах монокристаллов представляют особый интерес при контроле [1-4] и диагностике напряженного состояния монокристаллов [5, 6], но, прежде всего, при их идентификации [7]. Форма огибающей серии многократных отражений ультразвукового импульса в плоскопараллельных образцах монокристаллов зависит от величины остаточных механических напряжений [8, 9], характера их распределения в образцах монокристаллов [10, 11], направления распространения ультразвуковых поперечных волн относительно направлений остаточных механических напряжений в монокристаллическом образце [12, 13], ориентации плоскости поляризации поперечной ультразвуковой волны относительно направлений остаточных механических напряжений в плоскопараллельном образце [14, 15].

В данном случае интерес представляет распределение остаточных механических напряжений в монокристаллическом образце, характерное при используемой технологии выращивания монокристаллических слитков [16–18].

Постановка задачи. При распространении ультразвукового импульса в плоскопараллельном монокристаллическом образце с остаточными механическими напряжениями при многократных отражениях от противоположных граней форма огибающей серии эхоимпульсов может существенно отличаться от убывающей экспоненты [19].

На рис. 1 изображен монокристаллический образец 1 галлий-гадолиниевого граната в виде прямоугольного параллелепипеда и ультразвуковой преобразователь поперечных волн 2.

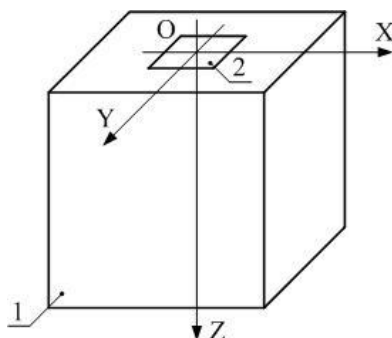


Рис. 1. Монокристаллический образец 1 галлий-гадолиниевого граната с установленным на нем ультразвуковым преобразователем поперечных волн 2

На амплитуду отраженного эхоимпульса и форму огибающей серии эхоимпульсов влияют неоднородности остаточных механических напряжений и характер их распределения в поперечном сечении ультразвукового пучка [20]. На оптической картине (рис. 2) видны чередующиеся темные и светлые полосы. Каждой темной полосе соответствует ненапряженный слой монокристалла галлий-гадолиниевого граната в образце, а светлой – напряженный. Границами напряженных слоев и участков в монокристаллических слитках галлий-гадолиниевого граната являются эллипсоидальные поверхности с различной кривизной. Большие полуоси сплюснутых эллипсоидов, поверхности которых ограничивают слой, лежат в поперечном сечении слитка и могут быть равны между собой, а третья полуось совпадает с продольной осью слитка.

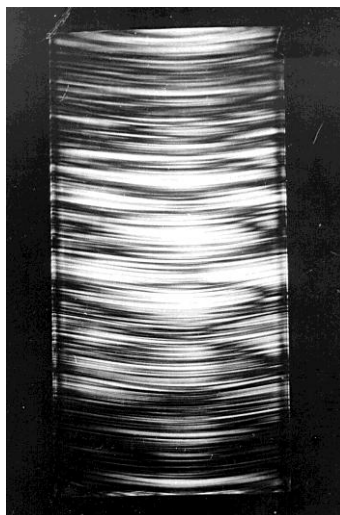


Рис. 2. Оптическая картина при просвечивании монокристаллического образца 1 галлий-гадолиниевого граната параллельным плоскополяризованным светом в направлении оси OY

Оси OX , OY и ось OZ , вдоль которой распространяются импульсы ультразвуковых колебаний, составляют правую координатную систему.

Пусть в образец 1 ультразвуковой преобразователь 2 излучает поперечные ультразвуковые колебания

$$\xi = \xi_0 \cos \omega t,$$

где ξ – упругое смещение; ξ_0 – амплитуда упругого смещения; ω – круговая частота ультразвуковых колебаний.

Излучаемая плоским преобразователем ультразвуковая волна может быть представлена как результат суперпозиции волн фиктивных точечных источников, расположенных на поверхности ультразвукового преобразователя. Все фиктивные источники действуют синфазно, и волна, распространяющаяся от излучателя, является результатом интерференции всех волн точечных источников [21].

Время t' n проходов через образец в прямом и обратном направлениях зависит от скорости распространения ультразвуковых колебаний, которое, в свою очередь, зависит от остаточных механических напряжений в образце и определяется выражением

$$t' = \frac{2Ln}{v},$$

где L – длина образца в направлении распространения ультразвуковой волны; v – скорость поперечной ультразвуковой волны, распространяющейся перпендикулярно механическим напряжениям и поляризованной вдоль механических напряжений.

Смещение ξ после прохождения через образец в прямом и обратном направлениях определяется по формуле

$$\xi = \xi_0 e^{-2\alpha Ln} \cos \left[\omega \left(t - \frac{2Ln}{v} \right) \right],$$

где α – коэффициент поглощения поперечной ультразвуковой волны.

При распространении ультразвуковых колебаний в образце в зависимости от распределения остаточных механических напряжений в сечении ультразвукового пучка и вдоль его распространения плоский волновой фронт излученного пучка искажается. В поперечном сечении пучка, прошедшего через образец в прямом и обратном направлениях, в момент падения на ультразвуковой преобразователь выделим зоны, результирующие колебания в которых обозначим через ξ_1 и ξ_2 , и которые происходят с противоположными фазами

$$\begin{cases} \xi_1 = \xi_0 e^{-2\alpha Ln} \cos \left[\omega \left(t - \frac{2Ln}{v_1} \right) \right] \\ \xi_2 = \xi_0 e^{-2\alpha Ln} \cos \left[\omega \left(t - \frac{2Ln}{v_2} \right) \right] \end{cases}.$$

Результирующее колебание ξ на ультразвуковом преобразователе определим следующим образом:

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_1 - \xi_2 = \xi_0 e^{-2\alpha Ln} \cos \left[\omega \left(t - \frac{2Ln}{v_1} \right) \right] - \xi_0 e^{-2\alpha Ln} \cos \left[\omega \left(t - \frac{2Ln}{v_2} \right) \right] = \\ &= -2\xi_0 e^{-2\alpha Ln} \sin \left(\omega Ln \frac{v_1 - v_2}{v_1 v_2} \right) \sin \left[\omega \left(t - Ln \frac{v_1 + v_2}{v_1 v_2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

Учитывая, что $v_1 v_2 \approx v^2$, $v_1 + v_2 \approx 2v$, $\omega = 2\pi f$ и $k = \frac{\omega}{v}$, где f – частота ультразвуковых колебаний; k – волновое число, запишем соотношение (1) в виде

$$\xi = -2\xi_0 e^{-2\alpha L n} \sin\left(2\pi f L \frac{v_1 - v_2}{v^2} n\right) \sin(\omega t - 2kLn). \quad (2)$$

На основании соотношения (2) можно записать, что выражение для амплитуды эхоимпульса A_n с порядковым номером n в серии отражений имеет вид

$$A_n = A_0 e^{-2\alpha L n} \left| \sin\left(2\pi f L n \frac{v_1 - v_2}{v^2}\right) \right|. \quad (3)$$

Учитывая, что

$$\frac{v_1 - v_2}{v} = \delta\Delta v,$$

где $\delta\Delta v$ – акустическая или упругая анизотропия, обусловленная механическими напряжениями, окончательно запишем выражение (3)

$$A_n = A_0 e^{-2\alpha L n} \left| \sin\left(\frac{2\pi f L \delta\Delta v}{v} n\right) \right|. \quad (4)$$

Для экспериментальной проверки справедливости полученного выражения (2) используется монокристаллический образец галлий-гадолиниевого граната в виде прямоугольного параллелепипеда с установленным на нем ультразвуковым преобразователем и системой координат, изображенными на рис. 1. О распределении остаточных механических напряжений в монокристаллическом образце галлий-гадолиниевого граната и их направлении относительно направления распространения ультразвукового пучка можно судить по оптической картине, представленной на рис. 2, полученной при просвечивании исследуемого образца 1 в направлении оси OY параллельным плоскополяризованным светом. Фотограмма полученной серии многократных отражений ультразвукового импульса в монокристаллическом образце 1 галлий-гадолиниевого граната представлена на рис. 3.

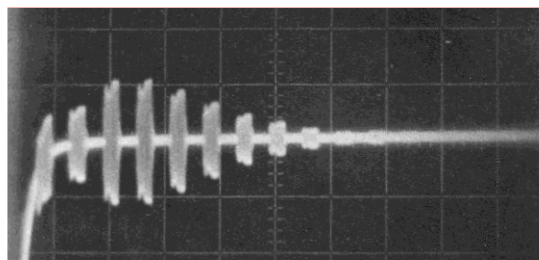


Рис. 3. Фотограмма серии многократных отражений ультразвукового импульса в монокристаллическом образце 1 галлий-гадолиниевого граната

Серия многократных отражений ультразвукового импульса в монокристаллическом образце 1 галлий-гадолиниевого граната с чередующимися по закону, близкому к гармоническому, сжатыми и растянутыми слоями, представленная на рис. 3, подтверждает справедливость выражения (2), описывающего синусоидальный характер изменения амплитуды эхоимпульса от его порядкового номера в серии.

Из выражения (1) следует, что если $\xi_1 \approx \xi_2$, то амплитуда эхоимпульсов в серии отражений мала; если $\xi_1 = \xi_2$, то амплитуда эхоимпульсов равна нулю, и необходимы дополнительные исследования.

Выводы. Изменение амплитуды эхоимпульсов в серии многократных отражений, происходящее по синусоидальному закону, свидетельствует о существовании в монокристаллическом образце галлий-гадолиниевого граната чередования, близкого к гармоническому, сжатых и растянутых слоев.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сластен М.И.* Ультразвуковой контроль остаточных механических напряжений в монокристаллах галлий-гадолиниевого граната. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 127 с.
2. *Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И.* Введение в акустоупругость. – Киев: Наукова думка, 1977. – 152 с.
3. *Никитина Н.Е.* Акустоупругость. Опыт практического применения. – Н. Новгород: ТАЛАМ, 2005. – 208 с. – ISBN 5-93496-041-5.
4. *Сластен М.И.* Ультразвуковой эхо-импульсный метод измерения механических напряжений // Известия ДонНТУ-ТРТУ. – 2001. – № 1. – С. 192-201.
5. *Сластен М.И.* Акустическая диагностика напряженного состояния монокристаллов с остаточными механическими напряжениями эхо-импульсным методом // Акустические измерения и стандартизация. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустика океана: Сборник трудов XVI сессии Российского акустического общества: в 3-х т. Т. II. – М.: ГЕОС, 2005. – С. 89-93.
6. *Сластен М.И.* Об огибающей серии эхо-импульсов в монокристаллах с неоднородными механическими напряжениями при акустической диагностике напряженного состояния // Акустические измерения и стандартизация. Электроакустика. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустика океана: Сборник трудов XIX сессии Российского акустического общества: в 3-х т. Т. 2. – М.: ГЕОС, 2007. – С. 95-100.
7. *Сластен М.И.* Идентификация одноосных гармонически изменяющихся остаточных механических напряжений при диагностике напряженного состояния монокристаллов ультразвуковым эхо-импульсным методом // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 1 (126). – С. 197-204.
8. *Сластен М.И.* Зависимость огибающей серии ультразвуковых эхо-импульсов в слабопоглощающих упруго изотропных в ненапряженном состоянии монокристаллах с остаточными механическими напряжениями от частоты // Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов X Международной научно-технической конференции: в 4-х т. Т. 3. – Донецк, Украина: Изд-во ДонНТУ, 2003. – С. 126-130.
9. *Сластен М.И.* Измерение упругой анизотропии в монокристаллах с остаточными механическими напряжениями // Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XI Международной научно-технической конференции: в 4-х т. Т. 3. – Донецк, Украина: Изд-во ДонНТУ, 2004. – С. 118-122.
10. *Сластен М.И.* О рефракции ультразвуковых волн в монокристаллах с неоднородными механическими напряжениями // Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы: Материалы Шестого Международного научно-практического семинара. – Донецк, Украина: ДонНТУ, 2005. – С. 645-655.
11. *Сластен М.И.* Ультразвуковой эхо-импульсный метод нахождения границ ненапряженных участков в монокристаллах галлий-гадолиниевого граната // Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века: сборник трудов VIII Международной научно-технической конференции: в 3-х т. Т. 2. – Донецк, Украина: Изд-во ДонНТУ, 2001. – С. 157-163.
12. *Сластен М.И., Тимошенко В.И.* О серии многократных отражений ультразвукового импульса в плоскопараллельных образцах с гармонически изменяющимися механическими напряжениями // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 9 (122). – С. 225-230.
13. *Сластен М.И.* Измерение градиента скорости ультразвука в монокристаллах с линейно изменяющимися механическими напряжениями // Акустические измерения и стандартизация. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустика океана: сборник трудов XXII сессии Российского акустического общества и Сессии Научного совета РАН по акустике: в 3-х т. Т. 2. – М.: ГЕОС, 2010. – С. 98-102.

14. *Сластен М.И.* Распространение ультразвуковой волны в плоскопараллельном образце с линейно изменяющимися остаточными механическими напряжениями // *Известия ТРТУ*. – 2002. – № 6 (29). – С. 170-175.
15. *Сластен М.И.* Распространение ультразвуковых волн в плоскопараллельных монокристаллических образцах с гармонически изменяющимися остаточными механическими напряжениями // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2011. – № 9 (122). – С. 219-224.
16. *Сластен М.И.* Измерение градиента скорости ультразвука в монокристаллах с гармонически изменяющимися остаточными механическими напряжениями // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2011. – № 1 (114). – С. 36-43.
17. *Сластен М.И.* Остаточные механические напряжения в слитках монокристаллического галлий-гадолиниевого граната // *Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов IX международной научно-технической конференции: в 3-х т. Т. 3.* – Донецк, Украина: Изд-во ДонНТУ, 2002. – С. 28-35.
18. *Блистанов А.А.* Кристаллы квантовой и нелинейной оптики. – М.: МИСИС, 2000. – 432 с. – ISBN 5-87623-065-0.
19. *Сластен М.И.* О сериях многократных отражений ультразвуковых импульсов в плоскоцилиндрических образцах с механическими напряжениями // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2012. – № 9 (134). – С. 223-228.
20. *Тимошенко С.П., Гудьер Дж.* Теория упругости: пер. с англ. М.И. Рейтмана / под ред. Г.С. Шапиро. – 2-е изд. – М.: Наука. Гл. ред. физико-математической литературы, 1979. – 560 с.
21. *Акустика морских осадков / под ред. Л. Хэмптона: пер. с англ. А.В. Бунчука, Е.А. Копыла.* – М.: Изд-во «Мир», 1977. – 533 с.

REFERENCES

1. *Slasten M.I.* Ul'trazvukovoy kontrol' ostatochnykh mekhanicheskikh napryazheniy v monokristallakh galliy-gadolinievogo granata [Ultrasonic testing of residual mechanical stresses in monocrystals of gallium gadolinium garnet]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2004, 127 p.
2. *Guz' A.N., Makhort F.G., Gushcha O.I.* Vvedenie v akustouprugost' [Introduction to customproject]. Kiev: Naukova dumka, 1977, 152 p.
3. *Nikitina N.E.* Akustouprugost'. Opyt prakticheskogo primeneniya [Customproject. Experience of practical application]. Nizhniy Novgorod: TALAM, 2005, 208 p. ISBN 5-93496-041-5.
4. *Slasten M.I.* Ul'trazvukovoy ekho-impul'snyy metod izmereniya mekhanicheskikh napryazheniy [Ultrasonic pulse-echo method for measuring mechanical stresses-stresses], *Izvestiya DonNTU-TRTU* [Proceedings of Donetsk national technical University-TSURE], 2001, No. 1, pp. 192-201.
5. *Slasten M.I.* Akusticheskaya diagnostika napryazhennogo sostoyaniya monokristallov s ostatochnymi mekhanicheskimi napryazheniyami ekho-impul'snym metodom [Acoustic diagnosis of stressed condition of monocrystals with residual mechanical stresses of the echo-pulse method], *Akusticheskie izmereniya i standartizatsiya. Ul'trazvuk i ul'trazvukovye tekhnologii. Atmosfernaya akustika. Akustika okeana: Sbornik trudov XVI sessii Rossiyskogo akusticheskogo obshchestva* [Acoustic measurements and standardization. Ultrasound and ultrasonic technology. Atmospheric acoustics. Ocean acoustics: proceedings of the XVI session of the Russian acoustical society]: in 3 vol. Vol II. Moscow: GEOS, 2005, pp. 89-93.
6. *Slasten M.I.* Ob ogibayushchey serii ekho-impul'sov v monokristallakh s neodnorodnymi mekhanicheskimi napryazheniyami pri akusticheskoy diagnostike napryazhennogo sostoyaniya [About the envelope of a series of echo-pulses in single crystals with inhomogeneous mechanical stresses during acoustical diagnostics of stressed state], *Akusticheskie izmereniya i standartizatsiya. Elektroakustika. Ul'trazvuk i ul'trazvukovye tekhnologii. Atmosfernaya akustika. Akustika okeana: Sbornik trudov XIX sessii Rossiyskogo akusticheskogo obshchestva* [Acoustic measurements and standardization. Electroacoustics. Ultrasound and ultrasonic technology. Atmospheric acoustics. Ocean acoustics: proceedings of the XIX session of the Russian acoustical society]: in 3 vol. Vol. 2. Moscow: GEOS, 2007, pp. 95-100.
7. *Slasten M.I.* Identifikatsiya odnoosnykh garmonicheskikh izmenyayushchikhsya ostatochnykh mekhanicheskikh napryazheniy pri diagnostike napryazhennogo sostoyaniya monokristallov ul'trazvukovym ekho-impul'snym metodom [Identification of single-axis harmonically varying residual mechanical stresses during diagnostic of stressed condition of monocrystals by means of ultrasonic echo- pulse method], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 1 (126), pp. 197-204.

8. *Slasten M.I.* Zavisimost' ogibayushchey serii ul'trazvukovykh ekho-impul'sov v slabopogloshchayushchikh uprugo izotropnykh v nenapryazhennom sostoyanii monokristallakh s ostatochnymi mekhanicheskimi napryazheniyami ot chastoty [The dependence of the envelope of a series of ultrasonic echo pulses in a weakly absorbing elastically isotropic in the unstressed condition of monocrystals with residual mechanical stresses on the frequency], *Mashinostroenie i tekhnosfera XXI veka: Sbornik trudov Kh Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Machine-building and technosphere of the XXI century: proceedings of the X International scientific and technical conference]: v 4 vol. Vol. 3. Donetsk, Ukraine: Izd-vo DonNTU, 2003, pp. 126-130.
9. *Slasten M.I.* Izmerenie uprugoy anizotropii v monokristallakh s ostatochnymi mekhanicheskimi napryazheniyami [Measurement of elastic anisotropy in single crystals with residual mechanical stresses], *Mashinostroenie i tekhnosfera XXI veka: Sbornik trudov Kh Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Machine-building and technosphere of the XXI century: proceedings of the XI International scientific and technical conference]: in 4 vol. Vol. 3. Donetsk, Ukraine: Izd-vo DonNTU, 2004, pp. 118-122.
10. *Slasten M.I.* O refraksii ul'trazvukovykh voln v monokristallakh s neodnorodnymi mekhanicheskimi napryazheniyami [About refraction of ultrasonic waves in single crystals with inhomogeneous mechanical stresses], *Praktika i perspektivy razvitiya partnerstva v sfere vysshey shkoly: Materialy Shestogo Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo seminar* [Practice and prospects of partnership development in the sphere of higher school: Materials of the Sixth International scientific-practical seminar]. Donetsk, Ukraine: DonNTU, 2005, pp. 645-655.
11. *Slasten M.I.* Ul'trazvukovoy ekho-impul'snyy metod nakhozheniya granits nenapryazhennykh uchastkov v monokristallakh gallyi-gadolinievogo granata [Ultrasonic pulse-echo method to find the borders easy-governmental sites in single crystals of gallium-gadolinium garnet films], *Mashinostroenie i tekhnosfera na rubezhe XXI veka: sbornik trudov VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Mechanical engineering and technosphere of the XXI century: proceedings of the VIII International scientific and technical conference]: in 3 vol. Vol. 2. Donetsk, Ukraine: Izd-vo DonGTU, 2001, pp. 157-163.
12. *Slasten M.I., Timoshenko V.I.* O serii mnogokratnykh otrazheniy ul'trazvukovogo impul'sa v ploskoparallel'nykh obraztsakh s garmonicheskimi izmenyayushchimisya mekhanicheskimi napryazheniyami [About a string of multiple reverberations of ultrasonic pulse in plane-parallel samples with harmonically varying mechanical stresses], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 9 (122), pp. 225-230.
13. *Slasten M.I.* Izmerenie gradienta skorosti ul'trazvuka v monokristallakh s lineynoy izmenyayushchimisya mekhanicheskimi napryazheniyami [The measurement of the gradient of the speed of ultrasound in monocrystals with ramp mechanical stresses], *Akusticheskie izmereniya i standartizatsiya. Ul'trazvuk i ul'trazvukovye tekhnologii. Atmosfernaya akustika. Akustika okeana: sbornik trudov XXII sessii Rossiyskogo akusticheskogo obshchestva i Sessii Nauchnogo soveta RAN po akustike* [Acoustic measurements and standardization. Ultrasound and ultrasonic technology. Atmospheric acoustics. Ocean acoustics: proceedings of the XXII session of the Russian acoustical society and Session of Scientific Council RAS on acoustics]: in 3 vol. Vol. 2. Moscow: GEOS, 2010, pp. 98-102.
14. *Slasten M.I.* Rasprostraneniye ul'trazvukovoy volny v ploskoparallel'nom obraztse s lineynoy izmenyayushchimisya ostatochnymi mekhanicheskimi napryazheniyami [The ultrasonic wave propagation in plane-parallel sample with linearly varying residual mechanical stresses], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2002, No. 6 (29), pp. 170-175.
15. *Slasten M.I.* Rasprostraneniye ul'trazvukovykh voln v ploskoparallel'nykh monokristallicheskikh obraztsakh s garmonicheskimi izmenyayushchimisya ostatochnymi mekhanicheskimi napryazheniyami [Ultrasonic waves propagation in plane-parallel monocrystal samples with harmonically varying residual mechanical stresses], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 9 (122), pp. 219-224.
16. *Slasten M.I.* Izmereniye gradienta skorosti ul'trazvuka v monokristallakh s garmonicheskimi izmenyayushchimisya ostatochnymi mekhanicheskimi napryazheniyami [Measurement of ultrasonic speed gradient in monocrystals with harmonically varying residual mechanical stresses], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 1 (114), pp. 36-43.

17. *Slasten M.I.* Ostatochnye mekhanicheskie napryazheniya v slitkakh monokristallicheskogo galliy-gadoliniyevogo granata [Residual mechanical stresses in ingots monocrystalline gallium-gadolinium garnet films], *Mashinostroenie i tekhnosfera XXI veka. Sbornik trudov IX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Mechanical engineering and technosphere of the XXI century: proceedings of the IX International scientific and technical conference]; in 3 vol. Vol. 3. Donetsk, Ukraina: Izd-vo DonNTU, 2002, pp. 28-35.
18. *Blistanov A.A.* Kristally kvantovoy i nelineynoy optiki [Crystals of quantum and nonlinear optics]. Moscow: MISIS, 2000, 432 p. ISBN 5-87623-065-0.
19. *Slasten M.I.* O seriyakh mnogokratnykh otrazheniy ul'trazvukovykh impul'sov v ploskotsilindricheskikh obraztsakh s mekhanicheskimi napryazheniyami [About strings of multiple reverberations of ultrasonic pulses in plane-cylinder samples with mechanical stresses], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 9 (134), pp. 223-228.
20. *Timoshenko S.P., Gud'er Dzh.* Teoriya uprugosti [Theory of elasticity]: Translation from English M.I. Reytmana, Ed. by G.S. Shapiro. 2nd ed. Moscow: Nauka. Gl. Red. fiziko-matematicheskoy literatury, 1979. 560 p.
21. *Akustika morskikh osadkov* [Acoustics of marine sediments], Ed. by L. Khemptona: Translation from English A.V. Bunchuka, E.A. Kopyla. Moscow: Izd-vo «Mir», 1977, 533 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.И. Сухинов.

Сластен Михаил Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: lina@mvs.tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371663; кафедра физики; к.т.н.; доцент.

Тимошенко Владимир Иванович – e-mail: ega@tti.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Slasten Michail Ivanovitch – Southern Federal University; e-mail: lina@mvs.tsure.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371663; the department of physics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Timoshenko Vladimir Ivanovitch – e-mail: ega@tti.sfedu.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371795; the department of electrohydroakoustics and medical engineering; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.883

Ю.В. Душенин, И.И. Маркович

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОЛУЧЕВЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ С ЦИФРОВОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ СИГНАЛОВ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ РАЙОНОВ

Актуальность мониторинга Мирового океана с высокой скоростью и точностью постоянно возрастает. Для решения различных задач данной проблемы в мировой практике все чаще используют многолучевые гидролокационные системы (МГС). С развитием новых принципов построения систем и устройств обработки гидроакустических сигналов в современной технике все большее применение находят многолучевые эхолоты (МЛЭ) и гидролокаторы переднего обзора (ГПО), использующие перспективные методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов (ЦОС). В таких МГС с ЦОС вычислительная часть реализуется на современной элементной базе – цифровых процессорах и программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС), позволяющих перепрограммировать свою вычислительную среду под решение любой задачи и получать высокую требуемую производительность. Целью данной работы является рассмотрение МЛЭ, ГПО и малогабаритных приемопередатчиков многочастотных модулей для перспективных гидролокационных систем с