

УДК 539.2+535

Ю. А. Паладян, В. В. Румянцев, С. А. Федоров

Государственное учреждение «Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина»  
283114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ  
УДЕЛЬНОГО УГЛА ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ  
ПОЛЯРИЗАЦИИ УПРУГОЙ ВОЛНЫ В НЕИДЕАЛЬНОМ  
1D ФОНОННОМ КРИСТАЛЛЕ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ  
СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ

Yu. A. Paladyan, V. V. Rummyantsev, S. A. Fedorov

Public institution «A.A. Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering»  
283114, Donetsk, R. Luxembourg str., 72

NUMERICAL SIMULATION OF THE DEPENDENCE  
OF THE SPECIFIC ROTATION ANGLE OF THE POLARIZATION  
PLANE OF AN ELASTIC WAVE IN A NON-IDEAL 1D PHONON  
CRYSTAL ON THE CONCENTRATION OF STRUCTURAL  
DEFECTS

Ю. О. Паладян, В. В. Румянцев, С. А. Фьодоров

Державна установа «Донецкий физико-технический институт им. О. О. Галкина»  
283114, м. Донецьк, вул. Р. Люксембург, 72

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПИТОМОГО  
КУТА ОБЕРТАННЯ ПЛОЩИНИ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ПРУЖНОЇ  
ХВИЛІ В НЕИДЕАЛЬНОМУ 1D ФОНОННОМУ КРИСТАЛІ  
ВІД КОНЦЕНТРАЦІЇ СТРУКТУРНИХ ДЕФЕКТІВ

В рамках приближения виртуального кристалла выполнено численное моделирование зависимости удельного угла вращения плоскости поляризации упругой волны в неидеальном (разупорядоченном как по составу, так и по толщине слоев) двухподрешеточном 1D фононном кристалле от концентрации структурных дефектов.

**Ключевые слова:** акустическая активность, приближение виртуального кристалла, неидеальный 1D фононный кристалл.

Within the framework of the virtual crystal approximation, a numerical simulation of the dependence of the specific rotation angle of the plane of polarization of an elastic wave in a non-ideal (disordered both in composition and in layer thickness) two-lattice 1D phonon crystal on the concentration of structural defects is performed.

**Keywords:** acoustic activity, virtual crystal approximation, non-ideal 1D photonic crystal.

В рамках наближення віртуального кристала виконано чисельне моделювання залежності питомого кута обертання площини поляризації пружної хвилі в неідеальному (разупорядкованому як за складом, так і за товщиною шарів) двохпідриштітному 1D фононному кристалі від концентрації структурних дефектів.

**Ключові слова:** акустична активність, наближення віртуального кристала, неідеальний 1D фотонний кристал.

## Введение

Растущий сегодня интерес к изучению акустических свойств материалов [1], [2] обусловлен широкой перспективой их технологического использования при разработке и совершенствовании акустической техники, способной измерять соответствующие физические свойства с помощью звука, и создании новых акустических метаматериалов, позволяющих контролировать распространение звуковых волн в среде. В частности, особое место среди прочих занимают акустически активные многослойные структуры – неидеальные одномерные (1D) сверхрешетки.

Известно, что свойство акустической активности (АА) кристаллов является (аналогично оптической активности [3]) следствием наличия пространственной дисперсии, которую учитывают (при необходимости) при исследовании распространения акустических возбуждений в кристаллических структурах определенной симметрии (например, нецентросимметричных). Заметим, что задача о нахождении нормальных упругих волн, необходимых для расчета характеристик пространственно диспергирующих 1D сверхрешеток, к настоящему времени не решена. Тем не менее, очевидно, что при толщинах слоев многослойника, значительно больших характерных масштабов пространственной дисперсии, расчет соответствующих величин может быть выполнен приближенно, если рассматривать вклад каждого слоя в АА как независимый. Это означает, что для нахождения удельного угла вращения  $\varphi(\omega)$  плоскости поляризации достаточно знания лишь слоевых удельных углов вращения  $\varphi_{n\alpha}(\omega)$  ( $\omega$  – частота акустического возбуждения,  $n$  – номер элементарной ячейки 1D сверхрешетки,  $\alpha$  – номер слоя в этой ячейке) и концентрации инородных слоев (при их наличии).

Распространенным методом расчета нормальных мод в неупорядоченных сверхрешетках со случайным распределением структурных дефектов по всему объему, является приближение виртуального кристалла (ПВК), которое заключается [4-6] в замене конфигурационно зависимых параметров задачи на конфигурационно усредненные их значения. При исследовании [7], [8] электромагнитных возбуждений неидеальных 1D сред, содержащих инородные (дефектные) слои, распределенные случайным образом в объеме сверхрешетки, авторы данной работы применили развитый для идеальных сверхрешеток подход [9], с помощью которого соответствующие оптические характеристики неидеальных сверхрешеток получены [7], [8] с использованием именно ПВК.

В представленной работе развитый авторами ранее подход в рамках идеологии [3] перенесен на аналогичные расчеты характеристик АА несовершенного 1D фононного кристалла – системы плоскопараллельных слоев с анизотропными (в отличие от исследованных в [3] массивов изотропных слоев) примесными слоями, отличающимися упругими характеристиками. Полученное в работе выражение для  $\varphi(\omega)$  позволяет осуществлять численное моделирование концентрационной зависимости акустической активности сложных одномерных неидеальных систем.

## Теоретическая модель

Рассмотрим распространение акустических возбуждений вдоль слоевой акустической оси, перпендикулярной плоскостям слоев исследуемой неидеальной сверхрешетки, полученной в результате случайной замены слоев идеальной сверхрешетки инородными однородными одноосными примесными слоями. Причем «ячейки»

трансформированной «сверхрешетки» отличаются от соответствующих ячеек идеальной системы как по составу, так и по толщине. В данном случае в точном смысле понятия нет ячеек (поскольку нарушена трансляционная инвариантность), однако, сохраняется взаимно однозначное соответствие между слоями идеальной и неидеальной систем. При этом полагаем, что в данной слоистой структуре акустические оси каждого слоя параллельны друг другу.

В соответствии с феноменологическим подходом [11-13], угол поворота плоскости поляризации акустической волны в неидеальной топологически упорядоченной 1D сверхрешетке, состоящей из  $N$  элементарных ячеек, описывается следующим выражением:

$$\phi(\omega) = \sum_{n=1}^N \sum_{\alpha=1}^{\sigma} \phi_{n\alpha}(\omega) a_{n\alpha}. \quad (1)$$

Считаем, что количество ячеек  $N$  достаточно велико, поэтому возможно проведение конфигурационного усреднения соответствующих параметров исследуемой структуры. В (1)  $a_{n\alpha}$  и  $\phi_{n\alpha}(\omega)$  – соответственно конфигурационно зависимые толщина  $\alpha$ -го слоя  $n$ -й элементарной ячейки и удельный угол вращения плоскости поляризации акустической волны частоты  $\omega$ ,  $\sigma$  – число слоев элементарной ячейки. По аналогии с [3], [14] получаем следующие выражения для конфигурационно зависимых величин  $\phi_{n\alpha}(\omega)$  и  $a_{n\alpha}$ :

$$\phi_{n\alpha}(\omega) = \sum_{\mu(\alpha)}^{r(\alpha)} \phi_{\alpha}^{\mu(\alpha)}(\omega) \eta_{Cn\alpha}^{\mu(\alpha)}, \quad a_{n\alpha} = \sum_{\nu(\alpha)}^{s(\alpha)} a_{\alpha}^{\nu(\alpha)} \eta_{Tn\alpha}^{\nu(\alpha)} \quad (2)$$

Здесь  $\eta_{Tn\alpha}^{\nu} = 1$ , если в узле  $(n\alpha)$  1D кристалла находится слой  $\nu(\alpha)$ -й толщины,  $\eta_{Tn\alpha}^{\nu} = 0$  – в ином случае;  $\eta_{Cn\alpha}^{\mu} = 1$  если в узле  $(n\alpha)$  находится слой  $\mu(\alpha)$ -го сорта,  $\eta_{Cn\alpha}^{\mu} = 0$  – в ином случае. В дальнейшем полагаем, что разупорядочения (как по составу, так и по толщине слоев) независимы друг от друга. После применения в соответствии с ПВК (аналогично квазичастичному подходу [3-6]) процедуры конфигурационного усреднения (обозначенной угловыми скобками) получаем следующее выражение для угла вращения плоскости поляризации упругой волны в неидеальной 1D сверхрешетке:

$$\langle \phi(\omega) \rangle = N \left[ \sum_{\alpha=1}^{\sigma} \phi_{\alpha}^{(1)}(\omega) a_{\alpha}^{(1)} + a_{\alpha}^{(1)} \sum_{\mu(\alpha)=1}^{r(\alpha)} \Delta \phi_{\alpha}^{\mu(\alpha)}(\omega) C_{C\alpha}^{\mu(\alpha)} + \phi_{\alpha}^{(1)} \sum_{\nu(\alpha)=1}^{s(\alpha)} \Delta a_{\alpha}^{\nu(\alpha)} C_{T\alpha}^{\nu(\alpha)} + \sum_{\mu(\alpha)=1}^{r(\alpha)} \sum_{\nu(\alpha)=1}^{s(\alpha)} \Delta \phi_{\alpha}^{\mu(\alpha)}(\omega) \Delta a_{\alpha}^{\nu(\alpha)} C_{C\alpha}^{\mu(\alpha)} C_{T\alpha}^{\nu(\alpha)} \right]. \quad (3)$$

$\Delta \phi_{\alpha}^{\mu(\alpha)} = \phi_{\alpha}^{\mu(\alpha)} - \phi_{\alpha}^{(1)}$ ,  $\Delta a_{\alpha}^{\nu(\alpha)} = a_{\alpha}^{\nu(\alpha)} - a_{\alpha}^{(1)}$ .  $C_{C\alpha}^{\mu(\alpha)}$ ,  $C_{T\alpha}^{\nu(\alpha)}$  – концентрации дефектов-слоев, отличных от слоев базового вещества по составу и толщине соответственно. Первое слагаемое в (3) соответствует углу вращения плоскости поляризации акустической волны идеальной 1D-сверхрешетки, составленной из слоев (1)-го сорта (это вещество полагаем базовым). Второе слагаемое обусловлено разупорядочением сверхрешетки по составу – оно обращается в нуль при отсутствии вариации состава. Третье слагаемое отражает разупорядочение по толщине (при его отсутствии это слагаемое обращается в нуль). Последнее слагаемое обусловлено одновременным разупорядочением сверхрешетки и по составу и по толщине слоев. Отсутствие хотя

бы одного из разупорядочений приводит к обращению в нуль четвертого слагаемого (3). Каждое из четырех слагаемых (3) имеет смысл угла вращения, приходящегося на одну элементарную ячейку. Эти углы, в отличие от удельных углов  $\varphi_{na}^{\mu(\alpha), \nu(\alpha)}$  (которые измеряются в единицах град/ед. длины), имеют размерность «градус».

## Результаты и обсуждение

На основе приведенной выше теории рассмотрим конкретную модельную двух-подрешеточную систему, состоящую из слоев парателлурита (первая подрешетка) и слоев  $\alpha$ -кварца – вторая подрешетка, которая варьируется как по составу (с замещением на слои парателлурита, концентрация такого рода дефектов  $C_C$ ), так и по толщине (концентрация таких дефектов  $C_T$ ). Полагаем, что в идеальном случае толщина слоев обеих подрешеток одинаковая. Учтем также, что удельное вращение плоскости поляризации упругой волны  $\varphi_1^{(1)} = \varphi_2^{(2)}$  в направлении акустической оси в слоях парателлурита составляет 913 град/см при 30 МГц, что более чем в 8 000 раз превышает ту же величину в слоях  $\alpha$ -кварца в направлении оси [15], [16], благодаря более сильной анизотропии упругих свойств и меньшей скорости упругих волн в кристалле парателлурита [15] по сравнению с кварцем. Отсюда следует, что в выражении (3)  $\Delta\varphi_1^{(1)} = 0$ ,  $\Delta\varphi_2^{(1)} = 0$ ,  $\Delta\varphi_2^{(2)} = \varphi_2^{(2)} - \varphi_2^{(1)} \approx \varphi_2^{(2)}$ . В результате несложных расчетов получена концентрационная зависимость  $\Phi(C_C, C_T)$  угла вращения плоскости поляризации упругой волны в исследуемой неидеальной 1D сверхрешетке:

$$\Phi(\omega, C_C, C_T) \equiv \langle \varphi(\omega) \rangle / Na_1^{(1)} = \varphi_1^{(1)}(\omega) \left[ 1 + C_C a_2^{(1)} / a_1^{(1)} + C_C C_T \left( a_2^{(2)} / a_1^{(1)} - a_2^{(1)} / a_1^{(1)} \right) \right]. \quad (4)$$

На рис. 1 представлены три варианта поверхностей концентрационной зависимости  $\Phi(C_C, C_T)$  для конкретных значений параметров: при  $a_2^{(2)} / a_1^{(1)} = 1$  для 1-й поверхности  $a_2^{(1)} / a_1^{(1)} = 3$ , для 2-й поверхности  $a_2^{(1)} / a_1^{(1)} = 1$  и для 3-й поверхности  $a_2^{(1)} / a_1^{(1)} = 0,1$ .

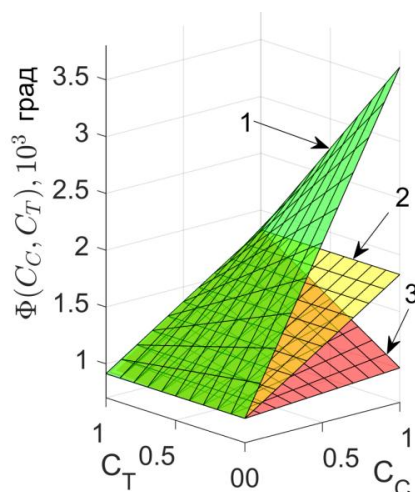


Рисунок 1 – Концентрационная зависимость угла вращения плоскости поляризации  $\Phi(C_C, C_T)$  упругой волны в неидеальной 1D сверхрешетке: при  $a_2^{(2)} / a_1^{(1)} = 1$  первая поверхность для  $a_2^{(1)} / a_1^{(1)} = 3$ , вторая – для  $a_2^{(1)} / a_1^{(1)} = 1$ , третья поверхность – для  $a_2^{(1)} / a_1^{(1)} = 0,1$

Анализ полученной в результате численного моделирования концентрационной функции  $\Phi(C_C, C_T)$  указывает на возможность контролировать угол вращения плоскости поляризации акустической волны в исследуемой слоистой фоновой структуре, варьируя ее состав и/или толщину слоев. В частности, представленные на рис. 1 поверхности  $\Phi(C_C, C_T)$  указывают в целом на рост величины угла вращения с увеличением концентраций  $C_C, C_T$  указанных дефектов структуры. Из выполненных выше расчетов следует, что для конкретных оценок влияния дефектов важен также учет размерных параметров таких, например, как в рассмотренной в данной работе модельной фоновой структуре:  $a_2^{(2)} / a_1^{(1)}$ ,  $a_2^{(1)} / a_1^{(1)}$ ,  $a_2^{(1)} / a_1^{(1)}$ .

## Заключение

В работе исследованы особенности зависимости угла  $\Phi(\omega)$  вращения плоскости поляризации упругой волны в неидеальной 1D сверхрешетке от концентрации структурных дефектов при вариации слоев модельной системы как по составу, так и толщине. Показано, что концентрационное поведение этой величины зависит от соответствующих характеристик  $C_C, C_T$  исследуемой сверхрешетки, поляризации акустических волн, от отношения величин структурных параметров  $a_2^{(2)} / a_1^{(1)}$ ,  $a_2^{(1)} / a_1^{(1)}$ ,  $a_2^{(1)} / a_1^{(1)}$ , которые определяют конкретные условия акустической активности исследуемой фоновой сверхрешетки. Полученные результаты могут оказаться полезными при конструировании акустических композитных материалов, используемых при различных режимах эксплуатации.

## Список литературы

1. Сазонов С. В. Эффект акустической активности для пикосекундных солитоноподобных импульсов [Текст] / С. В. Сазонов // ЖЭТФ. – 2000. – Т. 118, № 1(7). – С. 2035.
2. Шабловский Я. О. Неорганические материалы [Текст] / Шабловский Я. О. – 2002. – Т. 38, № 7. – С. 852–857.
3. Румянцев В. В. Оптическая активность диэлектрических сверхрешеток с дефектами [Текст] / В. В. Румянцев, С. А. Федоров, К. В. Гуменник // Оптика и спектроскопия. – 2011. – Т. 110, № 5. – С. 799–805.
4. Parmenter R. H. Energy Levels of a Disordered Alloy [Текст] / R. H. Parmenter // Phys. Rev. – 1955. – V. 97. – № 3. – P. 587.
5. Займан Дж. Модели беспорядка [Текст] / Займан Дж. – М.: Мир, 1982. – 592 с.
6. Dargan T. G. Critical analysis of the virtual crystal approximation [Текст] / T. G. Dargan, R. B. Capaz, Belita Koiler // Brazilian J. of Phys. – 1997. – V. 27/A. – P. 299–304.
7. Rumyantsev V. V. Light-matter coupling in imperfect quasi-two-dimensional Si/SiO<sub>2</sub> photonic crystal [Текст] / V. V. Rumyantsev, S. A. Fedorov, E. Ya. Shtaerman // Superlattices and Microstructures. – 2010. – V. 47, № 1. – P. 29–33.
8. Rumyantsev V. V. Peculiarities of Band Gap Width Dependence Upon Concentration of Admixtures Randomly Included in 1D Photonic Crystalon [Текст] / V. V. Rumyantsev, S. A. Fedorov, K. V. Gumennyk // Photonic Crystals: Fabrication, Band Structure and Applications / ed. William L. Dahl, NY. Nova Science. – 2011. – ISBN: 978-1-61122-413-9.
9. Ярив А. Оптические волны в кристаллах [Текст] / А. Ярив, П. Юх. – М.: Мир, 1987. – 616 с.
10. Румянцев В. В. Численное моделирование акустических возбуждений в неидеальной 1D сверхрешетке [Текст] / В. В. Румянцев, С. А. Федоров, К. В. Гуменник // Акуст. журн. – 2014. – Т. 60, № 3. – С. 327–331.
11. Косевич А. М. Физическая механика реальных кристаллов [Текст] / Косевич А. М. – К.: Наукова думка, 1981. – 327 с.
12. Сиротин Ю. И. Основы кристаллофизики [Текст] / Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская. – М.: Наука, 1975. – 654 с.

13. Най Дж. Физические свойства кристаллов [Текст] / Най Дж. – М. : Мир, 1967. – 352 с.
14. Romyantsev V. V. Acoustic excitations in a non-ideal one-dimensional superlattice with anisotropic impurity layers [Текст] / V. V. Romyantsev, S. A. Fedorov, K. V. Gumennyk, Yu.A. Paladyan, Yu. D. Zavorotnev // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – V. 1658. – P. 012045.
15. Крячко А. Ф. Акустическая активность в кристалле парателлурита [Текст] / А. Ф. Крячко, А. Р. Бестугин, О. В. Шакин // *Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов*. – 2017. – Т. 4. – С. 12–14.
16. Pine A. S. Linear wave-vector dispersion of the shear-wave phase velocity in a-quartz [Текст] / A. S. Pine // *J. Acoustic Soc. Am.* – 1971. – V. 49. – P. 1026–1029.
17. Галинский М. К. Математическое моделирование структуры электромагнитного пространственно-временного волнового пакета [Текст] / М. К. Галинский, В. В. Румянцев, С. А. Федоров // *Проблемы искусственного интеллекта*. – 2021. – № 1 (20). – С. 37–43.

## References

1. Sazonov S.V. Effekt akusticheskoy aktivnosti dlya pikosekundnykh solitonopodobnykh impul'sov [Effect of acoustic activity for picosecond soliton-like pulses]. *ZHETF [ZhETF]*, 2000, Vol. 118, No. 1 (7), P. 2035.
2. Shablovsky Ya.O. *Neorganicheskiye materialy* [Inorganic materials], 2002, Vol. 38, No. 7, P.852-857.
3. Romyantsev V.V., Fedorov S.A., Gumennyk K.V. Opticheskaya aktivnost' dielektricheskikh sverkhreshetok s defektami [Optical activity of dielectric superlattices with defects]. *Optika i spektroskopiya* [Optics and spectroscopy], 2011, V. 110, № 5, P. 799–805.
4. Parmenter R.H. Energy Levels of a Disordered Alloy. *Phys. Rev.*, 1955, V. 97, no. 3, P. 587.
5. Ziman J.M., *Modeli besporyadka* [Models of disorder] The theoretical physics of homogeneously disordered systems, Cambridge University Press, Cambridge, 1979, 592 c.
6. Dargan T.G., R.B. Capaz, Belita Koiler. Critical analysis of the virtual crystal approximation. *Brazilian J. of Phys.*, 1997, V. 27/A, P. 299-304.
7. Romyantsev V.V., Fedorov S.A., Shtaerman E.Ya. Light-matter coupling in imperfect quasi-two-dimensional Si/SiO<sub>2</sub> photonic crystal. *Superlattices and Microstructures*, 2010, V.47, no. 1, P. 29-33.
8. Romyantsev V.V., Fedorov S.A., Gumennyk K.V. Peculiarities of Band Gap Width Dependence Upon Concentration of Admixtures Randomly Included in 1D Photonic Crystalon // *Photonic Crystals: Fabrication, Band Structure and Applications* / ed. William L. Dahl, NY. Nova Science, 2011. ISBN: 978-1-61122-413-9.
9. Yariv A., Yeh P. *Opticheskiye volny v kristalakh* [Optical waves in crystals], New York, Wiley-Interscience Publication, 1984, 616 c.
10. Romyantsev V.V., Fedorov S.A., Gumennyk K.V. Chislennoye modelirovaniye akusticheskikh vzbuzhdeniy v neideal'noy 1D sverkh-reshetke [Numerical simulation of acoustic excitations in a non-ideal 1D superlattice]. *Akust. Zhurn* [Acoustic. Journal], 2014, V. 60, no. 3, P. 327-331.
11. Kosevich A.M. *Fizicheskaya mekhanika real'nykh kristallov* [Physical mechanics of real crystals] (Kiev: Naukova Dumka; translated into Polish: Wroclaw, Wydawnictwo Uniwersitetu Wroclawskiego, 2000). 1981, p. 327.
12. Sirotnin Yu.I. and Shaskolskaya M.P. *Osnovy kristalofiziki* [Fundamentals of Crystal Physics], Chicago: Imported Publications, 1983, p. 654.
13. Nye J.E. *Fizicheskiye svoystva kristallov* [Physical properties of crystals], Oxford, The Clarindon press, 1957, 352 c.
14. Romyantsev V.V., Fedorov S.A., Gumennyk K.V., Paladyan Yu.A., Zavorotnev Yu.D. Acoustic excitations in a non-ideal one-dimensional superlattice with anisotropic impurity layers. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, V. 1658, P. 012045.
15. Kryachko A.F., Bestugin A.R., Shakin O.V. Akusticheskaya aktivnost' v kristalle paratellurita [Acoustic activity in a paratellurite crystal]. *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov* [Systems of synchronization, formation and processing of signals], 2017, V.4, P. 12-14.
16. Pine A.S. *Linear wave-vector dispersion of the shear-wave phase velocity in a-quartz* // *J. Acoustic Soc. Am.* 1971. V. 49. P. 1026-1029.
17. Galinsky M. K., Romyantsev V. V., Fedorov S. A. Mathematical Modeling of the Structure of an Electromagnetic Space-Time Wave Packet *Problems of Artificial Intelligence* [Problems of Artificial Intelligence], 2021, no. 1(20), pp. 37-43.

## RESUME

*Yu. A. Paladyan, V. V. Rumyantsev, S. A. Fedorov*

*Numerical simulation of the dependence of the specific rotation angle of the polarization plane of an elastic wave in a non-ideal 1d phonon crystal on the concentration of structural defects*

The results obtained earlier by the authors of the study of acoustic excitations in an imperfect 1D superlattice are transferred to similar calculations of the characteristics of the acoustic activity of a phonon crystal of a system of plane-parallel layers with anisotropic impurity layers differing in elastic characteristics.

Numerical modeling.

The expression found in the work for the specific rotation angle of the plane of polarization of an elastic wave in a non-ideal 1D phonon crystal allows numerical modeling of the concentration dependence of the acoustic activity of complex one-dimensional non-ideal superlattices.

In this paper, within the framework of the virtual crystal approximation, mathematical modeling of the dependence of the specific rotation angle of the plane of polarization of an elastic wave in a non-ideal 1D phonon crystal on the concentration of structural defects with variations in the layers of the model system both in composition and thickness is performed.

The obtained results may be useful in the design of acoustic composite materials used in various operating modes.

## РЕЗЮМЕ

*Ю. А. Паладян, В. В. Румянцев, С. А. Федоров*

*Численное моделирование зависимости удельного угла вращения плоскости поляризации упругой волны в неидеальном 1d фононном кристалле от концентрации структурных дефектов*

Полученные авторами ранее результаты исследования акустических возбуждений в несовершенной 1D сверхрешетке перенесены на аналогичные расчеты характеристик акустической активности фононного кристалла - системы плоскопараллельных слоев с анизотропными примесными слоями, отличающимися упругими характеристиками.

Численное моделирование.

Найденное в работе выражение для удельного угла вращения плоскости поляризации упругой волны в неидеальном 1D фононном кристалле позволяет осуществлять численное моделирование концентрационной зависимости акустической активности сложных одномерных неидеальных сверхрешеток.

В работе в рамках приближения виртуального кристалла выполнено математическое моделирование зависимости удельного угла вращения плоскости поляризации упругой волны в неидеальном 1D фононном кристалле от концентрации структурных дефектов при вариации слоев модельной системы как по составу, так и толщине.

Полученные результаты могут оказаться полезными при конструировании акустических композитных материалов, используемых при различных режимах эксплуатации.

Статья поступила в редакцию 16.04.2021.