

УДК 534.232.8

## ПОВЕРХНОСТНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В Z-СРЕЗАХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОНОКРИСТАЛЛОВ ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ СИНГОНИИ

И. В. ЛИНЧЕВСКИЙ<sup>1</sup>, О. Н. ПЕТРИЦЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»,  
Украина, Киев, 03056, пр-т Победы, 37

<sup>2</sup>Государственное предприятие «Киевский научно-исследовательский институт гидроприборов»,  
Украина, Киев, 01035, ул. Василия Сурикова, 3

**Аннотация.** Предложена новая постановка задачи о расчете кинематических и динамических характеристик поверхностных акустических волн в пьезоэлектрических монокристаллах, а также методика ее решения с учетом существования рассеивания электрического поля на поверхности кристалла, не покрытого электродами, и вихревой составляющей электрического поля в общем случае.

На примере Z-среза монокристаллов гексагональной сингонии показана процедура математического описания поверхностных акустических волн в нулевом приближении. Построена система собственных функций и определены собственные числа, однородной граничной задачи для случая плоского деформированного состояния. Полученные общие решения в частном случае изотропии упругих свойств деформируемого твердого тела сводятся к общеизвестным формулировкам для поверхностных волн Рэлея. Показано, что поверхностные акустические волны в Z-срезах монокристаллов ZnO и CdS, подобно волнам Рэлея в изотропном упругом полупространстве, существуют в узкой приповерхностной области, а учет выхода электромагнитного поля за пределы монокристалла, на поверхностях, которые не покрыты электродами и вихревой части электрической составляющей поля позволил выявить тот факт, что вертикальная компонента вектора смещений материальных частиц имеет максимальное значение не на самой поверхности кристалла, а на глубине  $(0,15-0,2)\lambda$ . Аналогичная особенность релеевских волн характерна и для изотропных образцов. Наличие локального экстремума (в пределах 7%) характерно для вертикальной компоненты вектора смещений в приповерхностной области толщиной  $0,25\lambda$ . При погружении вглубь пьезоэлектрика на расстояние больше двух с половиной длин волн уровни смещений материальных частиц убывают более чем на порядок.

**Ключевые слова:** пьезоэлектрик; поверхностная акустическая волна; монокристалл

### ВВЕДЕНИЕ

Устройства на основе поверхностных акустических волн (ПАВ) находят широкое применение в ряде технических приложений, включая электронику и телекоммуникации.

ПАВ используют при построении датчиков физических величин [1, 2]. Использование резонаторов на ПАВ позволяет создавать на их основе датчики химических веществ [3], био-

химические [4] и газовые датчики [5]. Например ПАВ используются для построения датчиков влажности с применением ZnO, покрытого слоем оксида графена толщиной 200 нм [6].

Большой интерес исследователей также вызывают механизмы, ответственные за взаимодействие света и акустических мод в оптических волноводах [7], проблемы фонон-электронного взаимодействия, в том числе и на квантовом уровне [8]. При использовании ПАВ

DOI: [10.20535/S0021347020030048](https://doi.org/10.20535/S0021347020030048)

© И. В. Линчевский, О. Н. Петрицев, 2020

*D. Appl. Phys.*, vol. 52, no. 15, p. 153001, Feb. 2019, doi: [10.1088/1361-6463/AAFD0B](https://doi.org/10.1088/1361-6463/AAFD0B).

2. C. Caliendo and M. Hamidullah, "Pressure sensing with zero group velocity lamb modes in self-supported a-SiC/c-ZnO membranes," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 51, no. 38, p. 385102, Aug. 2018, doi: [10.1088/1361-6463/AAD6F3](https://doi.org/10.1088/1361-6463/AAD6F3).

3. A. Mujahid and F. L. Dickert, "Surface acoustic wave (SAW) for chemical sensing applications of recognition layers," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 12, p. 2716, Nov. 2017, doi: [10.3390/s17122716](https://doi.org/10.3390/s17122716).

4. Y. Zhang, F. Yang, Z. Sun, Y. T. Li, and G. J. Zhang, "A surface acoustic wave biosensor synergizing DNA-mediated: In situ silver nanoparticle growth for a highly specific and signal-amplified nucleic acid assay," *Analyst*, vol. 142, no. 18, pp. 3468–3476, Sep. 2017, doi: [10.1039/c7an00988g](https://doi.org/10.1039/c7an00988g).

5. A. Marcu and C. Viespe, "Surface Acoustic Wave Sensors for Hydrogen and Deuterium Detection," *Sensors*, vol. 17, no. 6, p. 1417, Jun. 2017, doi: [10.3390/s17061417](https://doi.org/10.3390/s17061417).

6. W. Xuan et al., "Fast response and high sensitivity ZnO/glass surface acoustic wave humidity sensors using graphene oxide sensing layer," *Sci. Rep.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–9, Nov. 2014, doi: [10.1038/srep07206](https://doi.org/10.1038/srep07206).

7. A. C. Poveda, D. D. Bühler, A. C. Sáez, P. V Santos, and M. M. de L. Jr, "Semiconductor optical waveguide devices modulated by surface acoustic waves," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 52, no. 25, p. 253001, Apr. 2019, doi: [10.1088/1361-6463/AB1464](https://doi.org/10.1088/1361-6463/AB1464).

8. M. Weiß and H. J. Krenner, "Interfacing quantum emitters with propagating surface acoustic waves," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 51, no. 37, p. 373001, Aug. 2018, doi: [10.1088/1361-6463/AACE3C](https://doi.org/10.1088/1361-6463/AACE3C).

9. E. D. S. Nysten, Y. H. Huo, H. Yu, G. F. Song, A. Rastelli, and H. J. Krenner, "Multi-harmonic quantum dot optomechanics in fused LiNbO<sub>3</sub>-(Al)GaAs hybrids," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 50, no. 43, p. 43LT01, Sep. 2017, doi: [10.1088/1361-6463/AA861A](https://doi.org/10.1088/1361-6463/AA861A).

10. R. Fandan, J. Pedrós, J. Schiefele, A. Boscá, J. Martinez, and F. Calle, "Acoustically-driven surface and hyperbolic plasmon-phonon polaritons in graphene/h-BN heterostructures on piezoelectric substrates," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 51, no. 20, p. 204004, Apr. 2018, doi: [10.1088/1361-6463/AAB8BD](https://doi.org/10.1088/1361-6463/AAB8BD).

11. P. Delsing et al., "The 2019 surface acoustic waves roadmap," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 52, no. 35, p. 353001, Jul. 2019, doi: [10.1088/1361-6463/AB1B04](https://doi.org/10.1088/1361-6463/AB1B04).

12. J. H. Kuypers and A. P. Pisano, "Green's function analysis of lamb wave resonators," in *Proceedings - IEEE Ultrasonics Symposium*, 2008, pp. 1548–1551, doi: [10.1109/ULTSYM.2008.0377](https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2008.0377).

13. V. K. Tewary, "Green's-function method for modeling surface acoustic wave dispersion in anisotropic material systems and determination of material parameters," *Wave Motion*, vol. 40, no. 4, pp.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. C. Caliendo and M. Hamidullah, "Guided acoustic wave sensors for liquid environments," *J. Phys.*

399–412, Oct. 2004, doi: [10.1016/j.wavemoti.2004.02.007](https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2004.02.007).

14. N. Nama, R. Barnkob, Z. Mao, C. J. Kähler, F. Costanzo, and T. J. Huang, “Numerical study of acoustophoretic motion of particles in a PDMS microchannel driven by surface acoustic waves,” *Lab Chip*, vol. 15, no. 12, pp. 2700–2709, Jun. 2015, doi: [10.1039/c5lc00231a](https://doi.org/10.1039/c5lc00231a).

15. T. Wang et al., “Surface Acoustic Waves (SAW)-Based Biosensing for Quantification of Cell Growth in 2D and 3D Cultures,” *Sensors*, vol. 15, no. 12, pp. 32045–32055, Dec. 2015, doi: [10.3390/s151229909](https://doi.org/10.3390/s151229909).

16. S. Padilla, E. Tufekcioglu, and R. Guldiken, “Simulation and verification of polydimethylsiloxane (PDMS) channels on acoustic microfluidic devices,” *Microsyst. Technol.*, vol. 24, no. 8, pp. 3503–3512, Aug. 2018, doi: [10.1007/s00542-018-3760-2](https://doi.org/10.1007/s00542-018-3760-2).

17. K. M. M. Kabir, G. I. Matthews, Y. M. Sabri, S. P. Russo, S. J. Ippolito, and S. K. Bhargava, “Development and experimental verification of a finite element method for accurate analysis of a surface acoustic wave device,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 25, no. 3, p. 035040, Feb. 2016, doi: [10.1088/0964-1726/25/3/035040](https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/3/035040).

18. T. Wang, R. Green, R. Guldiken, J. Wang, S. Mohapatra, and S. S. Mohapatra, “Finite Element Analysis for Surface Acoustic Wave Device Characteristic Properties and Sensitivity,” *Sensors*, vol. 19, no. 8, p. 1749, Apr. 2019, doi: [10.3390/s19081749](https://doi.org/10.3390/s19081749).

19. K. C. Park and J. R. Yoon, “Transmission line matrix modeling for analysis of surface acoustic wave hydrogen sensor,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 50, no. 7 PART 2, p. 07HD06, Jul. 2011, doi: [10.1143/JJAP.50.07HD06](https://doi.org/10.1143/JJAP.50.07HD06).

20. T. Kojima, H. Obara, and K. Shibayama, “Investigation of impulse response for an interdigital surface-acoustic-wave transducer,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 29, no. S1, pp. 125–128, 1990, doi: [10.7567/JJAPS.29S1.125](https://doi.org/10.7567/JJAPS.29S1.125).

21. T. Hoang, “SAW Parameters Analysis and Equivalent Circuit of SAW Device,” in *Acoustic Waves - From Microdevices to Helioseismology*, InTech, 2011.

22. T. Kojima and K. Shibayama, “An analysis of an equivalent circuit model for an interdigital surface-acoustic-wave transducer,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 27, no. S1, pp. 163–165, 1988, doi: [10.7567/JJAPS.27S1.163](https://doi.org/10.7567/JJAPS.27S1.163).

23. И. А. Викторov, *Звуковые поверхностные волны в твердых телах*. Москва: Наука, 1981.

24. I. V. Linchevskiy, “Excitation of Surface Acoustic Waves in a Zsection of Piezoelectric Crystals by the Electric Field of a Long Electrode,” *Int. J. Appl. Phys.*, vol. 6, no. 3, pp. 42–50, 2019, doi: [10.14445/23500301/IJAP-V6I3P108](https://doi.org/10.14445/23500301/IJAP-V6I3P108).

25. В. Т. Гринченко and В. В. Мелешко, *Гармонические колебания и волны в упругих телах*. Київ: Наукова думка, 1981.

Поступила в редакцию 11.10.2019

После доработки 23.02.2020

Принята к публикации 15.03.2020