

УДК 539.3
DOI: 10.7868/S25000640250402

НЕКОТОРЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУР, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ ТОНКИХ ПЛАСТИН LiNbO_3

© 2025 г. А.С. Турчин^{1,2}, В.Б. Широков^{1,2}

Аннотация. Разработана математическая модель возбуждения и распространения акустических волн на поверхности сегнетоэлектрической гетероструктуры, активный элемент которой выполнен из пластины ниобата лития. Особенностью этой гетероструктуры является то, что пластина может представлять собой срез кристалла определенной ориентации. Методами операционного исчисления система дифференциальных уравнений в частных производных приведена к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, решение которой позволяет проводить дисперсионный анализ процесса. Проведено исследование фазовых скоростей распространения волн Рэлея и Лява на поверхности гетероструктуры тонкая пластина ниобата лития – кремний, изготовленной с использованием широко распространенных промышленных срезов X, Y, Z, 41Y, 64Y и 128Y. Фазовая скорость распространения указанных выше волн существенно зависит от ориентации среза кристалла, направления распространения волны, вида волны (продольная или поперечная), а также условий на поверхности гетероструктуры («закрытая» – поверхность металлизирована и заземлена – или «открытая» – нормальная компонента индукции равна нулю). На некоторых направлениях ориентации кристаллофизической оси пластины имеет место существенное влияние вида этих условий на фазовую скорость поверхностной волны, на других направлениях влияние ничтожно.

Ключевые слова: поверхностные акустические волны, волны Рэлея, волны Лява, срезы X, Y, Z, 41Y, 64Y и 128Y монокристалла ниобата лития, гетероструктура LiNbO_3/Si .

CERTAIN ACOUSTIC PROPERTIES OF HETEROSTRUCTURES FABRICATED FROM THIN LiNbO_3 PLATES

A.S. Turchin^{1,2}, V.B. Shirokov^{1,2}

Abstract. A mathematical model has been developed for the excitation and propagation of acoustic waves on the surface of a ferroelectric heterostructure, whose active element consists of a lithium niobate plate. A distinctive feature of this heterostructure is that the plate can be a crystal cut with a specific orientation. Using operational calculus methods, the system of partial differential equations was reduced to a system of ordinary differential equations, enabling dispersion analysis of the process. The study investigated the phase velocities of Rayleigh and Love waves propagating on the surface of a “thin lithium niobate plate – silicon” heterostructure fabricated using widely adopted industrial cuts (X, Y, Z, 41Y, 64Y, and 128Y). The results demonstrate that the phase velocity of these waves significantly depends on the crystal cut orientation, wave propagation direction, wave type (longitudinal or transverse), and surface conditions of the heterostructure (“closed” – metallized and grounded surface or “open” – normal induction component equals zero). For certain orientations of the crystallographic direction of the plate, the surface conditions exhibit a substantial influence on the phase velocity of the surface wave, while for other orientations, the effect is negligible.

Keywords: surface acoustic waves, Rayleigh waves, Love waves, X, Y, Z, 41Y, 64Y, and 128Y cuts of lithium niobate single crystal, LiNbO_3/Si heterostructure.

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: prottei@yandex.ru, shirokov.ssc@gmail.com

² Южный федеральный университет (Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морган Д. 1990. *Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах*. М., Радио и связь: 416 с.
2. Орлов В.С., Бондаренко В.С. 1984. *Фильтры на поверхностных акустических волнах*. М., Радио и связь: 272 с.
3. Mandal D., Banerjee S. 2022. Surface acoustic wave (SAW) sensors: physics, materials, and applications. *Sensors*. 22(3): 820. doi: 10.3390/s22030820
4. Chen G., Li N., Ng J.D., Lin H.-L., Zhou Y., Fu Y.H., Lee L.Y.T., Yu Y., Liu A.-Q., Danner A.J. 2022. Advances in lithium niobate photonics: development status and perspectives. *Advanced Photonics*. 4(3): 034003. doi: 10.1117/1.AP.4.3.034003
5. Murakami S., Watanabe K., Takigawa R. 2023. Investigation of the interface between LiNbO_3 and Si fabricated via room-temperature bonding method using activated Si-nano layer. *Japanese Journal of Applied Physics*. 62(SG): 1041. doi: 10.35848/1347-4065/acc2cb
6. Jia L., Wang L., Chen F. 2021. Ion-cut lithium niobate on insulator technology: recent advances and perspectives. *Applied Physics Reviews*. 8(1): 011307. doi: 10.1063/5.0037771
7. Pastureauud Th., Solal M., Biasse B., Aspar B., Briot J.-B., Daniau W., Steichen W., Lardat R., Laude V., Laens A., Friedt J.-M., Ballandras S. 2007. High-frequency surface acoustic waves excited on thin-oriented LiNbO_3 single-crystal layers transferred onto silicon. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 54(4): 870–876. doi: 10.1109/TUFFC.2007.321
8. Solal M., Pastureauud Th., Ballandras S., Aspar B., Biasse B., Daniau W., Hodé J.M., Calisti S., Laude V. 2002. Oriented lithium niobate layers transferred on 4" (100) silicon wafer for RF SAW devices. In: *2002 IEEE Ultrasonics Symposium, 2002. Proceedings (Munich, Germany, 8–11 October 2002). Volume 1*. Munich, IEEE: 131–134. doi: 10.1109/ULTSYM.2002.1193369
9. Hsu T.-H., Tseng K.-J., Li M.-H. 2020. Large coupling acoustic wave resonators based on $\text{LiNbO}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}$ functional substrate. *IEEE Electron Device Letters*. 41(12): 1825–1828. doi: 10.1109/LED.2020.3030799.
10. Zhang S., Lu R., Zhou H., Link S., Yang Y., Li Z., Huang K., Ou X., Gong S. 2020. Surface acoustic wave devices using lithium niobate on silicon carbide. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 68(9): 3653–3666. doi: 10.1109/TMTT.2020.3006294
11. Wu S., Wu Z., Qian H., Bao F., Xu F., Zou J., Tang G. 2022. A high-performance NS-SAW resonator using 30° YX-lithium niobate. In: *2022 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS) (Paris, France, 24–28 April 2022)*. IEEE: 1–4. doi: 10.1109/EFTF/IFCS54560.2022.9850557

12. Warner A.W., Onoe M., Coquin G.A. 1967. Determination of elastic and piezoelectric constants for crystals in class (3m). *The Journal of the Acoustical Society of America*. 42(6): 1223–1231. doi: 10.1121/1.1910709
13. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. 1987. *Теоретическая физика. Т. VII: Теория упругости*. М., Наука: 248 с.
14. Викторов И.А. 1981. *Звуковые поверхностные волны в твердых телах*. М., Наука: 288 с.
1. Morgan D. 1990. *Ustroystva obrabotki signalov na poverkhnostnykh akusticheskikh volnakh*. [Signal processing devices using surface acoustic waves]. Moscow, Radio i svyaz': 416 p. (In Russian).
2. Orlov V.S., Bondarenko V.S. 1984. *Filtry na poverkhnostnykh akusticheskikh volnakh*. [Surface Acoustic Wave Filters]. Moscow, Radio i svyaz': 272 p. (In Russian).
3. Mandal D., Banerjee S. 2022. Surface acoustic wave (SAW) sensors: physics, materials, and applications. *Sensors*. 22(3): 820. doi: 10.3390/s22030820
4. Chen G., Li N., Ng J.D., Lin H.-L., Zhou Y., Fu Y.H., Lee L.Y.T., Yu Y., Liu A.-Q., Danner A.J. 2022. Advances in lithium niobate photonics: development status and perspectives. *Advanced Photonics*. 4(3): 034003. doi: 10.1117/1.AP.4.3.034003
5. Murakami S., Watanabe K., Takigawa R. 2023. Investigation of the interface between LiNbO₃ and Si fabricated via room-temperature bonding method using activated Si-nano layer. *Japanese Journal of Applied Physics*. 62(SG): 1041. doi: 10.35848/1347-4065/acc2cb
6. Jia L., Wang L., Chen F. 2021. Ion-cut lithium niobate on insulator technology: Recent advances and perspectives. *Applied Physics Reviews*. 8(1): 011307. doi: 10.1063/5.0037771
7. Pastureaud Th., Solal M., Biasse B., Aspar B., Briot J.-B., Daniau W., Steichen W., Lardat R., Laude V., Laens A., Friedt J.-M., Ballandras S. 2007. High-frequency surface acoustic waves excited on thin-oriented LiNbO₃ single-crystal layers transferred onto silicon. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 54(4): 870–876. doi: 10.1109/TUFFC.2007.321
8. Solal M., Pastureaud T., Ballandras S., Aspar B., Biasse B., Daniau W., Hodé J.M., Calisti S., Laude V. 2002. Oriented lithium niobate layers transferred on 4" (100) silicon wafer for RF SAW devices. In: *2002 IEEE Ultrasonics Symposium, 2002. Proceedings (Munich, Germany, 8–11 October 2002). Volume 1*. Munich, IEEE: 131–134. doi: 10.1109/ULTSYM.2002.1193369
9. Hsu T.-H., Tseng K.-J., Li M.-H. 2020. Large coupling acoustic wave resonators based on LiNbO₃/SiO₂/Si functional substrate. *IEEE Electron Device Letters*. 41(12): 1825–1828. doi: 10.1109/LED.2020.3030799
10. Zhang S., Lu R., Zhou H., Link S., Yang Y., Li Z., Huang K., Ou X., Gong S. 2020. Surface acoustic wave devices using lithium niobate on silicon carbide. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 68(9): 3653–3666. doi: 10.1109/TMTT.2020.3006294
11. Wu S., Wu Z., Qian H., Bao F., Xu F., Zou J., Tang G. 2022. A high-performance NS-SAW resonator using 30° YX-lithium niobate. In: *2022 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS) (Paris, France, 24–28 April 2022)*. IEEE: 1–4. doi: 10.1109/EFTF/IFCS54560.2022.9850557
12. Warner A.W., Onoe M., Coquin G.A. 1967. Determination of elastic and piezoelectric constants for crystals in class (3m). *The Journal of the Acoustical Society of America*. 42(6): 1223–1231. doi: 10.1121/1.1910709
13. Landau L.D., Lifshitz E.M. 1987. *Teoreticheskaya fizika. T. VII: Teoriya uprugosti*. [Theoretical physics. Vol. VII: Theory of elasticity]. Moscow, Nauka: 248 p. (In Russian).
14. Viktorov I.A. 1981. *Zvukovy poverkhnostnye volny v tverdykh telakh*. [Sound surface waves in solids]. Moscow, Nauka: 288 p. (In Russian).

REFERENCES

Поступила 29.05.2025

Принята 10.07.2025