


Частотная зависимость групповой скорости поверхностных поляритонов в одноосном кристалле типа вюрцита

И.И. Бородина, В.В. Яцышен 

Волгоградский государственный университет
400062, Россия, г. Волгоград,
Университетский пр., 100

Аннотация – Обоснование. Поверхностные поляритоны привлекают внимание исследователей и инженеров своими уникальными свойствами и перспективными приложениями в области микро- и наноэлектроники. Среди таких применений могут быть устройства типа транзистора или даже лазера на поляритонах, о чем сообщалось в научной литературе. **Цель.** В работе проводится анализ условий возбуждения поверхностных поляритонов в одноосном кристалле типа вюрцита. Проводится анализ частотной зависимости групповой скорости поверхностных поляритонов. **Методы.** Дисперсионное уравнение для поверхностных поляритонов в анизотропном кристалле типа вюрцита находится аналитически путем решения уравнений Максвелла и требования выполнимости граничных условий для экспоненциально убывающих от границы электромагнитных волн. **Результаты.** В качестве объекта анализа выбран кристалл нитрида алюминия AlN. Найдены возможные частоты поверхностных поляритонов, и показано, что всем условиям существования поверхностных поляритонов удовлетворяет только частота $\Omega_1 = 844,84 \text{ см}^{-1}$. Показано, что в области существования поверхностного поляритона наблюдается возрастание как постоянных затухания, так и параметров распространения поверхностных поляритонов: групповая скорость поверхностного поляритона уменьшается с ростом частоты. При достижении частоты значения Ω_1 – частоты поверхностного поляритона – групповая скорость обращается в ноль. **Заключение.** Найденная убывающая частотная зависимость групповой скорости поверхностного поляритона может быть использована в замедляющих устройствах на базе поляритонов.

Ключевые слова – поверхностный поляритон; одноосный кристалл; частота поверхностного поляритона; групповая скорость; параметр затухания поверхностного поляритона; параметр распространения поверхностного поляритона.

Введение

Поверхностные поляритоны привлекают внимание исследователей и инженеров своими уникальными свойствами и перспективными приложениями в области микро- и наноэлектроники. Поверхностные поляритоны представляют собой коллективные возбуждения, представляющие собой смесь электромагнитной волны и механических возбуждений среды – фононов, распространяющихся вдоль границы среды. Замечательным свойством поверхностных поляритонов является наличие запрещенной зоны, в которой поверхностный поляритон не возбуждается.

В ряде работ [1–3] рассмотрены различные применения поверхностных поляритонов для целей микроэлектроники. В работах [4; 5] проведен анализ возбуждения поверхностных поляритонов с отрицательной групповой скоростью. В работе [7] авторы настоящей статьи представляют результаты расчета параметров распространения и затухания для нанокomпозитов, состоящих из диэлектрической матрицы с распределенными в ней наночастицами. В работе [8] представлен новый тип биосенсора поверхностного плазмонного резонанса, основанный на оптическом датчике с

инвертированным градиентным индексом. Отметим работы [9] и [11], в которых авторы анализируют электромагнитные свойства киральных метаматериалов, которые, как и поляритонные среды, проявляют уникальные частотные зависимости электродинамических параметров. В работе [10] представлены результаты расчета угловых спектров отражения света при условии возбуждения поверхностных плазмонов в схеме Кречмана.

В настоящей статье рассматривается задача о возбуждении поверхностных поляритонов в одноосном кристалле типа вюрцита, проводится анализ условий их возбуждения. Особое внимание обращается на расчет групповой скорости поверхностных поляритонов

1. Теоретическое рассмотрение

Рассмотрим условия возбуждения поверхностных поляритонов в одноосном кристалле. На рис. 1 представлена геометрия одноосного кристалла. Оптическая ось кристалла образует угол φ с осью Oy .

Обозначим ϵ_{\parallel} значение тензора диэлектрической проницаемости кристалла вдоль оптической оси в главной системе координат, а ϵ_{\perp} – в перпен-

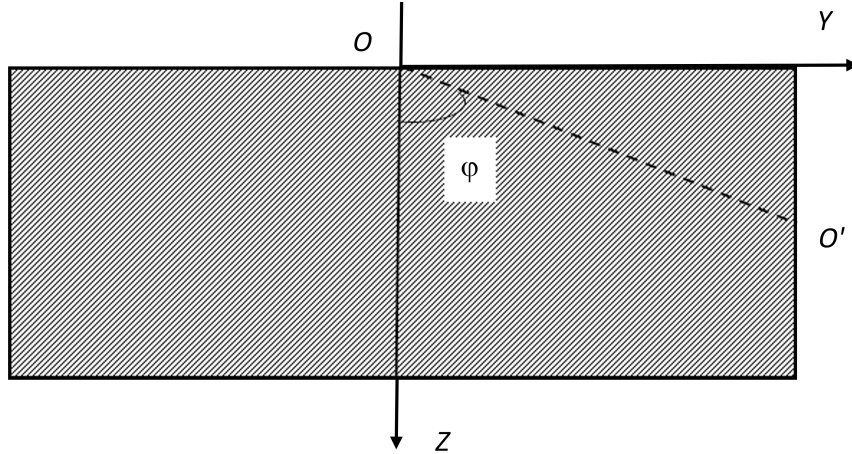


Рис. 1. OO' – оптическая ось кристалла находится под углом φ с осью Oz
Fig. 1. OO' – the optical axis of the crystal is at an angle φ with the Oz axis

дикулярном направлении. Тогда в лабораторной системе координат YOZ компоненты тензора диэлектрической проницаемости будут иметь вид:

$$\varepsilon_{yy} = \varepsilon_{\perp} \cos^2 \varphi + \varepsilon_{\parallel} \sin^2 \varphi; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zy} = (\varepsilon_{\perp} - \varepsilon_{\parallel}) \sin \varphi \cos \varphi;$$

$$\varepsilon_{zz} = \varepsilon_{\parallel} \cos^2 \varphi + \varepsilon_{\perp} \sin^2 \varphi.$$

Область $z < 0$ занимает изотропный диэлектрик с проницаемостью ε , а область $z > 0$ – анизотропный одноосный кристалл типа вюрцита. Проведем анализ возбуждения поверхностных поляритонов для этого случая. Подробные расчеты показывают, что возбуждение распространяющихся поверхностных поляритонов возможно только в случае, когда $\varepsilon_{yz} = 0$ и для р-поляризации. Вектор магнитной напряженности электромагнитного поля для этого случая имеет только x -составляющую и экспоненциально спадающую зависимость при удалении от границ раздела. В области $z < 0$ поле имеет вид

$$H_{1x} = H_1 \exp(k_0 \varkappa_1 z) \exp i(k_0 n_{\parallel} y - \omega t). \quad (2)$$

В области $z > 0$ поле спадает с расстоянием по закону

$$H_{2x} = H_2 \exp(-k_0 \varkappa_2 z) \exp i(k_0 n_{\parallel} y - \omega t). \quad (3)$$

Процедура получения дисперсионного уравнения для поверхностных поляритонов состоит из 3 шагов. Первый, основанный на волновом уравнении, состоит в нахождении параметров затухания в обеих средах. Второй и третий заключаются в требовании выполнения 2 граничных условий – непрерывности на границе раздела тангенциальных составляющих векторов электромагнитного поля H_x и E_y . Подставляя поля (2) и (3) в волновые уравнения для каждой из сред, легко получим

следующие выражения для параметров затухания \varkappa_1 и \varkappa_2 :

$$\varkappa_1 = \sqrt{n_{\parallel}^2 - \varepsilon}; \quad (4)$$

$$\varkappa_2 = \sqrt{\frac{\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{zz}} (n_{\parallel}^2 - \varepsilon_{zz})}. \quad (5)$$

Подчеркнем, что оба коэффициента затухания \varkappa_1 и \varkappa_2 являются положительными величинами.

Условие непрерывности тангенциальных компонент H_x приводит к равенству амплитуд H_1 и H_2 :

$$H_1 = H_2. \quad (6)$$

Второе граничное условие ведет к одному из самых важных для поверхностных поляритонов равенству:

$$\frac{\varkappa_1}{\varepsilon} + \frac{\varkappa_2}{\varepsilon_{yy}} = 0. \quad (7)$$

Поскольку три величины \varkappa_1 , \varkappa_2 и ε являются положительными, то из (7) следует, что для существования поверхностного поляритона компонента тензора диэлектрической проницаемости ε_{yy} должна быть отрицательной

$$\varepsilon_{yy} < 0. \quad (8)$$

Из уравнения (7) получается дисперсионное уравнение для поверхностных поляритонов в случае одноосного кристалла:

$$n_{\parallel}^2 = \frac{\varepsilon \varepsilon_{zz} (\varepsilon_{yy} - \varepsilon)}{\varepsilon_{yy} \varepsilon_{zz} - \varepsilon^2}. \quad (9)$$

Частота поверхностного поляритона находится из условия равенства нулю знаменателя в формуле (9):

$$\varepsilon_{yy} \varepsilon_{zz} - \varepsilon^2 = 0. \quad (10)$$

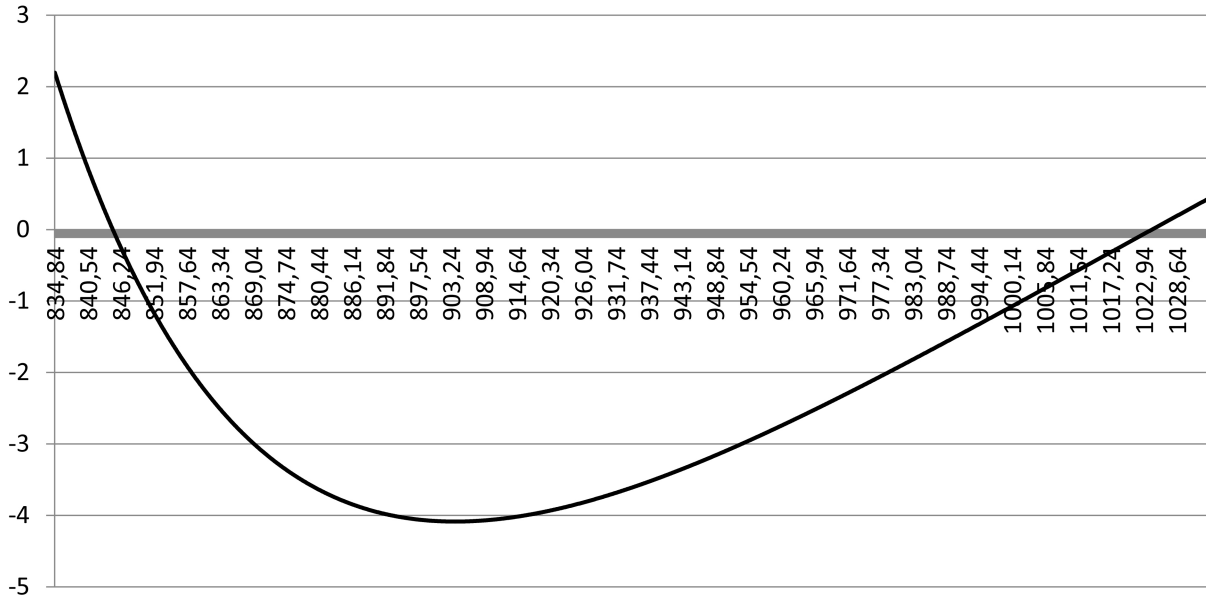


Рис. 2. Частотная зависимость знаменателя в формуле (14). Пересечение кривой с осью абсцисс дает возможные значения частоты поверхностного поляритона
Fig. 2. Frequency dependence of the denominator in formula (14). The intersection of the curve with the x-axis gives possible values of the surface polariton frequency

Далее мы рассмотрим 2 частных случая.

Первый – оптическая ось совпадает с осью z.
 $\Phi = 0^\circ$.

Тогда имеем:

$$\varepsilon_{zz} = \varepsilon_{\parallel}, \quad \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{\perp}. \quad (11)$$

Дисперсионное уравнение для этого случая принимает вид

$$n_{\parallel}^2 = \frac{\varepsilon\varepsilon_{\parallel}(\varepsilon_{\perp} - \varepsilon)}{\varepsilon_{\parallel}\varepsilon_{\perp} - \varepsilon^2}. \quad (12)$$

Второй – оптическая ось совпадает с осью y.
 $\Phi = 90^\circ$.

В этом случае имеем:

$$\varepsilon_{zz} = \varepsilon_{\perp}, \quad \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{\parallel}. \quad (13)$$

Дисперсионное уравнение для этого случая принимает вид

$$n_{\parallel}^2 = \frac{\varepsilon\varepsilon_{\perp}(\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon)}{\varepsilon_{\parallel}\varepsilon_{\perp} - \varepsilon^2}. \quad (14)$$

Заметим, что частота поверхностного поляритона для обоих случаев находится из уравнения

$$\varepsilon_{\parallel}\varepsilon_{\perp} - \varepsilon^2 = 0. \quad (15)$$

2. Решение дисперсионного уравнения для кристалла нитрида алюминия AlN. Обсуждение результатов

В модели Лоренца диэлектрические проницаемости данного кристалла описываются функциями [6]:

$$\varepsilon_{\perp}(\omega) = \varepsilon_{\perp}(\infty) \frac{\omega^2 - \omega_{LO\perp}^2}{\omega^2 - \omega_{TO\perp}^2}; \quad (16)$$

$$\varepsilon_{\parallel}(\omega) = \varepsilon_{\parallel}(\infty) \frac{\omega^2 - \omega_{LO\parallel}^2}{\omega^2 - \omega_{TO\parallel}^2}. \quad (17)$$

Параметры имеют следующие значения: $\varepsilon_{\perp}(\infty) \approx \varepsilon_{\parallel}(\infty) = 5,26$; $\omega_{LO\perp} = 916 \text{ см}^{-1}$, $\omega_{LO\parallel} = 893 \text{ см}^{-1}$, $\omega_{TO\perp} = 673 \text{ см}^{-1}$, $\omega_{TO\parallel} = 660 \text{ см}^{-1}$.

На рис. 2 показана зависимость знаменателя в формуле (14) от частоты. Из этого рисунка видно, что кривая пересекает ось абсцисс в двух точках $\Omega_1 = 844,84 \text{ см}^{-1}$ и $\Omega_2 = 1024,44 \text{ см}^{-1}$. Однако детальный анализ показывает, что вторая точка Ω_2 находится в частотной области, где поверхностный поляритон не существует. Первая же точка отвечает частоте поверхностного поляритона.

На рис. 3 и 4 индекс z отвечает случаю, когда оптическая ось совпадает с осью Oz, а индекс y – когда она совпадает с осью Oy.

На рис. 5 показаны зависимости относительных групповых скоростей поверхностного поляритона от частоты. Здесь V_{egZ} есть групповая скорость в случае, когда оптическая ось направлена по оси Oz, а V_{egY} – вдоль оси Oy.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что с увеличением частоты возрастает значение постоянных затухания и постоянных распространения. Рост этот происходит до момента, когда частота достигает

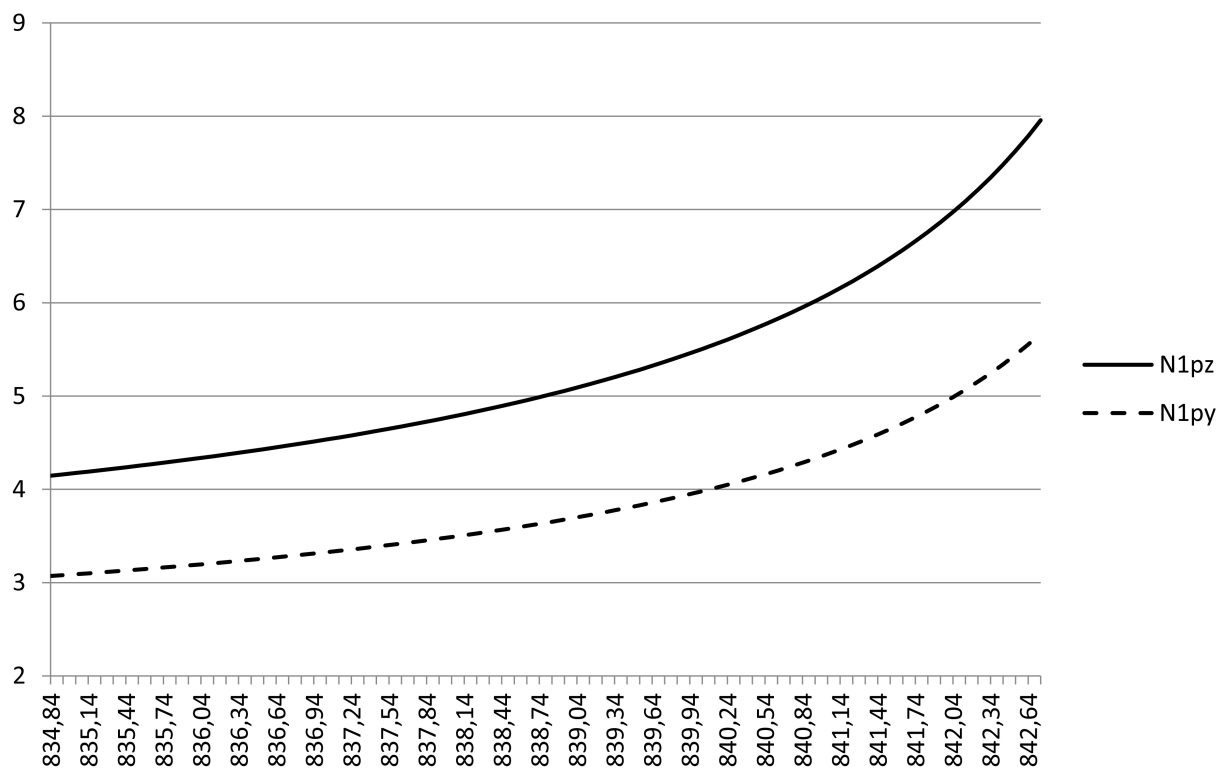


Рис. 3. Частотная зависимость параметров распространения $n_{\parallel,z}$ и $n_{\parallel,y}$ поверхностного поляритона для двух рассмотренных случаев

Fig. 3. Frequency dependence of the propagation $n_{\parallel,z}$ and $n_{\parallel,y}$ surface polariton parameters for the two cases considered

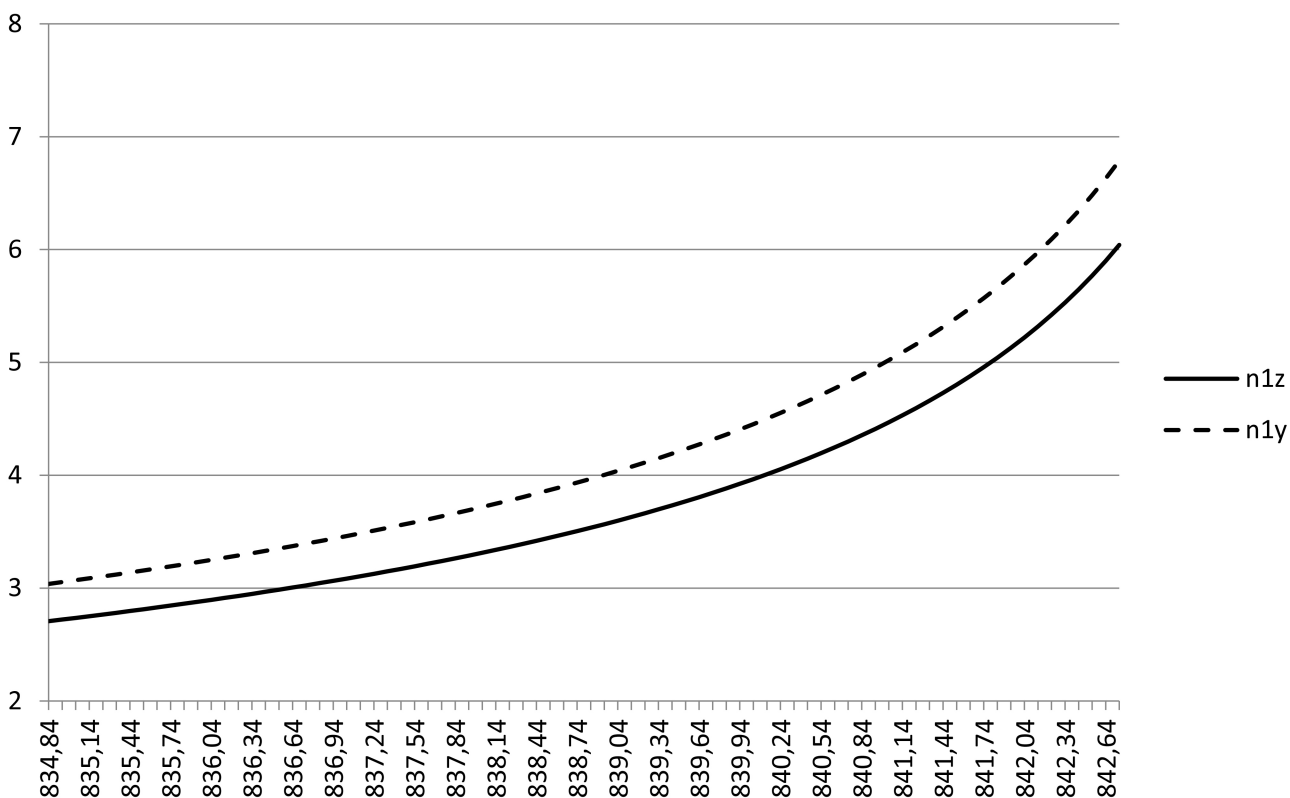


Рис. 4. Зависимость постоянной затухания κ_1 для случаев 1 и 2

Fig. 4. Dependence of the attenuation constant κ_1 for cases 1 and 2

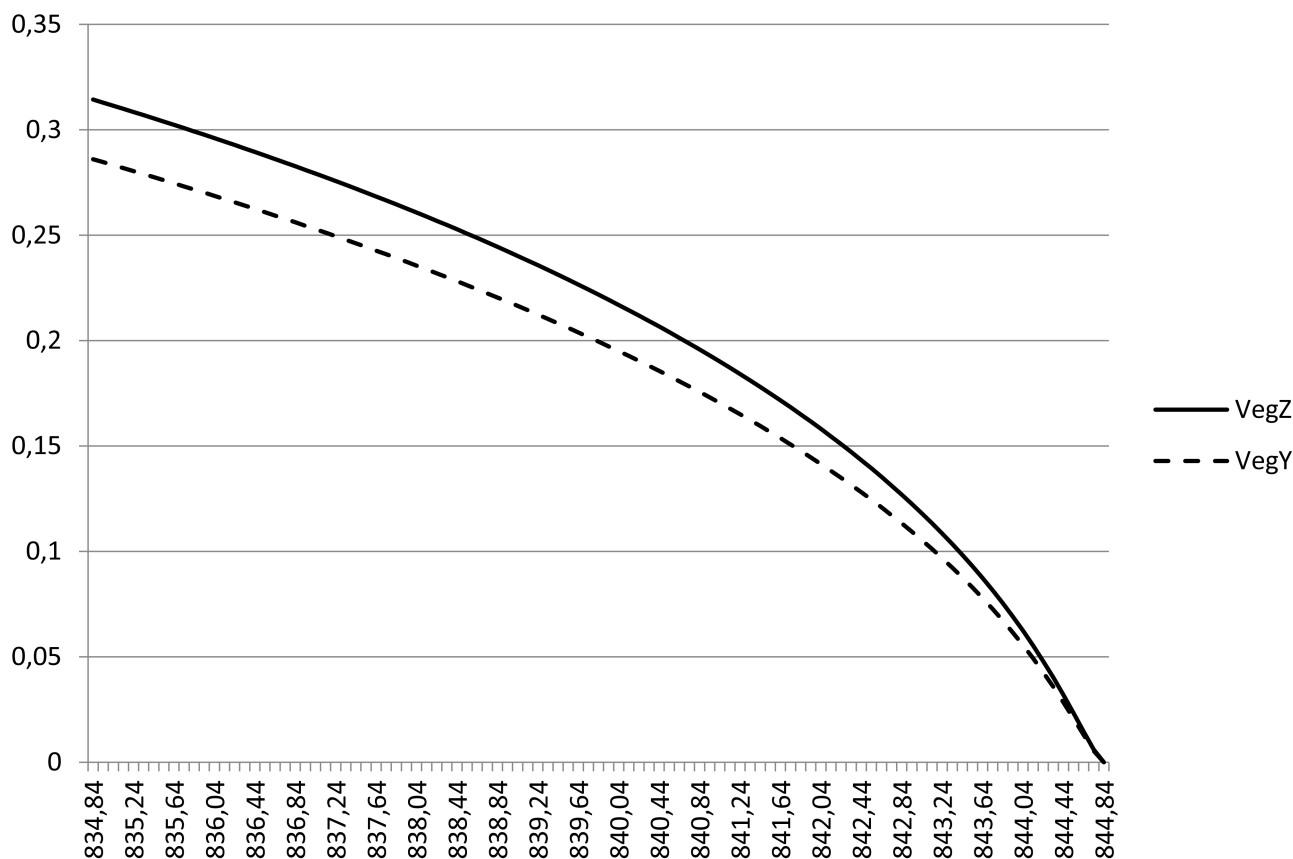


Рис. 5. Зависимость относительных групповых скоростей V_{egZ}/c и V_{egY}/c поверхностного поляритона от частоты, c – скорость света
Fig. 5. Dependence of the relative group velocities V_{egZ}/c and V_{egY}/c of the surface polariton on frequency, c – speed of light

значения частоты поверхностного поляритона. Поверхностные поляритоны в этом случае одноосного анизотропного кристалла могут возбуждаться только в ограниченной частотной области, когда выполняются условия $\epsilon_{yy} < 0$ и (7).

Особый интерес вызывает зависимость групповой скорости поверхностного поляритона от ча-

стоты. Из рис. 5 видно, что с увеличением частоты происходит замедление движения поляритона. При достижении частоты значения Ω_1 – частоты поверхностного поляритона – групповая скорость обращается в ноль. Данное свойство может быть использовано для создания замедляющих систем на основании поверхностных поляритонов.

Список литературы

1. Polarization-controlled tunable directional coupling of surface plasmon polaritons / J. Lin [et al.] // Science. 2013. Vol. 340, no. 6130. P. 331–334. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1233746>
2. Microfluidic plasmonic biosensor for breast cancer antigen detection / J.P. Monteiro [et al.] // Plasmonics. 2016. Vol. 11. P. 45–51. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11468-015-0016-1>
3. Mishra A.K., Mishra S.K., Verma R.K. Graphene and beyond graphene MoS₂: A new window in surface-plasmon-resonance-based fiber optic sensing // J. Phys. Chem. C. 2016. Vol. 120, no. 5. P. 2893–2900. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b08955>
4. Aleksandrov Y.M., Yatsishen V.V. Negative group velocity of surface polaritons in metal foil nanostructure // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2017. Vol. 9, no. 3. P. 03039. DOI: [https://doi.org/10.21272/jnep.9\(3\).03039](https://doi.org/10.21272/jnep.9(3).03039)
5. Aleksandrov Y.M., Yatsishen V.V. Surface polaritons with negative group velocity in structure with transition layer // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2016. Vol. 8, no. 1. P. 01013. DOI: [https://doi.org/10.21272/jnep.8\(1\).01013](https://doi.org/10.21272/jnep.8(1).01013)
6. Строщио М., Дутта М. Фононы в наноструктурах. М.: Физматлит, 2006. 320 с.
7. Potapova I.I., Yatsishen V.V. Propagation and damping constants of surface plasmons on the boundary of nanocomposite // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2174, no. 1. P. 020244. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5134395>
8. Nasirifar R., Danaie M., Dideban A. Surface plasmon resonance biosensor using inverted graded index optical fiber // Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications. 2021. Vol. 44. P. 100916. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2021.100916>
9. Численный анализ отражений электромагнитной волны E-поляризации от неоднородного слоя диэлектрика / Д.Н. Панин [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2019. Т. 22, № 1. С. 10–15. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2019.22.1.10-15>

10. Яцышен В.В. Методы наноплазмоники в угловой спектроскопии наноразмерных биологических объектов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23, № 4. С. 111–115. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.4.111-115>
11. Исследование кирального метаматериала СВЧ-диапазона на основе равномерной совокупности С-образных проводящих элементов / И.Ю. Бучнев [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26, № 1. С. 79–92. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.1.79-92>

Информация об авторах

Бородина Ирина Игоревна, аспирант Института прикладных технологий Волгоградского государственного университета (ВолГУ), г. Волгоград, Россия. В 2018 г. окончила бакалавриат ВолГУ по направлению «Наноинженерия», а в 2020 г. – магистратуру по тому же направлению.

Область научных интересов: исследование электромагнитных свойств плазмонных, поляритонных и нанокompозитных материалов.

E-mail: potapova.irina@volsu.ru

Яцышен Валерий Васильевич, доктор технических наук (специальность 01.04.03 Радиофизика), кандидат физико-математических наук (специальность 01.04.03 Радиофизика, включая квантовую радиофизику), профессор кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения Института приоритетных технологий Волгоградского государственного университета, г. Волгоград, Россия. Окончил физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в 1976 г., а в 1979 г. – аспирантуру физфака МГУ. В 1980 г. в МГУ защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 «Радиофизика, включая квантовую радиофизику». В 1997 г. в Московском государственном институте радиотехники, электроники и информатики (технический университет) защитил докторскую диссертацию по специальности 01.04.03 «Радиофизика» в области технических наук.

Область научных интересов: влияние эффектов неоднородности, нелинейности и пространственной дисперсии на электромагнитные свойства сред и распространение электромагнитных волн в таких средах; электромагнитные свойства плазмонных, поляритонных и нанокompозитных материалов.

E-mail: yatsishen@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4185-2333>

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2024, vol. 27, no. 1, pp. 19–25

DOI [10.18469/1810-3189.2024.27.1.19-25](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2024.27.1.19-25)

UDC 535.33:535.015:538.985

Original Research

Received 9 July 2023

Accepted 11 August 2023

Published 29 March 2024

Frequency dependence of the group velocity of surface polaritons in a single-axle crystal of the Würzite type

Irina I. Borodina, Valeriy V. Yatsishen 

Volgograd State University
100, University Avenue,
Volgograd, 400062, Russia

Abstract – Background. Surface polaritons attract the attention of researchers and engineers for their unique properties and promising applications in the field of micro- and nanoelectronics. Such applications may include devices such as the transistor or even the polariton laser, as reported in the scientific literature. **Aim.** The paper analyzes the conditions for excitation of surface polaritons in a uniaxial crystal of the wurtzite type. The frequency dependence of the group velocity of surface polaritons is analyzed. **Methods.** The dispersion equation for surface polaritons in an anisotropic wurtzite-type crystal is found analytically by solving Maxwell's equations and requiring that the boundary conditions for electromagnetic waves decreasing exponentially from the boundary be satisfied. **Results.** Aluminum nitride crystal AlN was chosen as the object of analysis. Possible frequencies of surface polaritons are found and it is shown that only the frequency $\Omega_1 = 844,84 \text{ cm}^{-1}$ satisfies all the conditions for the existence of surface polaritons. It is shown that in the region where a surface polariton exists, both the damping constants and the propagation parameters of surface polaritons increase. It is shown that the group velocity of a surface polariton decreases with increasing frequency. When the frequency reaches the value of the surface polariton frequency of the value Ω_1 , the group velocity vanishes. **Conclusion.** The found decreasing frequency dependence of the surface polariton group velocity can be used in moderating devices based on polaritons.

Keywords – surface polariton; uniaxial crystal; surface polariton frequency; group velocity; surface polariton damping parameter; surface polariton propagation parameter.

References

1. J. Lin et al., “Polarization-controlled tunable directional coupling of surface plasmon polaritons,” *Science*, vol. 340, no. 6130, pp. 331–334, 2013, doi: <https://doi.org/10.1126/science.1233746>.
2. J. P. Monteiro et al., “Microfluidic plasmonic biosensor for breast cancer antigen detection,” *Plasmonics*, vol. 11, pp. 45–51, 2016, doi: <https://doi.org/10.1007/s11468-015-0016-1>.
3. A. K. Mishra, S. K. Mishra, and R. K. Verma, “Graphene and beyond graphene MoS₂: A new window in surface-plasmon-resonance-based fiber optic sensing,” *J. Phys. Chem. C*, vol. 120, no. 5, pp. 2893–2900, 2016, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b08955>.
4. Y. M. Aleksandrov and V. V. Yatsishen, “Negative group velocity of surface polaritons in metal foil nanostructure,” *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 9, no. 3, p. 03039, 2017, doi: [https://doi.org/10.21272/jnep.9\(3\).03039](https://doi.org/10.21272/jnep.9(3).03039).
5. Y. M. Aleksandrov and V. V. Yatsishen, “Surface polaritons with negative group velocity in structure with transition layer,” *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 8, no. 1, p. 01013, 2016, doi: [https://doi.org/10.21272/jnep.8\(1\).01013](https://doi.org/10.21272/jnep.8(1).01013).
6. M. Strohio and M. Dutta, *Phonons in Nanostructures*. Moscow: Fizmatlit, 2006. (In Russ.)
7. I. I. Potapova and V. V. Yatsishen, “Propagation and damping constants of surface plasmons on the boundary of nanocomposite,” *AIP Conference Proceedings*, vol. 2174, no. 1, p. 020244, 2019, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5134395>.
8. R. Nasirifar, M. Danaie, and A. Dideban, “Surface plasmon resonance biosensor using inverted graded index optical fiber,” *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, vol. 44, p. 100916, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2021.100916>.
9. D. N. Panin et al., “The numerical analysis of E-polarized electromagnetic wave reflections from inhomogeneous dielectric layer,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 10–15, 2019, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2019.22.1.10-15>. (In Russ.)
10. V. V. Yatsishen, “Nanoplasmonic methods in angular spectroscopy of nanoscale biological objects,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 23, no. 4, pp. 111–115, 2020, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.4.111-115>. (In Russ.)
11. I. Yu. Buchnev et al., “Investigation of the microwave chiral metamaterial based on a uniform set of C-shaped conductive inclusions,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 79–92, 2023, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.1.79-92>. (In Russ.)

Information about the Authors

Irina I. Borodina, graduate student at the Institute of Applied Technologies, Volgograd State University (VolSU), Volgograd, Russia. In 2018, she graduated from VolSU with a bachelor’s degree in Nanoengineering, and in 2020, a master’s degree in the same field.
Research interests: research of electromagnetic properties of plasmonic, polariton and nanocomposite materials.
E-mail: potapova.irina@volsu.ru

Valeriy V. Yatsishen, Doctor of Technical Sciences (specialty 01.04.03 Radiophysics), Candidate of Physical and Mathematical Sciences (specialty 01.04.03 Radiophysics, including quantum radiophysics), professor of the Department of Forensic Science and Physical Materials Science of the Institute of Priority Technologies, Volgograd State University, Volgograd, Russia. Graduated from the Faculty of Physics of Moscow State University M.V. Lomonosov in 1976, and in 1979 – postgraduate studies at the Physics Department of Moscow State University. In 1980, at Moscow State University he defended his dissertation for the academic degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences in specialty 01.04.03 «Radiophysics, including quantum radiophysics». In 1997, at the Moscow State Institute of Radio Engineering, Electronics and Informatics (Technical University), he defended his doctoral dissertation in specialty 01.04.03 «Radiophysics» in the field of technical sciences.

Research interests: the influence of the effects of heterogeneity, nonlinearity and spatial dispersion on the electromagnetic properties of media and the propagation of electromagnetic waves in such media; electromagnetic properties of plasmonic, polariton and nanocomposite materials.

E-mail: yatsishen@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4185-2333>