

УДК: 535.3, 537.86

DOI: 10.18384/2310-7251-2023-1-45-59

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ ПЛЁНОК ПРОЗРАЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ С БЛИЗКОЙ К НУЛЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ

**Соломатин А. С.¹, Беляев В. В.^{2,3}, Абдуев А. Х.^{2,3}, Зверев Н. В.², Беляев А. А.²,
Царева Е. В.¹, Кузьмин М. К.², Жачкин В. А.²**

¹ Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева
125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, Российская Федерация

² Государственный университет просвещения
141014, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24,
Российская Федерация

³ Российский университет дружбы народов
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Аннотация.

Цель: исследовать влияние параметров материала прозрачного электрода на основе оксида металла (N – плотность электронов, τ – среднее время рассеяния электронов) на величину частоты, при которой диэлектрическая проницаемость материала ϵ (эпсилон) становится близкой к нулю (так называемые ENZ или НЭ-материалы).

Процедура и методы. С использованием модели Друде выполнены расчёты параметров N , τ и плазменной частоты ω_0 в диапазоне параметров материалов, применяемых в электронике, а также для композитных материалов с разной геометрией включений. Приведены параметры материалов на основе оксида цинка и методов их формирования, при которых может реализоваться описанный режим близкой к нулю диэлектрической проницаемости материала.

Результаты. Для ряда материалов плёнок прозрачных электродов, применяемых в устройствах управления излучением ближнего ИК-диапазона, исследовано влияние параметров материала (N , τ) на величину частоты, при которой диэлектрическая проницаемость материала ϵ (эпсилон) становится близкой к нулю (НЭ-материалы). Описаны технологии материалов, в которых может реализоваться НЭ-режим.

Теоретическая и/или практическая значимость. Описанный режим реализуется для ряда материалов плёнок прозрачных электродов, применяемых в устройствах управления излучением ближнего ИК-диапазона.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, метаматериал, прозрачные электроды, окись цинка, ИК и ТГц-диапазон, концентрация электронов, время рассеяния электронов, ENZ-материалы, устройства управления излучением.

Благодарность. Исследование частично выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-19-00157.

MODELING OF MATERIAL PARAMETERS OF TRANSPARENT ELECTRODE FILMS WITH NEAR-ZERO PERMITTIVITY

A. Solomatin¹, V. Belyaev^{2,3}, A. Abduev^{2,3}, N. Zverev², A. Belyaev², E. Tsareva¹, M. Kuzmin², V. Zhachkin²

¹ *Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia
Miusskaya ploshchad 9, Moscow 125047, Russian Federation*

² *State University of Education*

ulitsa Very Voloshinoy 24, Mytishchi 141014, Moscow Region, Russian Federation

³ *RUDN University*

6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

Abstract.

Aim. We investigate the effect of the material parameters of a transparent metal oxide electrode (N is the electron density, and τ is the average electron scattering time) on the frequency at which the dielectric constant of the material ϵ (epsilon) becomes close to zero (the so-called ENZ materials).

Methodology. Using the Drude model, the parameters N , τ and the plasma frequency ω_0 are calculated in the range of parameters of materials used in electronics, as well as for composite materials with different geometries of inclusions. The parameters of materials based on zinc oxide and methods of their formation are presented, in which the described regime of the dielectric constant of the material close to zero can be realized.

Results. For a number of materials of transparent electrode films used in near-IR radiation control devices, the influence of material parameters (N and τ) on the frequency at which the dielectric constant of the material ϵ (epsilon) becomes close to zero (ENZ materials) is studied. The technologies of materials in which the ENZ mode can be implemented are described.

Research implications. The described mode is implemented for a number of transparent electrode film materials used in near-IR radiation control devices.

Keywords: permittivity, metamaterial, transparent electrodes, zinc oxide, IR and THz range, electron concentration, electron scattering time, ENZ materials, optical radiation control devices.

Acknowledgements. The study was partially supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 22-19-00157).

Введение

В настоящее время ведутся интенсивные исследования и разработки некоторых видов метаматериалов, у которых при частотах падающего излучения, соответствующих ИК-диапазону спектра, вещественные части комплексных диэлектрической проницаемости (Epsilon) или магнитной проницаемости (Mu), или показателя преломления (Index) становятся близкими к нулю (по-английски – Near-Zero, NZ) [1]. В литературе они соответственно называются ENZ, MNZ или NZI-материалами. Обозначим их на русском языке как НЭ (Ноль-Эпсилон), НМ (Ноль-Мю) или НПП (Ноль-Показатель-Преломления) материалы.

В представленной статье рассмотрим некоторые свойства НЭ-материалов, которые обеспечивают указанное свойство близости к нулю величины вещественной части диэлектрической проницаемости ϵ_r в ближнем ИК-диапазоне и новые

функциональные возможности этих материалов для применения в оптической телекоммуникации и других направлениях.

Результаты исследования

В [2] показано, что в плёнках прозрачного электрода оксида индия и олова (ИТО) толщиной порядка длины волны наблюдается режим НЭ или ENZ, характеризующийся величиной диэлектрической проницаемости материала ε (эпсилон), близкой к нулю. Он продемонстрирован около длины волны 1550 нм, что позволяет создавать устройства, работающие в обычном диапазоне длин волн оптических телекоммуникаций, с новыми функциональными возможностями. По мере приближения диэлектрической проницаемости к нулю материал будет проявлять повышенную оптическую нелинейность [2–6]; электромагнитные волны, распространяющиеся внутри него, будут иметь увеличенную длину волны и фазовую скорость [2; 7]. Эти свойства могут применяться в субволновых электрооптических модуляторах, модуляторах с интенсивным взаимодействием света и вещества [8], в глубоких субволновых каналах с ENZ-наполнением для нетрадиционной маршрутизации электромагнитных (ЭМ) волн [7; 9–11], в поглощающих слоях [12]. Условия ENZ продемонстрированы во всём электромагнитном спектре [11; 13–17]. Например, они возникают вблизи плазменной частоты свободных носителей зарядов в материале.

Типичная частота НЭ-режима (ENZ) в диапазоне оптических телекоммуникаций 1550 нм составляет $\omega_0 = 2 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$. В этой полосе частот диэлектрическая проницаемость плёнки описывается моделью Друде, в которой падающий свет взаимодействует со свободными носителями в материале, и их отклик становится резонансным на плазменной частоте $\omega_p = \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty m^*}$, и в то же время $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty m^* (\omega^2 + i\omega\gamma)}$ [18–21].

В соответствии с этой моделью действительная часть диэлектрической проницаемости пересекает нуль на частоте ω_0 , которая определяется выражением $\omega_0^2 = \frac{q^2 N}{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty m^*} - \frac{1}{\tau^2}$, где q – элементарный заряд, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, ε_∞ – диэлектрическая проницаемость материала на высокой частоте, m^* – эффективная масса электрона, N – плотность электронов, $\tau = \gamma^{-1}$ – среднее время рассеяния электронов.

Поскольку элементарный заряд, эффективная масса, вакуумная и высокочастотная диэлектрическая проницаемости примерно постоянны, ω_0 определяется преимущественно электронной плотностью и временем рассеяния.

На рис. 1 показаны взаимозависимости параметров N – плотность электронов, τ – среднее время рассеяния электронов при выполнении НЭ-режима. Диапазоны изменения параметров для расчёта выбраны по имеющимся в литературе данным по концентрации электронов различных материалов, применяемых в электронике: $5 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ в кремнии, германии, арсениде галлия при

300 К [22], 10^{20} – 10^{21} см^{-3} в окиси индия и олова (ITO) и оксиде цинка, допированного алюминием (AZO) [23], – и по времени релаксации: 170 фс в ZnO и AZO [24], 10-40 пс время релаксации электронов в сверх решётке на основе арсенида галлия [24; 25]; 0,2 и 3 пс – время релаксации по полной вероятности рассеяния электрона из состояния с волновым вектором \mathbf{k} , теоретически рассчитанное в [25]; 10-1000 пс в высокоомном кремнии при T от 65 до 120 К и концентрации электронов от 10^{13} до 10^{15} см^{-3} [26], от 6 до 300 фс при рассеянии на различных примесях в серебре, 100 фс в металлах [27; 28].

Полученные результаты справедливы не только для ITO-электродов, но и других прозрачных проводящих плёнок ZnO, IGZO и др.

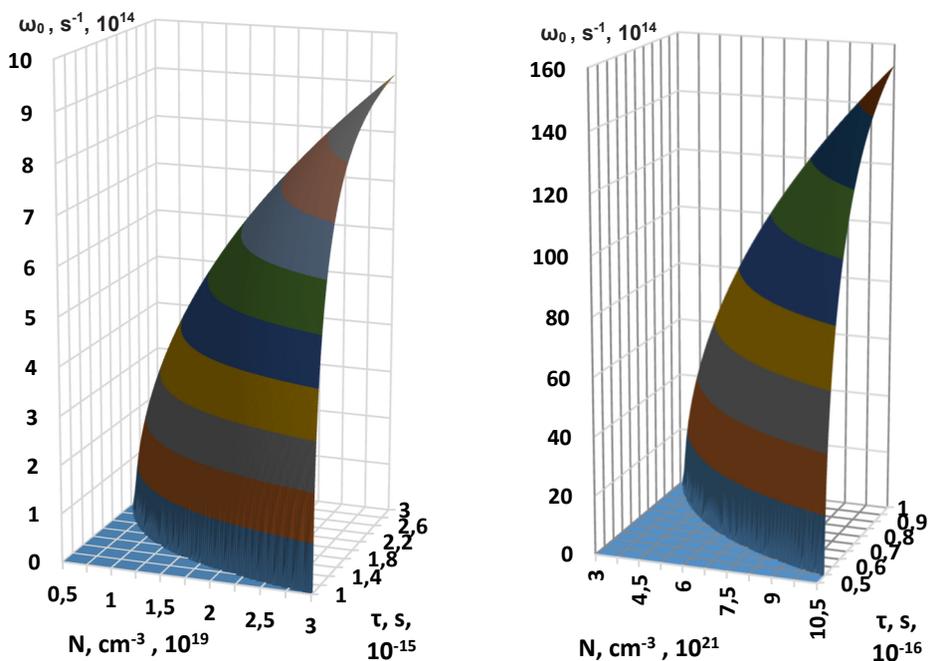


Рис. 1 / Fig. 1. Зависимости частоты перехода в НЭ-режим от параметров материала. Слева для времени τ – время рассеяния электронов порядка 10^{-15} с, справа для времени τ – время рассеяния электронов порядка 10^{-16} с / Dependences of the frequency of transition to the ENZ on the parameters of the material. On the left for time τ is the electron scattering time of about 10^{-15} s, on the right for time τ is the electron scattering time of about 10^{-16} s

Источник: по данным авторов.

При концентрациях порядка 10^{19} см^{-3} и времени рассеяния 10^{-15} с частота ω_0 , при которой реализуется НЭ-режим, составляет от 10^{14} с^{-1} до 10^{15} с^{-1} . При концентрациях порядка 10^{21} см^{-3} и времени рассеяния 10^{-16} с частота ω_0 , при которой реализуется НЭ-режим, от 10^{15} с^{-1} до $1,6 \cdot 10^{16}$ с^{-1} . При увеличении электронной

концентрации, как правило, происходит уменьшение времени рассеяния электронов из-за уменьшения длины свободного пробега.

Увеличивая или уменьшая концентрацию электронов можно добиться сдвига частоты НЭ-режима в оптический или терагерцовый диапазон.

В [23] показано, что наличие НЭ-диапазона в телекоммуникационном спектре (1.3–1.5 мкм) обеспечивается в оксидных материалах потому, что концентрация носителей заряда достигается на уровне 10^{20} – 10^{21} см⁻³ из-за высокой доли донорных атомов In³⁺ в ИТО или Al³⁺ в AZO. Это происходит из-за образования тамбовских плазмонных поляритонов в ближнем ИК-диапазоне для AZO, GZO и ИТО [21]. Можно предположить варьирование частоты ω_0 и в других описанных НЭ-материалах: оксид цинка, допированный галлием (Ga:ZnO, GZO), оксид кадмия, допированный индием (In:CdO, ICO), оксид кадмия, допированный фтором (F:CdO, FCO) и других. При сравнении комплекса физических свойств прозрачных полупроводников показано, что окись цинка обладает наилучшим комплексом свойств для НЭ-диапазона [23].

Кроме того, диэлектрические свойства НЭ-материала и частота ω_0 зависят не только от концентрации и времени рассеяния электронов, но и от структуры материала. В [29] выполнено численное моделирование металл-диэлектрического проволочного композита в ТГц-диапазоне (рис. 2). В таком композите плазменная частота и время рассеяния электронов зависят от размеров как ячейки композита, так и металлического включения, а также от их проводимости.

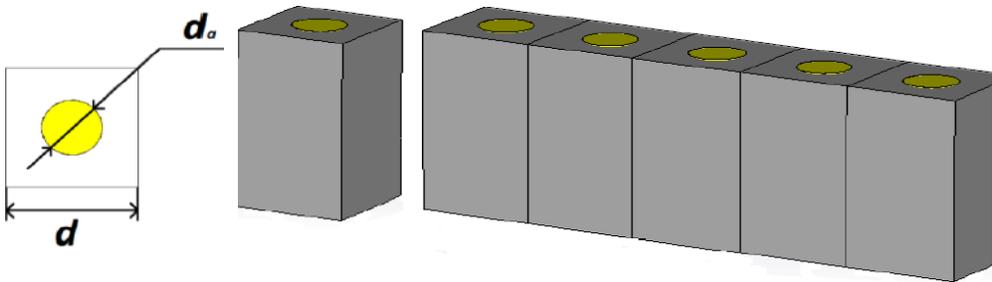


Рис. 2 / Fig. 2. Геометрия смоделированной металл-диэлектрической структуры, состоящей из ячеек с медным цилиндрическим проводником диаметром 300 мкм / Geometry of a simulated metal-dielectric structure consisting of cells with a copper cylindrical conductor with a diameter of 300 micrometers

Источник: [29].

При приближении в теории эффективной среды (ЭМТ) композита на основе материала с диэлектрической проницаемостью ϵ_b с металлическими включениями (проводами) дисперсию можно рассчитать по $\epsilon_{eff} = \epsilon_b - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}$, где $\omega_p = \frac{2\pi c^2}{d^2 \ln \frac{2d}{d_a}}$ плазменная частота и $\gamma = \frac{4\epsilon_0 d^2 \omega_p^2}{\pi d_a^2 \sigma}$, где σ – проводимость металлических включений, d_a – диаметр проводника, c – скорость света в вакууме.

Приведём примеры реальных структур на основе оксида цинка, позволяющих реализовать описываемый НЭ-режим в указанных диапазонах частот, и технологии их достижения.

Существенные изменения в концентрации и подвижности наблюдаются в поликристаллических оксидных слоях ZnO. Это может быть обусловлено рядом факторов. Хорошо известно, что ZnO обнаруживает высокую склонность к одностороннему отклонению от стехиометрии [30]. Так, десорбция кислорода с поверхности межзеренных границ приводит к формированию на поверхности зон высокой концентрации донорных центров.

Легирование слоёв элементами III группы периодической системы (например, Al, Ga) позволяет создавать прозрачные проводящие слои с удельными сопротивлениями вплоть до 10^{-4} Ом*см [31]. Легирование слоёв ZnO приводит, однако, к снижению подвижности электронов в слоях из-за рассеяния электронов на донорных центрах [32].

Таким образом, для структуры легированных и/или нестехиометричных проводящих слоёв на основе ZnO характерно формирование межзеренных вырожденных слоёв.

Следует обратить особое внимание на взаимосвязи условий формирования слоёв, их структуры, оптических и электрических характеристик. Известно, что для магнетронного синтеза слоёв ZnO характерно формирование столбчатых структур. Формирование столбчатых структур, как следует из моделирования методом Монте Карло, связано с относительно невысокими длинами диффузии атомов, осаждаемых в процессе синтеза [33].

Пути увеличения длины миграции атомов на поверхности роста и формирования однородных бесстолбчатых структур были показаны авторами в [34]. При температурах, не превышающих 500°C , слои ZnO:Al были синтезированы при со-распылении мишеней AZO и Zn (рис. 3). Со-распыление цинка приводит к формированию на поверхности роста нестехиометричной легкоплавкой фазы ZnO_{1-x} . При этом длина миграции атомов существенно возрастает и препятствует росту столбчатых структур.

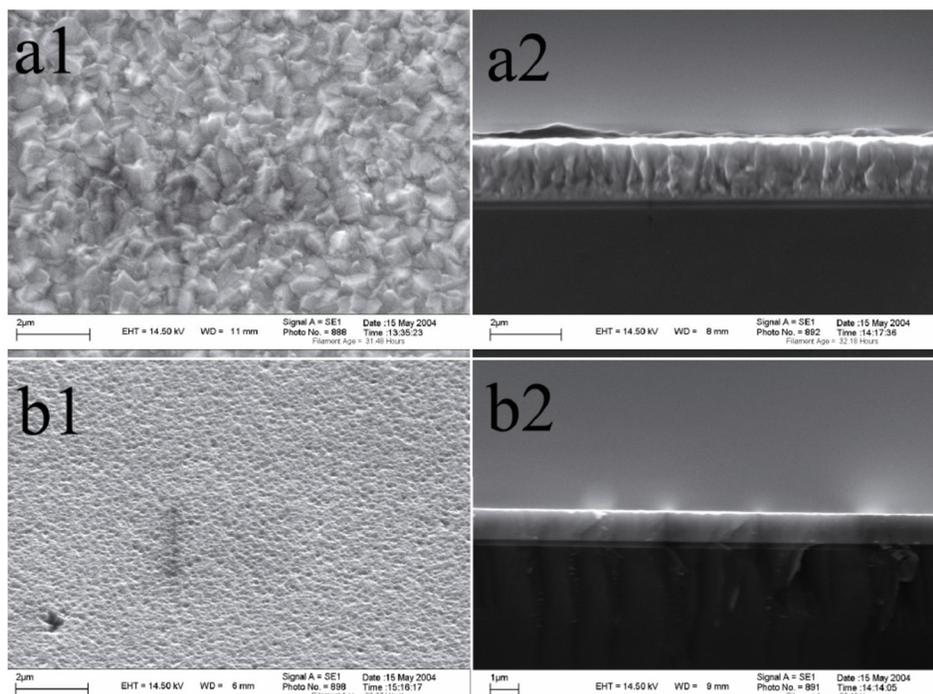


Рис. 3 / Fig. 3. Фотографии поверхностей (1) и поперечных сколов (2) слоёв ZnO, осаждённых при магнетронном со-распылении мишеней ZnO и Zn (a 300°C, b – 500°C) / Photographs of (1) surfaces and (2) transverse cleavages of ZnO layers deposited during magnetron co-sputtering of ZnO and Zn targets (a 300°C, b – 500°C)

Источник: данные авторов.

В оптимизированных прозрачных электродах на основе ZnO величины подвижностей могут составлять в среднем 25–35 Ом*см [35].

Высокие концентрации свободных носителей в слоях на основе оксида цинка могут быть достигнуты в слоях со сложной структурой. Так, в поликристаллических слоях со сложной пространственной локализацией донорных центров (Al и Ga) могут достигаться высокие концентрации и подвижности носителей заряда [36]. Сложные оксидные структуры с модулированным легированием донорами также могут обнаруживать высокие подвижности носителей заряда [37]. Эти структуры на основе аморфных оксидных слоёв создают предпосылки для замены прозрачных электродов ИТО ($\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$). Названные структуры могут обеспечить следующий механизм транспорта носителей: А) электроны инжектируются из металлических слоёв (например, Ag) в оксидные слои (например, ИТО, AZO) без существенного рассеяния носителей на граничных потенциальных барьерах; Б) транспорт носителей осуществляется в слоях оксидов с высокой подвижностью носителей заряда.

Выводы

Для ряда материалов плёнок прозрачных электродов, применяемых в устройствах управления излучением ближнего ИК и ТГц-диапазона, исследовано влияние параметров материала (N – плотность электронов, τ – среднее время рассеяния электронов) на величину частоты, при которой диэлектрическая проницаемость материала ϵ (эпсилон) становится близкой к нулю (так называемые НЭ или ENZ-материалы).

Режим реализуется за счёт образования таммовских плазмонных поляритонов в ближнем ИК или ТГц-диапазоне для тонких плёнок материалов прозрачных электродов на основе окислов металлов.

Показано, как в материалах на основе оксида цинка может быть реализован этот режим за счёт состава и структуры материала, технологии его изготовления.

Статья поступила в редакцию 20.01.2023 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Overview of Theory and Applications of Epsilon-Near-Zero Materials / Silveirinha M. G., Alù A., Edwards B., Engheta N. // URSI General Assembly (Chicago, IL, USA, August 8-16, 2008) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ursi.org/proceedings/procGA08/papers/B01p6.pdf> (дата обращения: 16.12.2022).
2. Property Variation in Wavelength-thick Epsilon-Near-Zero ITO Metafilm for Near IR Photonic Devices / Ni J. H., Sarney W. L., Leff A. C., Cahill J. P., Zhou W. // Scientific Reports. 2020. Vol. 10. P. 713. DOI: 10.1038/s41598-020-57556-z.
3. ITO film stack engineering for low-loss silicon optical modulators / Lotkov E. S., Baburin A. S., Ryzhikov I. A., Sorokina O. S., Ivanov A. I., Zverev A. V., Ryzhkov V. V., Bykov I. V., Baryshev A. V., Panfilov Yu. V., Rodionov I. A. // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Article number: 6321. DOI: 10.1038/s41598-022-09973-5.
4. Role of epsilon-near-zero substrates in the optical response of plasmonic antennas / Kim J., Dutta A., Naik G. V., Giles A. J., Bezares F. J., Ellis C. T., Tischler J. G., Mahmoud A. M., Caglayan H., Glembocki O. J., Kildishev A. V., Caldwell J. D., Boltasseva A., Engheta N. // Optica. 2016. Vol. 3. Iss. 3. P. 339–346. DOI: 10.1364/OP-TICA.3.000339.
5. Boosting optical nonlinearities in epsilon-near-zero plasmonic channels / Argyropoulos C., Chen P.-Y., D’Aguanno G., Engheta N., Alù A. // Physical Review B. 2012. Vol. 85. Iss. 4. Article: 045129. DOI: 10.1103/PhysRevB.85.045129.
6. Alam M. Z., De Leon I., Boyd R. W. Large optical nonlinearity of indium tin oxide in its epsilon-near-zero region // Science. 2016. Vol. 352. Iss. 6287. P. 795–797. DOI: 10.1126/science.aae0330.
7. Engheta N. Pursuing Near-Zero Response // Science. 2013. Vol. 340. Iss. 6130. P. 286–287. DOI: 10.1126/science.1235589.
8. Indium-Tin-Oxide for High-performance Electro-optic Modulation / Ma Z., Li Z., Liu K., Ye C., Sorger V. J. // Nanophotonics. 2015. Vol. 4. Iss. 2. P. 198–213. DOI: 10.1515/nanoph-2015-0006.
9. Silveirinha M., Engheta N. Tunneling of electromagnetic energy through subwavelength channels and bends using epsilon-near-zero materials // Physical Review Letters. 2006. Vol. 97. Iss. 15. Article: 157403. DOI: 10.1103/PHYSREVLETT.97.157403.

10. Silveirinha M. G., Engheta N. Theory of supercoupling, squeezing wave energy, and field confinement in narrow channels and tight bends using epsilon-near-zero metamaterials // *Physical Review B*. 2007. Vol. 76. Iss. 24. Article: 245109. DOI: 10.1103/PhysRevB.76.245109.
11. Experimental Demonstration of Electromagnetic Tunneling Through an Epsilon-Near-Zero Metamaterial at Microwave Frequencies / Liu R., Cheng Q., Hand T., Mock J., Cui T. // *Physical Review Letters*. 2008. Vol. 100. Iss. 2. Article: 023903. DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.023903.
12. Feng S., Halterman K. Coherent perfect absorption in epsilon-near-zero metamaterials // *Physical Review B*. 2012. Vol. 86. Iss. 16. Article: 165103. DOI: 10.1103/PhysRevB.86.165103.
13. Experimental verification of epsilon-near-zero metamaterial coupling and energy squeezing using a microwave waveguide / Edwards B., Alu A., Young M. E., Silveirinha M., Engheta N. // *Physical Review Letters*. 2008. Vol. 100. Iss. 3. Article: 033903. DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.033903.
14. Experimental demonstration of near-infrared epsilon-near-zero multilayer metamaterial slabs / Yang X., Hu C., Deng H., Rosenmann D., Czaplewski D. A., Gao J. // *Optics Express*. 2013. Vol. 21. Iss. 20. P. 23631–23639. DOI: 10.1364/OE.21.023631.
15. Experimental realization of epsilon-near-zero metamaterial slabs with metal-dielectric multilayers / Gao J., Sun L., Deng H., Mathai C. J., Gangopadhyay S., Yang X. // *Applied Physics Letters*. 2013. Vol. 103. Iss. 5. P. 051111. DOI: 10.1063/1.4817678.
16. Searching for better plasmonic materials / West P. R., Ishii S., Naik G. V., Emani N. K., Shalae V. M., Boltasseva A. // *Laser & Photonics Review*. 2010. Vol. 4. Iss. 6. P. 795–808. DOI: 10.1002/lpor.200900055.
17. Boltasseva A., Atwater H. A. Low-Loss Plasmonic Metamaterials // *Science*. 2011. Vol. 331. No. 6015. P. 290–291. DOI: 10.1126/science.1198258.
18. Electro-optical modulation of a silicon waveguide with an epsilon-near-zero material / Vasudev A., Kang J., Park J., Liu X., Brongersma M. // *Optics Express*. 2013. Vol. 21. Iss. 22. P. 26387–26397. DOI: 10.1364/OE.21.026387.
19. Application of IR variable angle spectroscopic ellipsometry to the determination of free carrier concentration depth profiles / Tiwald T. E., Tompson D. W., Woollam J. A., Paulson W., Hance R. // *Thin Solid Films*. 1998. Vol. 313–314. P. 661–666. DOI: 10.1016/S0040-6090(97)00973-5.
20. Kinsey N., Khurgin J. Nonlinear epsilon-near-zero materials explained: opinion // *Optical Materials Express*. 2019. Vol. 9. Iss. 7. P. 2793–2796. DOI: 10.1364/OME.9.002793.
21. Epsilon-near-zero photonics: infinite potentials / Wu J., Xie Z. T., Sha Y., Fu H. Y., Li Q. // *Photonics Research*. 2021. Vol. 9. Iss. 8. P. 1616–1643. DOI: 10.1364/PRJ.427246.
22. Заглубский А. А., Чернова А. П. Статистика носителей заряда и кинетические процессы. СПб.: СПбГУ, 2007. 223 с.
23. Secondo R., Khurgin J., Kinsey N. Absorptive loss and band non-parabolicity as a physical origin of large nonlinearity in epsilon-near-zero materials // *Optical Materials Express*. 2020. Vol. 10. Iss. 7. P. 1545–1560. DOI: 10.1364/OME.394111.
24. Пчелинцев А. Н., Шишин В. А. Время релаксации электронов проводимости в металле // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2003. Т. 9. № 3. С. 464–468.
25. Борисенко С. И. Рассеяние электронов на ионах примеси при низких температурах в сверхрешетке с легированными квантовыми ямами // *Физика и техника полупроводников*. 2003. Т. 37. Вып. 9. С. 1117–1122.

26. Температурная зависимость времени междолинной релаксации в электронном кремнии / Гинтилас Ш. З., Денис В. И., Мартунас З., Шеткус А. П. // Физика и техника полупроводников. 1984. Т. 18. № 2. С. 324–326.
27. Гантмахер В. Ф., Петрашов В. Т. Рассеяние электронов проводимости в чистых металлах // Металлы высокой чистоты / отв. ред. Ч. В. Копецкий. М.: Наука, 1976. С. 31–59.
28. Гантмахер В. Ф., Левинсон И. Б. Рассеяние носителей тока в металлах и полупроводниках. М.: Наука, 1984. 352 с.
29. Litvinov E. A., Vozianova A. V., Khodzitsky M. K. Epsilon-Near-Zero metal-dielectric composite for terahertz frequency range // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1062: IX International conference “Basic Problems of Optics” BPO'2016 (17–21 October 2016, Saint-Petersburg, Russian Federation). P. 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/1062/1/012010.
30. Крёгер Ф. Химия несовершенных кристаллов. М.: Мир, 1969. 654 с.
31. A comprehensive review of ZnO materials and devices / Ozgur U., Alivov Y. I., Liu C., Tekeb A., Reshchikov M. A., Doğanc S., Avrutin V., Cho S.-J., Morkoç H. // Journal of Applied Physics. 2005. Vol. 98. Iss. 4. Article: 041301. DOI: 10.1063/1.1992666.
32. Ellmer K., Mientus R. Carrier Transport in Polycrystalline ITO and ZnO:Al II: The Influence of Grain Barriers and Boundaries // Thin Solid Films. 2008. Vol. 516. Iss. 17. P. 5829–5835. DOI: 10.1016/j.tsf.2007.10.082.
33. Lattice Monte Carlo models of thin film deposition / Gilmer G. H., Huang H., de la Rubia T. D., Torre J. D., Baumann F. H. // Thin Solid Films. 2000. Vol. 365. Iss. 2. P. 189–200. DOI: 10.1016/S0040-6090(99)01057-3.
34. Growth Mechanism of ZnO Layers / Abduev A., Akhmedov A., Asvarov A., Kamilov I., Sulyanov S. // Zinc Oxide – A Material for Micro- and Optoelectronic Applications: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Zinc Oxide as a Material for Micro- and Optoelectronic Applications (St. Petersburg, Russia, from 23 to 25 June 2004) / eds. N. H. Nickel, E. Terukov. Dordrecht: Springer, 2005. P. 15–24 (NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. Vol. 194).
35. Transparent conductive zinc oxide: basics and applications in thin film solar cells / eds. Ellmer K., Klein A., Rech B. Berlin: Springer, 2008. 443 p. (Springer Series in Materials Science (SSMATERIALS). Vol. 104).
36. On the Effect of the Co-Introduction of Al and Ga Impurities on the Electrical Performance of Transparent Conductive ZnO-Based Thin Films / Asvarov A., Abduev A., Akhmedov A., Kanevsky V. // Materials (Basel). 2022. Vol. 15. Iss. 17. P. 5862. DOI: 10.3390/ma15175862.
37. Cohen D. J., Barnett S. A. Predicted electrical properties of modulation-doped ZnO-based transparent conducting oxides // Journal of Applied Physics. 2005. Vol. 98. Iss. 5. P. 053705. DOI: 10.1063/1.2035898.

REFERENCES

1. Silveirinha M. G., Alù A., Edwards B., Engheta N. Overview of Theory and Applications of Epsilon-Near-Zero Materials. In: *URSI General Assembly (Chicago, IL, USA, August 8-16, 2008)*. Available at: <https://www.ursi.org/proceedings/procGA08/papers/B01p6.pdf> (accessed: 16.12.2022).

2. Ni J. H., Sarney W. L., Leff A. C., Cahill J. P., Zhou W. Property Variation in Wavelength-thick Epsilon-Near-Zero ITO Metafilm for Near-IR Photonic Devices. In: *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, pp. 713. DOI: 10.1038/s41598-020-57556-z.
3. Lotkov E. S., Baburin A. S., Ryzhikov I. A., Sorokina O. S., Ivanov A. I., Zverev A. V., Ryzhkov V. V., Bykov I. V., Baryshev A. V., Panfilov Yu. V., Rodionov I. A. ITO film stack engineering for low-loss silicon optical modulators. In: *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, article number: 6321. DOI: 10.1038/s41598-022-09973-5.
4. Kim J., Dutta A., Naik G. V., Giles A. J., Bezares F. J., Ellis C. T., Tischler J. G., Mahmoud A. M., Caglayan H., Glembocki O. J., Kildishev A. V., Caldwell J. D., Boltas-seva A., Engheta N. Role of epsilon-near-zero substrates in the optical response of plasmonic antennas. In: *Optica*, 2016, vol. 3, iss. 3, pp. 339–346. DOI: 10.1364/OP-TICA.3.000339.
5. Argyropoulos C., Chen P.-Y., D'Aguanno G., Engheta N., Alú A. Boosting optical nonlinearities in epsilon-near-zero plasmonic channels. In: *Physical Review B*, 2012, vol. 85, iss. 4, article: 045129. DOI: 10.1103/PhysRevB.85.045129.
6. Alam M. Z., De Leon I., Boyd R. W. Large optical nonlinearity of indium tin oxide in its epsilon-near-zero region. In: *Science*, 2016, vol. 352, iss. 6287, pp. 795–797. DOI: 10.1126/science.aae0330.
7. Engheta N. Pursuing Near-Zero Response. In: *Science*, 2013, vol. 340, iss. 6130, pp. 286–287. DOI: 10.1126/science.1235589.
8. Ma Z., Li Z., Liu K., Ye C., Sorger V. J. Indium-Tin-Oxide for High-performance Electro-optic Modulation. In: *Nanophotonics*, 2015, vol. 4, iss. 2, pp. 198–213. DOI: 10.1515/nanoph-2015-0006.
9. Silveirinha M., Engheta N. Tunneling of electromagnetic energy through subwavelength channels and bends using epsilon-near-zero materials. In: *Physical Review Letters*, 2006, vol. 97, iss. 15, article: 157403. DOI: 10.1103/PHYSREVLETT.97.157403.
10. Silveirinha M. G., Engheta N. Theory of supercoupling, squeezing wave energy, and field confinement in narrow channels and tight bends using epsilon-near-zero metamaterials. In: *Physical Review B*, 2007, vol. 76, iss. 24, article: 245109. DOI: 10.1103/PhysRevB.76.245109.
11. Liu R., Cheng Q., Hand T., Mock J., Cui T. Experimental Demonstration of Electromagnetic Tunneling Through an Epsilon-Near-Zero Metamaterial at Microwave Frequencies. In: *Physical Review Letters*, 2008, vol. 100, iss. 2, article: 023903. DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.023903.
12. Feng S., Halterman K. Coherent perfect absorption in epsilon-near-zero metamaterials. In: *Physical Review B*, 2012, vol. 86, iss. 16, article: 165103. DOI: 10.1103/PhysRevB.86.165103.
13. Edwards B., Alu A., Young M. E., Silveirinha M., Engheta N. Experimental verification of epsilon-near-zero metamaterial coupling and energy squeezing using a microwave waveguide. In: *Physical Review Letters*, 2008, vol. 100, iss. 3, article: 033903. DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.033903.
14. Yang X., Hu C., Deng H., Rosenmann D., Czaplewski D. A., Gao J. Experimental demonstration of near-infrared epsilon-near-zero multilayer metamaterial slabs. In: *Optics Express*, 2013, vol. 21, iss. 20, pp. 23631–23639. DOI: 10.1364/OE.21.023631.
15. Gao J., Sun L., Deng H., Mathai C. J., Gangopadhyay S., Yang X. Experimental realization of epsilon-near-zero metamaterial slabs with metal-dielectric multilayers. In: *Applied Physics Letters*, 2013, vol. 103, iss. 5, pp. 051111. DOI: 10.1063/1.4817678.

16. West P. R., Ishii S., Naik G. V., Emani N. K., Shalaev V. M., Boltasseva A. Searching for better plasmonic materials. In: *Laser & Photonics Review*, 2010, vol. 4, iss. 6, pp. 795–808. DOI: 10.1002/lpor.200900055.
17. Boltasseva A., Atwater H. A. Low-Loss Plasmonic Metamaterials. In: *Science*, 2011, vol. 331, no. 6015, pp. 290–291. DOI: 10.1126/science.1198258.
18. Vasudev A., Kang J., Park J., Liu X., Brongersma M. Electro-optical modulation of a silicon waveguide with an epsilon-near-zero material. In: *Optics Express*, 2013, vol. 21, iss. 22, pp. 26387–26397. DOI: 10.1364/OE.21.026387.
19. Tiwald T. E., Tompson D. W., Woollam J. A., Paulson W., Hance R. Application of IR variable angle spectroscopic ellipsometry to the determination of free carrier concentration depth profiles. In: *Thin Solid Films*, 1998, vol. 313–314, pp. 661–666. DOI: 10.1016/S0040-6090(97)00973-5.
20. Kinsey N., Khurgin J. Nonlinear epsilon-near-zero materials explained: opinion. In: *Optical Materials Express*, 2019, vol. 9, iss. 7, pp. 2793–2796. DOI: 10.1364/OME.9.002793.
21. Wu J., Xie Z. T., Sha Y., Fu H. Y., Li Q. Epsilon-near-zero photonics: infinite potentials. In: *Photonics Research*, 2021, vol. 9, iss. 8, pp. 1616–1643. DOI: 10.1364/PRJ.427246.
22. Zagrubskiy A. A., Chernova A. P. *Statistika nositelei zaryada i kineticheskie protsessy* [Statistics of Charge Carriers and Kinetic Processes]. St. Petersburg, St. Petersburg State University Publ., 2007. 223 p.
23. Secondo R., Khurgin J., Kinsey N. Absorptive loss and band non-parabolicity as a physical origin of large nonlinearity in epsilon-near-zero materials. In: *Optical Materials Express*, 2020, vol. 10, iss. 7, pp. 1545–1560. DOI: 10.1364/OME.394111.
24. Pchelintsev A. N., Shishin V. A. [Relaxation time of electron conduction in metal]. In: *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Transactions of the Tambov State Technical University], 2003, vol. 9, no. 3, pp. 464–468.
25. Borisenko S. I. [Scattering of electrons at impurity ions at low temperatures in a superlattice with doped quantum wells]. In: *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductors], 2003, vol. 37, no. 9, pp. 1117–1122.
26. Gintilas Sh. Z., Denis V. I., Martunas Z., Shetkus A. P. [Temperature dependence of intervalley relaxation time in electronic silicon]. In: *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductors], 1984, vol. 18, no 2, pp. 324–326.
27. Gantmakher V. F., Petrashov V. T. [Scattering of conduction electrons in pure metals]. In: *Metally vysokoi chistoty* [Metals of high purity]. Moscow, Nauka Publ., 1976, pp. 31–59.
28. Gantmakher V. F., Levinson I. B. *Rasseyaniye nositelei toka v metallakh i poluprovodnikakh* [Scattering of current carriers in metals and semiconductors]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 352 p.
29. Litvinov E. A., Vozianova A. V., Khodzitsky M. K. Epsilon-Near-Zero metal-dielectric composite for terahertz frequency range. In: *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1062: IX International conference “Basic Problems of Optics” BPO'2016 (17–21 October 2016, Saint-Petersburg, Russian Federation), pp. 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/1062/1/012010.
30. Kroger F. *Khimiya nesovershennykh kristallov* [Chemistry of imperfect crystals]. Moscow, Mir Publ., 654 p.
31. Ozgur U., Alivov Y. I., Liu C., Tekeb A., Reshchikov M. A., Doğanc S., Avrutin V., Cho S.-J., Morkoçd H. A comprehensive review of ZnO materials and devices. In: *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 98, iss. 4, article: 041301. DOI: 10.1063/1.1992666.

32. Ellmer K., Mientus R. Carrier Transport in Polycrystalline ITO and ZnO:Al II: The Influence of Grain Barriers and Boundaries. In: *Thin Solid Films*, 2008, vol. 516, iss. 17, pp. 5829–5835. DOI: 10.1016/j.tsf.2007.10.082.
33. Gilmer G. H., Huang H., de la Rubia T. D., Torre J. D., Baumann F. H. Lattice Monte Carlo models of thin film deposition. In: *Thin Solid Films*, 2000, vol. 365, iss. 2, pp. 189–200. DOI: 10.1016/S0040-6090(99)01057-3.
34. Abduev A., Akhmedov A., Asvarov A., Kamilov I., Sulyanov S. Growth Mechanism of ZnO Layers. In: Nickel N. H., Terukov E., eds. *Zinc Oxide – A Material for Micro- and Optoelectronic Applications: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Zinc Oxide as a Material for Micro- and Optoelectronic Applications (St. Petersburg, Russia, from 23 to 25 June 2004)*. Dordrecht, Springer, 2005, pp. 15–24 (NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. Vol. 194).
35. Ellmer K., Klein A., Rech B., eds. *Transparent conductive zinc oxide: basics and applications in thin film solar cells*. Berlin, Springer, 2008. 443 p. (Springer Series in Materials Science (SSMATERIALS), vol. 104).
36. Asvarov A., Abduev A., Akhmedov A., Kanevsky V. On the Effect of the Co-Introduction of Al and Ga Impurities on the Electrical Performance of Transparent Conductive ZnO-Based Thin Films. In: *Materials (Basel)*, 2022, vol. 15, iss. 17, pp. 5862. DOI: 10.3390/ma15175862.
37. Cohen D. J., Barnett S. A. Predicted electrical properties of modulation-doped ZnO-based transparent conducting oxides. In: *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 98, iss. 5, pp. 053705. DOI: 10.1063/1.2035898.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соломатин Алексей Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры информатики и компьютерного проектирования Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева;
e-mail: Sotrudnica_UNC@mail.ru;

Беляев Виктор Васильевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела организации научных исследований и международных связей управления развития науки, профессор кафедры фундаментальной физики и нанотехнологии Государственного университета просвещения; профессор кафедры нанотехнологий и микросистемной техники Инженерной академии Российского университета дружбы народов;

e-mail: vic_belyaev@mail.ru;

Абдуев Аслан Хаджимуратович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры нанотехнологий и микросистемной техники Инженерной академии Российского университета дружбы народов; старший научный сотрудник учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии Государственного университета просвещения;

e-mail: a_abduev@mail.ru;

Зверев Николай Витальевич – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры высшей алгебры, математического анализа и геометрии Государственного университета просвещения;

e-mail: zverev_nv@mail.ru;

Беляев Андрей Андреевич – инженер учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии Государственного университета просвещения;
e-mail: aa.belyaev@mgou.ru;

Царева Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и компьютерного проектирования Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева;
e-mail: Sotrudnica_UNC@mail.ru;

Кузьмин Михаил Кузьмич – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры фундаментальной физики и нанотехнологии Государственного университета просвещения;
e-mail: m.kuzmin48@yandex.ru;

Жачкин Владимир Арефьевич – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры фундаментальной физики и нанотехнологии Государственного университета просвещения;
e-mail: v_zhachkin@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey S. Solomatin – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Department of Informatics and Computer Design, Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia;
e-mail: Sotrudnica_UNC@mail.ru;

Victor V. Belyaev – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Leading Researcher, Department of Organization of Scientific Research and International Relations of the Department of Science Development, Prof., Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, State University of Education; Senior Researcher, Engineering Academy, RUDN University (People's Friendship University of Russia);
e-mail: vic_belyaev@mail.ru;

Aslan Kh. Abduev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering, Engineering Academy, RUDN University (People's Friendship University of Russia);
e-mail: a_abduev@mail.ru;

Nikolay V. Zverev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Higher Algebra, Mathematical Analysis and Geometry, State University of Education;
e-mail: zverev_nv@mail.ru;

Andrey A. Belyaev – Engineer, Educational and Scientific Laboratory of Theoretical and Applied Nanotechnology, State University of Education;
e-mail: aa.belyaev@mgou.ru;

Elena V. Tsareva – Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Department of Informatics and Computer Design, Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia;
e-mail: Sotrudnica_UNC@mail.ru;

Mikhail K. Kuzmin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, State University of Education;
e-mail: m.kuzmin48@yandex.ru;

Vladimir A. Zhachkin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, State University of Education;
e-mail: v_zhachkin@mail.ru.

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Моделирование параметров материалов плёнок прозрачных электродов с близкой к нулю диэлектрической проницаемостью / Соломатин А. С., Беляев В. В., Абдуев А. Х., Зверев Н. В., Беляев А. А., Царева Е. В., Кузьмин М. К., Жачкин В. А. // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2023. № 1. С. 45–59.

DOI: 10.18384/2310-7251-2023-1-45-59.

FOR CITATION

Solomatin A. S., Belyaev V. V., Abduev A. Kh., Zverev N. V., Belyaev A. A., Tsareva E. V., Kuzmin M. M., Zhachkin V. A. Modeling of material parameters of transparent electrode films with near-zero permittivity. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2023, no. 1, pp. 45–59.

DOI: 10.18384/2310-7251-2023-1-45-59.