

УДК 681.586.5

**И.Д. Медведев**

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

## **ОПТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ФОТОННОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ДВУМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ В СОСТОЯНИИ ИСКЛЮЧИТЕЛЬНОЙ ТОЧКИ**

Диэлектрическая нанофотоника использует материалы с высоким показателем преломления для манипулирования светом на наноуровне с минимальными потерями энергии, обеспечивая сильный электрический и магнитный резонанс. Такая способность делает полностью диэлектрические структуры идеальными для целого ряда передовых фотонных приложений: от ультратонких линз до сенсоров. В данной работе мы изучаем мультипольный отклик полностью диэлектрических метаповерхностей вблизи исключительной точки (ИТ) – спектральной сингулярности в неэрмитовых системах, где происходит слияние собственных мод системы. Численное моделирование показывает, что в ИТ резонанс метаповерхности расщепляется со значительным вкладом магнитных дипольных (MD) и электрических квадрупольных (EQ) мод. Эти результаты расширяют наше понимание ИТ в физике метаповерхностей и укрепляют потенциал этой геометрии для приложений в фотонных устройствах.

**Ключевые слова:** неэрмитовы структуры, полностью диэлектрическая метаповерхность, мультипольная декомпозиция, сечение рассеяния, исключительная точка, диэлектрическая нанофотоника.

**I.D. Medvedev**

Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russian Federation

## **ON THE OPTICAL RESPONSE OF ALL-DIELECTRIC METASURFACE IN THE EXCEPTIONAL POINT**

All-dielectric nanophotonics leverages high-refractive-index dielectric materials to manipulate light at the nanoscale with minimal energy loss, offering strong electric and magnetic resonances. These properties make all-dielectric structures ideal for a range of advanced photonic applications, from ultra-thin lenses to sensors. In this study, we explore the multipole response of all-dielectric metasurfaces when operating near an exceptional point (EP), a singularity in non-Hermitian systems where eigenmodes coalesce. Numerical simulations reveal that at the EP, the metasurface's resonance splits, with significant contributions from magnetic dipole (MD) and electric quadrupole (EQ) modes. These findings enhance our understanding of EPs in metasurface physics and highlight the potential of this geometry for applications in photonic devices.

**Keywords:** Non-Hermitian structures, All-Dielectric metasurface, Exceptional Point, Multipole Decomposition, Scattering cross-section, Dielectric nanophotonics.

## **Введение**

Полностью диэлектрическая нанофотоника, быстро развивающаяся область фотоники, фокусируется на манипулировании и управлении светом в наномасштабе с помощью диэлектрических материалов с высоким показателем преломления. В отличие от своих плазмонных аналогов, использующих металлы при построении структур и, как следствие, имеющих значительные омические потери [1], полностью диэлектрические структуры минимизируют рассеивание энергии, обеспечивая при этом сильный электрический и магнитный резонанс [2]. Эти резонансы позволяют реализовать различные оптические явления, такие как резонанс Фано [3], связанные состояния в континууме (VICs) [4] и направленное рассеяние [5]. Способность управлять этими эффектами на наноуровне привела к созданию новых устройств для различных применений – от ультратонких линз и голограмм до сенсоров и нелинейной оптики [6–9]. Эта область вызывает значительный интерес благодаря своему потенциалу сочетать работу с малыми потерями, компактностью и универсальностью, необходимыми для интеграции в фотонные системы следующего поколения.

В последние годы полностью диэлектрические метаповерхности стали мощной платформой для манипулирования электромагнитным излучением. Такие структуры, характеризующиеся субволновыми характеристиками и высокоиндексными материалами, открыли новые возможности в фотонике и позволят реализовать разные эффекты, такие как управление лучом, контроль поляризации, спектральная фильтрация и другие. Особенно интересным аспектом метаповерхностей является их поведение в окрестности исключительных точек (ИТ) [7–9] – сингулярностей в пространстве геометрических параметров неэрмитовых систем, в которых сливаются две или более собственные моды. Исключительные точки известны своими уникальными свойствами, такими как повышенная чувствительность к небольшому изменению параметров окружающей, что делает их привлекательными для фотонных приложений.

В данной работе рассматривается мультипольный оптический отклик [10] полностью диэлектрических метаповерхностей вблизи исключительной точки. С помощью численного моделирования демонстрируется, что отклик метаповерхности изменяется вблизи ИТ, что открывает потенциальные возможности для применения в сенсорике, манипулировании светом, а также в фотонных устройствах.

Результаты этой работы способствуют более глубокому пониманию роли исключительных точек в физике метаповерхности, предлагая подход к разработке фотонных компонентов следующего поколения, которые используют уникальные свойства ИТ для повышения производительности и функциональности.

### **Оптический отклик метаповерхности в исключительной точке**

В этой работе мы концентрируемся на оптическом отклике периодической, полностью диэлектрической системы, находящихся в двух принципиально разных состояниях. Данный подход позволяет понять вклад эффекта исключительной точки в отклик системы.

На рисунке иллюстрируется общий мультипольный отклик полностью диэлектрической метаповерхности с нарушением симметрии в плоскости. Исследуемая система изображена на рисунках *а* и *б*, где изменяемым параметром является угол раскрытия между параллелепипедами, как показано на рисунке, *б*. Основные результаты, численно рассчитанные с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics, представлены на рисунках *в* и *г*, где показан мультипольный оптический отклик системы.

Для достижения исключительной точки в полностью диэлектрической метаповерхности был использован метод нарушения симметрии только в плоскости. Исследованная структура представляет из себя периодическую двумерную диэлектрическую поверхность в полубесконечном пустом пространстве с показателем преломления  $n = 1$ , элементарный элемент которой состоит из двух кремниевых параллелепипедов с линейными размерами  $L_1 = 304$  нм,  $L_2 = 100$  нм,  $L_3 = 240$  нм, расположенных на полубесконечной стеклянной подложке. При этом расстояние между их границами фиксировано и составляет  $d = 70$  нм (см. рисунок, *а*, *б*).

Изменяя угол раскрытия между двумя параллелепипедами в элементарной ячейке метаповерхности, нарушается внутривоскостная симметрия, что приводит к спариванию двух собственных мод. Это взаимодействие позволяет проявиться в структуре эффекту исключительной точки (ИТ), как показано на рисунок, *г*. Примечательно, что эта геометрия обладает экспериментальным потенциалом благодаря простому контролю параметров системы.

Бесконечность внешней среды и подложки имитировались при помощи расположения сверху и снизу расчетной области идеально согласованных слоев (PML). Для моделирования периодических структур в модели были наложены соответствующие периодические граничные условия. Система возбуждалась плоской монохроматической, нормально падающей волной. Для осуществления такого падения над системой в модели была определена система периодических портов.

При численном моделировании использовались экспериментальные данные показателя преломления описанных материалов структуры, учитывая их зависимость от частоты возбуждающего излучения плоской монохроматической волной.

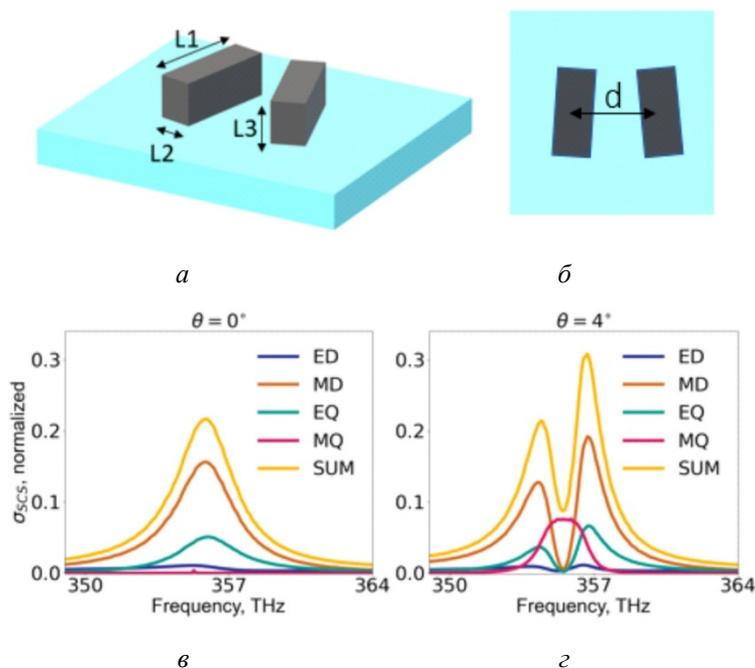


Рис. Мультипольный отклик метаповерхности: *a–б* – элементарный домен исследуемой системы ( $L_1 = 304$  нм,  $L_2 = 100$  нм,  $L_3 = 240$  нм) в перспективе (*a*) и в виде сверху (*б*); *в–г* – мультипольная декомпозиция исследуемого изолированного домена в случаях ИТ (*в*) и не ИТ (*г*)

Как видно из рисунка, *г*, в исключительной точке начальный резонанс расщепляется на два со значительным вкладом магнитного диполя (MD) и электрического квадруполь (EQ). Иными словами, нарушенная симметрия приводит к усилению вклада отмеченных мультиполей. Эти две мультипольные моды начинают «сцепляться» и формировать новый

резонансный пик, что является признаком эффекта исключительной точки. Стоит также отметить, что влияние магнитного квадруполья (MQ) в этом случае не связано со связанными модами MD и EQ.

Геометрическое управление оптическим откликом через угол раскрытия подчеркивает гибкость исследуемой метаповерхности и её потенциал в экспериментальных и фотонных приложениях. Возможность настройки резонансных частот и усиления определённых мод за счет управления симметрией открывает перспективы для создания активных оптических устройств, таких как фильтры, сенсоры и резонаторы с высокой добротностью.

Исключительные точки благодаря своим уникальным физическим свойствам могут обеспечить повышенную чувствительность к изменениям окружающих условий, что также полезно для сенсорных применений.

### **Выводы**

В данной работе исследован мультипольный оптический отклик полностью диэлектрической метаповерхности с нарушением симметрии в плоскости в исключительной точке. Полученные нами результаты способствуют более глубокому пониманию физических механизмов, лежащих в основе возникновения исключительных точек.

Кроме того, эта геометрия демонстрирует значительный потенциал для использования в сенсорах и других фотонных устройствах, поскольку она обеспечивает гибкий экспериментальный контроль над параметрами конструкции.

### **Список литературы**

1. Nano-opto-mechanical effects in plasmonic waveguides / A.S. Shalin, P. Ginzburg, P.A. Belov, Y.S. Kivshar, A.V. Zayats // *Laser Photon Rev.* – 2014. – Vol. 8. – P. 131–136.
2. Magnetic octupole response of dielectric quadrumers / P.D. Terekhov, A.B. Evlyukhin, D. Redka, V.S. Volkov, A.S. Shalin, A. Karabchevsky // *Laser Photon Rev.* – 2020. – Vol. 14.
3. Miroshnichenko, A.E. Fano resonances in nanoscale structures / A.E. Miroshnichenko, S. Flach, Y.S. Kivshar // *Rev. Mod. Phys.* – 2010. – Vol. 82. – P. 2257–2298.
4. Topological nature of optical bound states in the continuum / B. Zhen, C.W. Hsu, L. Lu, A.D. Stone, M. Soljačić // *Phys. Rev. Lett.* – 2014. – Vol. 113. – P. 257401.

5. Special scattering regimes for conical all-dielectric nanoparticles / A.V. Kuznetsov, A. Canós Valero, H.K. Shamkhi, P. Terekhov, X. Ni, V. Bobrovs, M.V. Rybin, A.S. Shalin // *Sci Rep.* – Vol. 202, № 12. – P. 21904.
6. Kuznetsov, A.V. Methods for dynamics control of the optical properties of single high-index all-dielectric nanoparticles located on substrates with 2D materials. Lecture notes in networks and systems / A.V. Kuznetsov, I.D. Medvedev, V. Bobrovs // Springer. – 2024. – Vol. 4. – P. 339–343.
7. Medvedev, I.D. Exceptional points in all-dielectric structure with only in-plane symmetry breaking. Lecture notes in networks and systems / I.D. Medvedev, A.V. Kuznetsov, V. Bobrovs // Springer. – 2024. – Vol. 4. – P. 184–188.
8. Bianisotropic exceptional points in an isolated dielectric nanoparticle / A. Canós Valero, V. Bobrovs, T. Weiss, L. Gao, A.S. Shalin, Y. Kivshar // *Phys Rev Res.* – 2024. – Vol. 6. – P. 013053.
9. Wiersig, J. Review of exceptional point-based sensors / J. Wiersig // *Photonics Res.* – 2020. – Vol. 8. – P. 1457.
10. Alae, R. An electromagnetic multipole expansion beyond the long-wavelength approximation / R. Alae, C. Rockstuhl, I. Fernandez-Corbaton // *Optics Communications.* – 2018. – Vol. 407. – P. 17–21.

## References

1. Shalin A.S., Ginzburg P., Belov P.A., Kivshar Y.S., Zayats A.V. Nano-opto-mechanical effects in plasmonic waveguides. *Laser Photon Rev*, 2014, vol. 8, pp. 131-136.
2. Terekhov P.D., Evlyukhin A.B., Redka D., Volkov V.S., Shalin A.S., Karabchevsky A. Magnetic octupole response of dielectric quadrumers. *Laser Photon Rev*, 2020, vol. 14.
3. Miroshnichenko A.E., Flach S., Kivshar Y.S. Fano resonances in nanoscale structures. *Rev. Mod. Phys.*, 2010, vol. 82, pp. 2257-2298.
4. Zhen B., Hsu C.W., Lu L., Stone A.D., Soljačić M. Topological nature of optical bound states in the continuum. *Phys. Rev. Lett.*, 2014, vol. 113, p. 257401.
5. Kuznetsov A.V., Canós Valero A., Shamkhi H.K., Terekhov P., Ni X., Bobrovs V., Rybin M.V., Shalin A.S. Special scattering regimes for conical all-dielectric nanoparticles. *Sci Rep*, vol. 202, no. 12, p. 21904.
6. Kuznetsov A.V., Medvedev I.D., Bobrovs V. Methods for dynamics control of the optical properties of single high-index all-dielectric nanoparticles located on substrates with 2D materials. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, 2024, vol. 4, pp. 339-343.
7. Medvedev I.D., Kuznetsov A.V., Bobrovs V. Exceptional points in all-dielectric structure with only in-plane symmetry breaking. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, 2024, vol. 4, pp. 184-188.

8. Canós Valero A., Bobrovs V., Weiss T., Gao L., Shalin A.S., Kivshar Y. Bianisotropic exceptional points in an isolated dielectric nanoparticle. *Phys. Rev. Res.*, 2024, vol. 6, p. 013053.

9. Wiersig J. Review of exceptional point-based sensors. *Photonics Res.*, 2020, vol. 8, p. 1457.

10. Alaei R., Rockstuhl C., Fernandez-Corbaton I. An electromagnetic multipole expansion beyond the long-wavelength approximation. *Optics Communications*, 2018, vol. 407, pp. 17-21.

#### Сведения об авторе

**МЕДВЕДЕВ И.Д.**

e-mail: [ilia.dmit.medvedev@gmail.com](mailto:ilia.dmit.medvedev@gmail.com)

Студент Московского физико-технического института, техник Международной лаборатории контролируемых оптических наноструктур Московского физико-технического института, г. Москва

#### About the author

**I.D. MEDVEDEV**

e-mail: [ilia.dmit.medvedev@gmail.com](mailto:ilia.dmit.medvedev@gmail.com)

Student of Moscow Institute of Physics and Technology, Technician, International Laboratory of Tunable Optical Nanostructures, Moscow

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-72-00037.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов** равноценный.

**Получена:** 10.10.2024

**Одобрена:** 14.10.2024

**Принята к публикации:** 15.10.2024

**Financing.** This work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-72-00037.

**Conflict of Interest.** The author declare no conflict of interest.

**The authors contribution is 100 %.**

**Received:** 10/10/2024

**Approved:** 14/10/2024

**Accepted for publication:** 15/10/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Медведев, И.Д. Оптический отклик фотонной периодической двумерной структуры в состоянии исключительной точки / И.Д. Медведев // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 4. – С. 28–34.

Please cite this article in English as: Medvedev I.D. On the Optical response of All-Dielectric Metasurface in the Exceptional Point. *Applied photonics*, 2024, no. 4, pp. 28-34.