

УДК 681.586.5

И.Д. Медведев

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

**ОБ ЭФФЕКТЕ ИСКЛЮЧИТЕЛЬНЫХ ТОЧЕК
В ПОЛНОСТЬЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ**

Полностью диэлектрические неэрмитовы структуры позволяют получать уникальные эффекты, одним из которых является появление исключительных точек (ИТ) в спектре собственных значений системы. Фундаментальным результатом такого эффекта является то, что структура в состоянии ИТ чувствительна к небольшим изменениям параметров окружающей среды, например показателя преломления, что можно широко использовать в сенсорах, оптических усилителях, лазерных гироскопах и других областях. В данной работе исследована исключительная точка в системе, состоящей из двух кремниевых параллелепипедов на стеклянной подложке с изменяющимся углом раскрытия между ними, причем данный эффект получен нарушением симметрии метаповерхности только в плоскости. Кроме того, была изучена зависимость оптического отклика системы от небольшого изменения ее геометрических параметров. Основное преимущество нашего подхода заключается в упрощенном способе экспериментального контроля ИТ. Как следствие, результаты данной работы имеют потенциал значительно упростить процесс производства фотонных устройств с разнообразными функциями.

Ключевые слова: неэрмитовы структуры, полностью диэлектрическая метаповерхность, исключительная точка, диэлектрическая нанопотоника.

I.D. Medvedev

Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russian Federation

**ON THE EXCEPTIONAL POINTS EFFECT
IN ALL-DIELECTRIC METASURFACE**

All-dielectric non-Hermitian structures make it possible to obtain unique effect like the appearance of the exceptional points (EP). A system at EP is sensitive to a small perturbation of refractive index, which can be widely used in different ways, such as EP-based sensors, optical amplifiers, laser gyroscopes and other fields. In this study, we investigate an exceptional point in two-rectangle system with varying opening angle which can be defined as a structure with only in-plane symmetry breaking. Furthermore, the effect dependence of geometry parameters has been studied. The main advantage of our geometric approach is the simplified way to experimental control an EP. Consequently, this effect has the potential to significantly simplify the manufacturing process of photonic devices with diverse functionalities.

Keywords: Non-Hermitian structures, All-Dielectric metasurface, Exceptional Point, Dielectric nanophotonics.

Введение

В настоящее время существует значительный интерес к исследованию оптических свойств полностью диэлектрических систем. Эти системы предоставляют новые возможности для проектирования различных устройств и совершенствования уже существующих технологий. За счёт своих характеристик, таких как низкие потери и высокая эффективность, эти структуры способствуют развитию наноантенн [1], нанолазеров [2], сенсоров [3], метаматериалов [4], метаповерхностей [5] и других приложений [6].

Неэрмитовы системы заслуживают особого внимания из-за их способности порождать спектральные сингулярности, при которых как собственные значения, так и собственные векторы этих структур совпадают. Этот эффект также известен в литературе как исключительная точка (ИТ) [7–9]. Основной особенностью этого явления является резкое увеличение чувствительности системы к малым изменениям характеристик окружающей среды, например показатель преломления [9]. Это предоставляет ряд значимых преимуществ при проектировании различных датчиков, лазерных гироскопов и оптических усилителей.

Для достижения исключительной точки может быть использована одиночная частица несферической формы или структура с нарушением симметрии. В последнее время было проведено множество исследований различных геометрических структур для наблюдения и контроля ИТ [7, 8]. Однако иногда трудно получить возможность легкого контроля ИТ в структуре со сложной геометрией в эксперименте.

В данной работе мы предлагаем новый подход к проектированию метаповерхностей для исследования исключительных точек. В работе реализована геометрия структуры, элементарный домен которой состоит из двух кремниевых параллелепипедов на стеклянной подложке с изменяющимся углом раскрытия между ними. Одним из значимых плюсов предлагаемого подхода является упрощенный экспериментальный подход к проектированию, наблюдению и контролю ИТ. Также в данной работе мы демонстрируем оптический отклик метаповерхности, построенной с помощью описанного элементарного домена, а также изучаем влияние малых возмущений геометрических параметров такой системы.

Исключительная точка в метаповерхности

Эффект появления исключительной точки в изолированной наночастице был подробно изучен ранее [8]. Кроме того, в указанной работе была предложена математическая модель решения задачи на поиск собственных значений в геометрии усеченного конуса. Нам было интересно распространить этот подход на предлагаемую геометрию метаповерхности только с потерями (рисунок). Одним из наиболее заметных преимуществ этой структуры является более доступная экспериментальная фабрикация.

Рисунок демонстрирует эффект исключительной точки в полностью диэлектрической неэрмитовой периодической двумерной структуре, элементарная ячейка которой состоит из двух кремниевых параллелепипедов на стеклянной подложке. Такой эффект возможен в данной системе ввиду нарушения симметрии в плоскости.

Изучена была предложенная структура путем численного расчета *ab initio* в программном пакете COMSOL Multiphysics в домене «Волновая оптика». Для достижения экспериментально наблюдаемых результатов были использованы реальные зависимости показателей преломления от длины волны всех использованных материалов (кристаллического кремния, стекла).

Элементарная ячейка изучаемой метаповерхности показана на рисунке, *a*. Два кремниевых параллелепипеда с линейными размерами $L_1 = 304$ нм, $L_2 = 100$ нм, $L_3 = 240$ нм расположены на расстоянии $d = 70$ нм между их границами под небольшим углом раскрытия между ними. Они помещены на полубесконечную стеклянную подложку. Варьируемым параметром системы является угол раскрытия ($\theta \in [0^\circ, 20^\circ]$) между параллелепипедами. Еще раз отметим, что данная система периодическая и представляет из себя бесконечную двумерную поверхность, составленную из описанных выше элементов.

На рисунке, *b* показано численно рассчитанное мультипольное разложение сечения рассеяния элементарной ячейки (*a*) с фиксированным углом, при котором достигается исключительная точка. Данный результат был получен с использованием *finite difference time domain* (FDTD) – метода, который реализован в программном пакете ANSYS Lumerical. Исходя из анализа мультипольного разложения, заключаем, что искомый эффект должен проявляться вблизи длины волны 850 нм.

Численно рассчитанный спектр отражения метаповерхности изображен на рисунке, *в*. Кроме того, спектр отражения с возмущенными геометрическими параметрами метаповерхности показан на рисунке, *г*.

Можно также отметить, что на рисунке, *в* наблюдается особое резонансное отражение вблизи длины волны 850 нм. Это означает, что система, действительно, была настроена в состояние исключительной точки, и, кроме того, существует некоторая значимая чувствительность к изменению геометрических параметров, поскольку на рисунке, *г* резонансное отражение имеет меньшую добротность по сравнению с отражением системы с исходными параметрами.

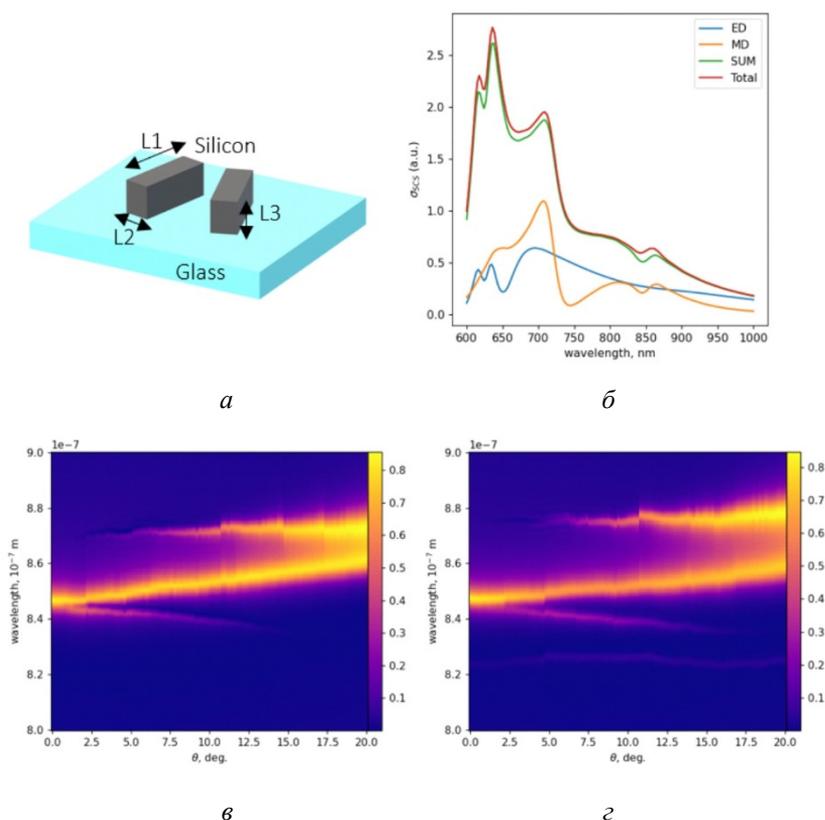


Рис. Исключительная точка в диэлектрической метаповерхности системы двух параллелепипедов: *а* – элементарный домен исследуемой системы ($L1 = 304$ нм, $L2 = 100$ нм, $L3 = 240$ нм); *б* – мультипольная декомпозиция исследуемого изолированного домена; *в-г* – численно моделированные спектры отражения метаповерхности, набранной из доменов рисунка, *а*, где рисунок, *в* соответствует параметрам рисунка, *а*, в то время как на рисунке, *г* система с возмущенной геометрией ($L1 = 314$ нм, $L3 = 230\text{--}250$ нм)

Особое резонансное отражение вблизи исключительной точки можно использовать как способ детектирования изменения параметров окружающей среды. Это возможно ввиду фундаментального теоретического результата о том, что модуль сдвига резонансных частот в спектре отражения метаповерхности обладает квадратно-корневой зависимостью от пертурбации внешнего параметра системы. Наиболее доступным контролируемым параметром часто оказывается показатель преломления, что открывает дорогу для разработки новых фотонных устройств с возможным применением в химической или горнодобывающей промышленности.

Выводы

В данной работе был продемонстрирован эффект исключительных точек в диэлектрической неэрмитовой метаповерхности с нарушением симметрии только в плоскости. Этот эффект может быть широко использован в сенсорах на основе ИТ, оптических усилителях и других областях производства фотонных устройств.

Кроме того, был исследован оптический отклик такой структуры. Особый интерес представляет резонансное отражение вблизи исключительной точки, которое может быть использовано для применения в сенсорах показателя преломления.

Важно отметить, что наш подход к проектированию метаповерхности является более эффективным с экспериментальной точки зрения, поскольку позволяет гибко управлять геометрическими параметрами системы, например, за счет изменения угла раскрытия между двумя параллелепипедами. Таким образом, результаты данной работы имеют широкое применение в проектировании нанофотонных устройств.

Список литературы

1. Nano-antennas based on silicon-gold nanostructures / A. Kucherik, S. Kutrovskaya, A. Osipov, M. Gerke, I. Chestnov, S. Arakelian, A.S. Shalin, A.B. Evlyukhin, A.V. Kavokin // *Sci Rep.* – 2019. – Vol. 9. – P. 338.
2. CPA-lasing associated with the quasibound states in the continuum in asymmetric non-hermitian structures / D.V. Novitsky, A.C. Valero, A. Krotov, T. Salgals, A.S. Shalin, A.V. Novitsky // *ACS Photonics.* – 2022. – Vol. 9. – P. 3035–3042.

3. Transparent hybrid anapole metasurfaces with negligible electromagnetic coupling for phase engineering / A.V. Kuznetsov, A. Canós Valero, M. Tarkhov, V. Bobrovs, D. Redka, A.S. Shalin // *Nanophotonics*. – 2021. – Vol. 10. – P. 4385–4398.

4. Nanoscale tunable optical binding mediated by hyperbolic metamaterials / N.A. Kostina, D.A. Kislov, A.N. Ivinskaya, A. Proskurin, D.N. Redka, A. Novitsky, P. Ginzburg, A.S. Shalin // *ACS Photonics*. – 2020. – Vol. 7. – P. 425–433.

5. Theory, observation, and ultrafast response of the hybrid anapole regime in light scattering / A. Canós Valero, E.A. Gurvitz, F.A. Benimetskiy, D.A. Pidgayko, A. Samusev, A.B. Evlyukhin, V. Bobrovs, D. Redka, M.I. Tribelsky, M. Rahmani, K.Z. Kamali, A.A. Pavlov, A.E. Miroshnichenko, A.S. Shalin // *Laser Photon Rev.* – 2021. – Vol. 15. – P. 2100114.

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.

References

1. Kucherik A., Kutrovskaya S., Osipov A., Gerke M., Chestnov I., Arakelian S., Shalin A.S., Evlyukhin A.B., Kavokin A.V. Nano-antennas based on silicon-gold nanostructures. *Sci Rep*, 2019, vol. 9, p. 338.

2. Novitsky D.V., Valero A.C., Krotov A., Salgals T., Shalin A.S., Novitsky A.V. CPA-lasing associated with the quasibound states in the continuum in asymmetric non-hermitian structures. *ACS Photonics*, 2022, vol. 9, pp. 3035-3042.

3. Kuznetsov A.V., Canós Valero A., Tarkhov M., Bobrovs V., Redka D., Shalin A.S. Transparent hybrid anapole metasurfaces with negligible electromagnetic coupling for phase engineering. *Nanophotonics*, 2021, vol. 10, pp. 4385-4398.

4. Kostina N.A., Kislov D.A., Ivinskaya A.N., Proskurin A., Redka D.N., Novitsky A., Ginzburg P., Shalin A.S. Nanoscale tunable optical binding mediated by hyperbolic metamaterials. *ACS Photonics*, 2020, vol. 7, pp. 425-433.

5. Canós Valero A., Gurvitz E.A., Benimetskiy F.A., Pidgayko D.A., Samusev A., Evlyukhin A.B., Bobrovs V., Redka D., Tribelsky M.I., Rahmani M., Kamali K.Z., Pavlov A.A., Miroshnichenko A.E., Shalin A.S. Theory, observation, and ultrafast response of the hybrid anapole regime in light scattering. *Laser Photon Rev*, 2021, vol. 15, p. 2100114.

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.

Сведения об авторе

МЕДВЕДЕВ И.Д.

e-mail: 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

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 автора 100 %.

Получена: 07.10.2024

Одобрена: 10.10.2024

Принята к публикации: 12.10.2024

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

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

Author's Contributions is 100 %.

Received: 07/10/2024

Approved: 10/10/2024

Accepted for publication: 12/10/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Медведев, И.Д. Об эффекте исключительных точек в полностью диэлектрической метаповерхности / И.Д. Медведев // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 4. – С. 20–27.

Please cite this article in English as: Medvedev I.D. On the Exceptional Points effect in All-Dielectric Metasurface. *Applied Photonics*, 2024, vol. 11, no. 4, pp. 20-27.