

09.2

Возможность генерации магнитного шума в оптическом диапазоне

© О.В. Минин^{1,2}, И.В. Минин¹⁻³¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия³ Филиал Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН „Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники“, Новосибирск, Россия

E-mail: prof.minin@gmail.com

Поступило в Редакцию 14 мая 2024 г.

В окончательной редакции 22 июня 2024 г.

Принято к публикации 22 июня 2024 г.

Магнитные шумы известны в магнитных системах на протяжении более сотни лет, но до сих пор не сообщалось о возможности наблюдения магнитных шумов в оптическом диапазоне в немагнитных (диэлектрических) системах. Как показало моделирование, зависящий от времени резонанс Фано, связанный с внутренними модами Ми, можно наблюдать на определенной стадии замерзания снаружи внутрь сферической микрокапли воды. В естественных осадках присутствует ансамбль капель воды с разными геометрическими размерами, случайным образом распределенных в пространстве. Следовательно, такие частицы (при облучении лазерным излучением) при замерзании будут случайным образом генерировать сильные электромагнитные поля в зависимости от размера капли и времени ее замерзания. Такое облако замерзающих капель можно рассматривать как природный генератор магнитного шума.

Ключевые слова: магнитный шум, резонанс Фано, мезотроника, замерзающая капля воды.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.20.58929.19987

Замерзающая капля воды, состоящая из комбинации воды (ядро) и ледяной оболочки, открывает новые возможности в фотонике. Однако исследованиям оптических явлений в замерзающей капле воды до сих пор было посвящено крайне ограниченное число работ. Этот класс задач относится к изучению особенностей взаимодействия электромагнитных волн с телами с зависящими от времени диэлектрическими параметрами. Некоторые нерезонансные оптические эффекты, возникающие в замерзающей мезомасштабной капле воды, недавно были рассмотрены в работах [1,2].

Возбуждение резонансов Фано высоких порядков в монолитных мезоразмерных сферах [3–5] позволяет уменьшить ширину резонансной линии и тем самым повысить чувствительность резонансных структур. Кроме того, облучение их электромагнитными волнами приводит к возникновению гигантских магнитных и электрических полей внутри частицы.

Мезомасштабные сферические капли, состоящие из воды и тонкой оболочки льда, представляют собой резонаторы, которые на некоторой стадии замерзания капли могут создавать резонанс Фано высокого порядка: при определенной толщине ледяной оболочки капля испускает сильный магнитный импульс, и такие частицы работают как генератор рассеянного света при подсветке капли оптическим излучением. Одной из основных целей настоящей работы является предсказание возможности существования магнитного шума, генерируемого ансамблем замерзающих капель воды, встречающихся в природе, при подсветке их оптическим излучением. До сих пор никто не сообщал о возможности наблюдения феномена магнитных шумов в

оптическом диапазоне в немагнитных (диэлектрических) системах.

Недавние экспериментальные исследования [6–8] (см. также цитированную в этих работах литературу) показывают, что фазовый переход в маленьких капельках переохлажденной воды представляет собой чрезвычайно сложный, быстрый и многостадийный процесс. Однако в принятые в указанных выше работах модели не включены эффекты, связанные с магнитными полями, формирующимися в замерзающей капле. В связи с этим нам представляется актуальным теоретически оценить эффекты магнитного отклика в замерзающей капле воды (элементе ансамбля независимых капель) как источника магнитного шума.

Замерзание капли состоит из двух основных процессов: охлаждения капли до температуры фазового перехода и последующего замерзания сферического слоя ледяной оболочки. Экспериментальные измерения распределения дождевых капель по размеру показывают, что основная часть капель сосредоточена в области диаметров менее 0.2 mm, а в теплых (или так называемых низких) облаках преобладают частицы с размером 0.1–10 μm [9]. При этом форму капли воды радиусом $R \ll 2.5 \text{ mm}$ [1,2,10], т. е. при малом числе Бонда, можно считать сферической. Капли воды с радиусами менее 50 μm не должны взрываться из-за расширения воды при замерзании [11].

Рассеяние света на капле воды с оболочкой льда (рис. 1) проводилось на программном комплексе COMSOL Multiphysics. Падающая плоская волна с линейной поляризацией с напряженностью электрического поля $|\mathbf{E}_0| = 1 \text{ V/m}$ распространяется вдоль оси z (начало

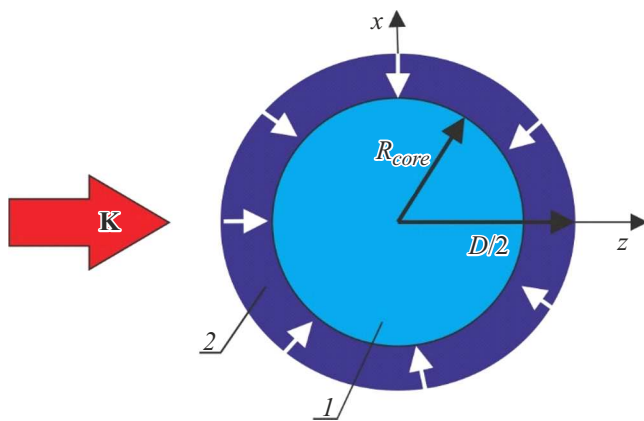


Рис. 1. Геометрия задачи и схема замерзания капли воды снаружи внутрь. 1 — вода, 2 — лед. Светлыми стрелками показано направление распространения границы лед–вода.

координат в центре капли). В качестве граничного условия использовался идеально согласованный слой. Как и в [1,2], показатели преломления воды и твердого льда на длине волны $\lambda = 589 \text{ nm}$ выбраны равными 1.334 и 1.301 соответственно. Внутри и снаружи капли вода–лед размер сетки составляет $\lambda/20$ и $\lambda/10$ соответственно. Для демонстрации эффекта капля с внешним модальным диаметром $D = 6 \mu\text{m}$ (соответствует параметру размера Ми $q = \frac{D\pi}{\lambda} \sim 32$, где λ — длина волны освещающего каплю оптического излучения) расположена в воздухе ($n = 1$). R_{core} — радиус водяного ядра частицы, δ — толщина ледяной сферической оболочки, зависящей от времени замерзания. Более детально постановка задачи описана в [12].

Динамика замерзания капли представляет собой многостадийный процесс, который до сих пор ясен не до конца [6–8,11]. Мы предполагаем простейший сценарий замерзания капли снаружи внутрь, при котором фронт раздела лед–вода симметрично продвигается внутрь жидкости. Эффектами расширения и сжатия слоя льда в капле с малым числом Бонда можно пренебречь [11].

На рис. 2 показаны нормированные распределения интенсивностей электрического и магнитного полей внутри и вблизи теневой поверхности замерзающей капли для резонансного значения параметра δ . Анализ показывает, что внутри капли воды возникает резонанс Фано при малых толщинах ледяной оболочки $160 < \delta < 180 \text{ nm}$. Эти резонансы соответствуют волне шепчущей галереи с $l = 76$, где l — номер резонансной моды (рис. 2). Отметим, что в миллиметровом диапазоне волн наблюдается также эффект просветления льда, вероятно обусловленный тем, что тонкий слой из молекул воды находится в неустойчивом состоянии [13].

Возможность реализации резонанса Фано обусловлена малой диссипацией в капле воды в оптическом диапазоне. Структура поля внутри замерзающей капли характерна для случая, в котором мода высокого порядка интерферирует с модами низкого порядка, что

приводит к характерной форме резонанса Фано [3–5] для спектров напряженности магнитного и электрического полей в области полюсов капли (рис. 2, с). Отметим, что амплитуда резонансной моды на несколько порядков выше когерентной суммы всех остальных мод. В результате распределение поля внутри частицы определяется этой резонансной модой независимо от фаз остальных мод [3–5], что отчетливо видно на рис. 2, с.

Напряженность магнитного поля в резонансе превышает напряженность электрического поля в горячих точках на полюсах капли с $\delta = 171 \text{ nm}$ примерно в 1.3 раза (рис. 2). Интенсивность электрического поля $|\mathbf{E}/\mathbf{E}_0|^2$ в резонансе усиливается в 350 раз, а интенсивность магнитного поля $|\mathbf{H}/\mathbf{H}_0|^2$ — в 450 раз. Заметим, что величины усиления электромагнитного поля, в разы меньшие в условиях резонанса Фано для сферических наночастиц с параметром размера Ми около 5 и высоким (GaP) показателем преломления, теоретически ранее наблюдались в [14]. Отметим, что вдали от резонанса Фано, например при толщине ледяной оболочки $\delta = 180 \text{ nm}$, интенсивности как магнитного, так и электрического поля в фокусе фотонной струи превышают максимальные интенсивности в горячих точках внутри капли.

Усиление магнитного поля обусловлено тем, что при определенном параметре размера Ми капли воды и показателях преломления ядра, оболочки и ее толщины внутри капли в результате интерференции света в окрестности сингулярных точек [15] с нулевым значением вектора Умова–Пойнтинга возникают оптические вихри [4]. Это отвечает появлению соответствующих круговых токов, которые, согласно закону Био–Савара, и создают магнитные поля [4,5]. Распределения интенсивностей электрического и магнитного полей вдоль оси распространения излучения (ось z) внутри капли в резонансе Фано показаны на рис. 3.

Асимметричная форма линии резонанса Фано высокого порядка (рис. 3) наблюдается для спектров напряженностей магнитного и электрического полей в полюсе на теневой стороне капли ($x = 0, y = 0, z = R$). Минимум относительной напряженности поля наблюдается вблизи толщины оболочки льда около $\delta = 171 \text{ nm}$. С учетом [5] следует ожидать увеличения номера резонансной моды и интенсивности усиления электромагнитного поля при увеличении диаметра замерзающей капли.

В зависимости от условий замерзания [11,16–18] капля воды размером порядка $10 \mu\text{m}$ замораживается примерно за 2.4 ms. Средняя скорость распространения границы лед–вода в капле замерзающей воды с внешним диаметром около $10 \mu\text{m}$ составляет около 0.028 m/s [11,16]. Из результатов, показанных на рис. 3, видно, что ширина линии резонанса Фано на полувысоте составляет около 10 nm . Следовательно, время жизни резонанса Фано при замерзании снаружи внутрь рассмотренной выше капли воды диаметром $6 \mu\text{m}$ составляет порядка $0.35 \mu\text{s}$.

Изменение толщины ледяной оболочки в замерзающей капле воды приводит к значительным изменениям в

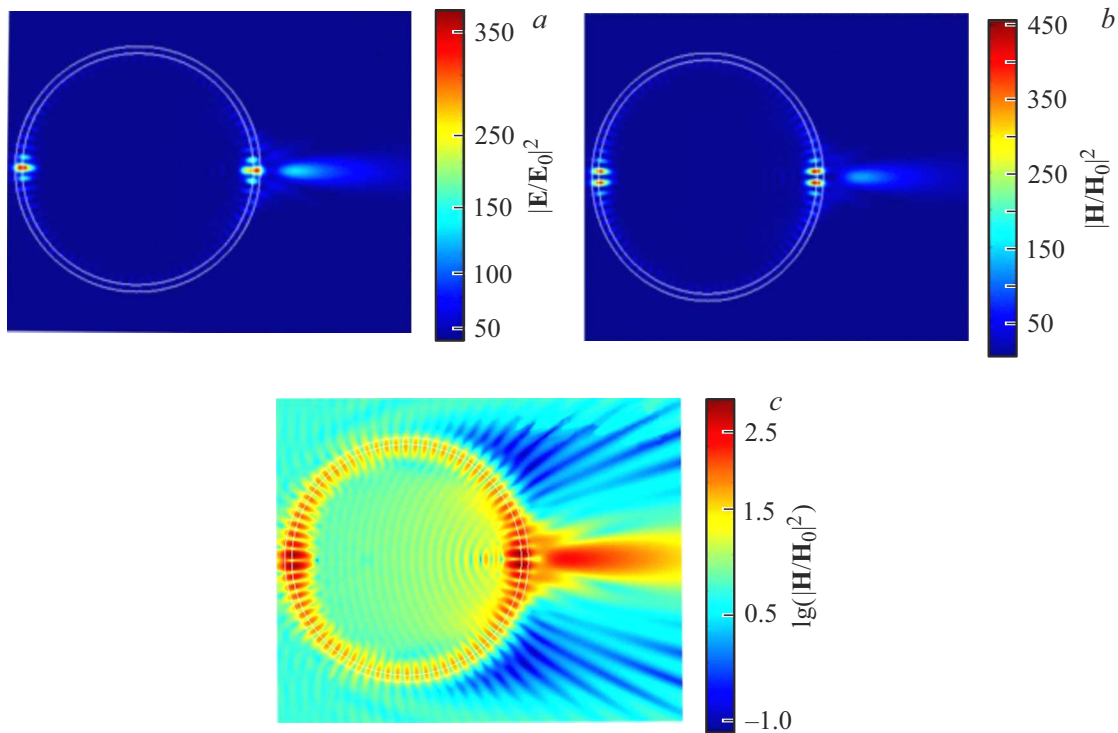


Рис. 2. Нормализованные на значения для падающей волны распределения интенсивностей электрического $|E/E_0|^2$ (a) и магнитного $|H/H_0|^2$ (b) (c — в логарифмическом масштабе) полей при резонансном значении ледяной оболочки, равном $\delta = 171$ nm.

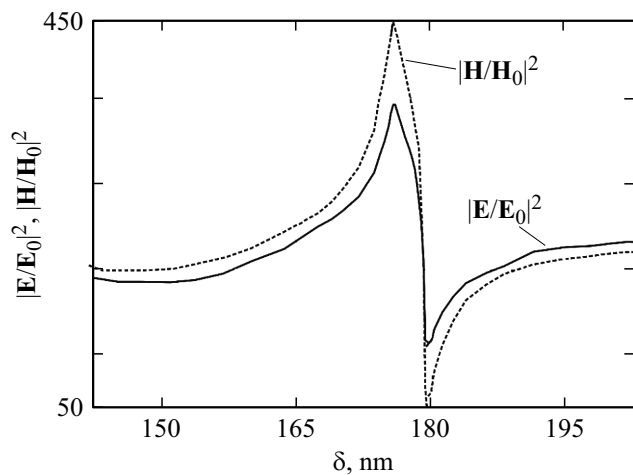


Рис. 3. Распределения нормированных интенсивностей электрического и магнитного полей в области теневой горячей точки замерзающей капли в зависимости от толщины ледяной оболочки δ в области резонанса.

интенсивностях электрических и магнитных полей внутри капли при освещении капли лазерным излучением. В замерзающей капле воды произвольного радиуса (при условии малости параметра Бонда) всегда найдется такая толщина ледяной оболочки, при которой возникнет резонанс Фано, т.е. по мере замерзания капля воды подстраивается под резонансные значения благодаря

изменению соотношения радиуса жидкого ядра из воды и толщины ледяной оболочки. Поскольку формирование и замерзание каплей является стохастическим процессом, на некоторой стадии замерзания капли воды всегда найдется оптимальная толщина поверхностного слоя льда, когда вследствие интерференции моды высокого порядка с модами низкого порядка внутри капли образуется резонанс Фано, параметры которого зависят от времени. Такой резонанс приводит к значительному увеличению электрических и магнитных полей в горячих точках на полюсах капли. В результате меняется распределение оптического поля внутри и снаружи капли, что на определенном этапе замерзания капли приводит к зависящим от времени резонансам Фано в замерзающей капле воды, при этом наблюдается существенное усиление магнитного поля: такие частицы работают как источник мощного электромагнитного поля при их подсветке лазерным излучением. В таком случае можно говорить об облаке замерзающих капель как о диффузионной среде с меняющимися резонансными характеристиками. Следовательно, при подсветке лазерным излучением такое облако независимых замерзающих капель можно рассматривать как природный оптический генератор магнитного шума, о котором раньше никогда не сообщалось.

Генерация субмикросекундных электромагнитных импульсов может также служить основой для изучения начальной стадии замерзания капель воды, так как изменение толщины ледяной оболочки при замерзании капли воды снаружи внутрь позволяет проследить за

формированием во времени асимметричной формы линии резонанса Фано внутри капли, а соответствующий электромагнитный шум несет информацию о перестройке пространственно-фазовой структуры капли.

Финансирование работы

Работа частично поддержана программой развития Томского политехнического университета.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] O.V. Minin, I.V. Minin, Y. Cao, *Sci. Rep.*, **13**, 7732 (2023). DOI: 10.1038/s41598-023-34946-7
- [2] O.V. Minin, Y. Cao, I.V. Minin, *Nanomaterials*, **13**, 2168 (2023). DOI: 10.3390/nano13152168
- [3] И.В. Минин, О.В. Минин, *Оптика атмосферы и океана*, **37** (3), 187 (2024). DOI: 10.15372/AOO20240301
- [4] Z. Wan, B. Luk'yanchuk, L. Yue, B. Yan, J. Monks, R. Dhama, O.V. Minin, I.V. Minin, S. Huang, A. Fedyanin, *Sci. Rep.*, **9**, 20293 (2019). DOI: 10.1038/s41598-019-56783-3
- [5] И.В. Минин, О.В. Минин, С. Джоу, *Письма в ЖЭТФ*, **116** (3), 146 (2022). DOI: 10.31857/S1234567822150034 [I.V. Minin, O.V. Minin, Z. Song, *JETP Lett.*, **116** (3), 144 (2022). DOI: 10.1134/S002136402260121X].
- [6] A. Kalita, M. Mrozek-McCourt, T.F. Kaldawi, P.R. Willmott, N.D. Loh, S. Marte, R.G. Sierra, H. Laksmono, J.E. Koglin, M.J. Hayes, R.H. Paul, S.A.H. Guillet, A.L. Aquila, M. Liang, S. Boutet, C.A. Stan, *Nature*, **620**, 557 (2023). DOI: 10.1038/s41586-023-06283-2
- [7] A. Hakimian, M. Mohebinia, M. Nazari, A. Davoodabadi, S. Nazifi, Z. Huang, J. Bao, H. Ghasemi, *Nat. Commun.*, **12**, 6973 (2021). DOI: 10.1038/s41467-021-27346-w
- [8] F. Chu, S. Li, C. Zhao, Y. Feng, Y. Lin, X. Wu, X. Yan, N. Miljkovic, *Nat. Commun.*, **15**, 2249 (2024). DOI: 10.1038/s41467-024-46518-y
- [9] H. Yu, X. Sun, R. Ti, B. Tu, Y. Fan, Y. Wang, Z. Wang, Y. Wei, X. Liu, H. Huang, Y. Li, Y. Wang, *Opt. Express*, **32**, 17738 (2024). DOI: 10.1364/OE.518266
- [10] A. Starostin, V. Strel'nikov, L.A. Dombrovsky, S. Shoval, O. Gendelman, E. Bormashenko, *J. Colloid Interface Sci.*, **620**, 179 (2022). DOI: 10.1016/j.jcis.2022.04.019
- [11] S. Wildeman, S. Sterl, C. Sun, D. Lohse, *Phys. Rev. Lett.*, **118**, 084101 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.084101
- [12] O.V. Minin, S. Zhou, I.V. Minin, *High order unconventional Fano resonance in the time domain for a freezing water microdroplet*, preprint (Optical Society of America, 2023). DOI: 10.1364/opticaopen.24320959
- [13] Г.С. Бордонский, *Письма в ЖТФ*, **50** (9), 35 (2024). DOI: 10.6101/PJTF.2024.09.57567.19587 [G.S. Bordonskiy, *Tech. Phys. Lett.*, **50** (5), 30 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.05.58417.19587].
- [14] M. Tribelsky, A. Miroshnichenko, *Phys. Rev. A*, **93**, 053837 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevA.93.053837
- [15] M.V. Berry, *Sci. Appl.*, **12**, 238 (2023). DOI: 10.1038/s41377-023-01270-8
- [16] Z. Meng, P. Zhang, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **193**, 122955 (2022). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122955
- [17] V.T.J. Phillips, A. Khain, N. Benmoshe, E. Plotoviz, A. Ryzhkov, *J. Atmos. Sci.*, **72**, 262 (2015). DOI: 10.1175/JAS-D-13-0376.1
- [18] L. Karlsson, H. Lycksam, A. Ljung, P. Gren, T.S. Lundström, *Exp. Fluids*, **60**, 182 (2019). DOI: 10.1007/s00348-019-2823-1