

УДК 681.7.068/.069

Д.А. Кислов, А.С. Шалин

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

УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ МЕТАПОВЕРХНОСТЬЮ ЗА СЧЕТ ЕЕ МЕХАНИЧЕСКОГО РАСТЯЖЕНИЯ

Генерация второй гармоники с использованием метаповерхностей с контролируемыми оптическими свойствами является активной областью исследований в области фотоники и оптики. В работе показано, что использование метаповерхностей с контролируемыми оптическими свойствами позволяет усиливать сигнал второй гармоники. Например, изменение геометрии метаповерхности может привести к увеличению нелинейной поляризуемости вещества и, как следствие, к более эффективной генерации второй гармоники. Кроме того, метаповерхности могут быть спроектированы таким образом, чтобы обеспечить фазовую согласованность волны второй гармоники, что также способствует повышению эффективности генерации. Таким образом, использование метаповерхностей с контролируемыми оптическими свойствами представляет собой перспективный подход к созданию эффективных и компактных источников света с удвоенной частотой. Это может иметь важные практические приложения в оптической связи, лазерной технике и других областях, где требуется высокоэффективная генерация света в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне.

Ключевые слова: генерация второй гармоники, PDMS, растягиваемая метаповерхность, AlGaAs, пропускание, отражение.

D.A. Kislov, A.S. Shalin

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Dolgoprudny, Russian federation

CONTROLLING THE EFFICIENCY OF SECOND HARMONIC GENERATION FROM A METASURFACE DUE TO ITS MECHANICAL STRETCHING

Second harmonic generation using metasurfaces with controlled optical properties is an active area of research in photonics and optics. The work shows that the use of metasurfaces with controlled optical properties makes it possible to control and enhance SHG. For example, a change in the geometry of the metasurface can lead to an increase in the nonlinear polarizability of the substance and, consequently, to more efficient generation of the second harmonic. In addition, metasurfaces can be designed in such a way as to ensure phase consistency of the second harmonic wave, which also helps to increase the SHG efficiency. Thus, the use of metasurfaces with controlled optical properties represents a promising approach for creating efficient and compact frequency-doubled light sources. This could have important practical applications in optical communications, laser technology, and other areas that require highly efficient generation of light in the visible and near-infrared ranges.

Keywords: second harmonic generation, PDMS, stretchable metasurface, AlGaAs, transmission, reflection.

Метаповерхности – это искусственные структуры, созданные на микро- или наномасштабе, которые позволяют контролировать и управлять светом на наноуровне. В наши дни диэлектрические метаповерхности нашли свое широкое применение в различных областях науки и технологии. Используя такие структуры, можно получить огромное количество различных физических эффектов. Одним из таких эффектов, имеющих важное значение, является генерация высших гармоник.

Существует много способов управления оптическими свойствами диэлектрических метаповерхностей: изменение геометрии метаструктуры; изменение диэлектрических свойств внешней для метаатомов среды; использование в конструкции метаповерхности активных 2D-слоев с управляемым оптическим откликом за счет внешних стимулов, таких как электрическое или магнитное поле, тепло или свет и т.д. В данной работе были рассмотрены некоторые из этих способов.

Управление оптическими свойствами метаповерхностей является активно развивающимся направлением науки и технологии. Одним из способов управления оптическими свойствами метаповерхностей является изменение их геометрии. Варьирование формы и размера метаатомов может привести к изменению рассеивающих и пропускных свойств у различных диапазонов длин волн метаповерхности в целом. Однако этот способ обладает рядом очевидных недостатков. Невозможно в реальном времени изменять размеры метаатомов в метаповерхности, тем более делать это обратимо. Для этого нужно изготавливать разные образцы метаповерхностей, отличающихся размерами и геометрией метаатомов.

Однако существует способ обратимого управления оптическими свойствами (отражение, пропускание) метаповерхности – механическое растяжение матрицы, в которой находятся метаатомы, при условии, что она обладает эластичностью. Механическое растяжение матрицы может быть достигнуто различными способами, например, с помощью пьезоэлектрических элементов или механических устройств. При растяжении матрицы изменяется период расположения метаатомов в метаповерхности, причем это изменение обратимо, что может быть полезно для создания оптических фильтров, устройств для управления светом или оптических сенсоров. Также механическое растяжение матрицы может использоваться для создания оптических линз с переменным фокусным расстоянием. Путем изменения геометрических параметров метаповерхности можно контролировать фокусировку света, что позволяет

создавать линзы с возможностью изменения фокусного расстояния в реальном времени.

Очевидно, что данный метод можно применять для управления генерацией второй гармоники от метаповерхностей. Как было отмечено выше, механическое растяжение матрицы является обратимым процессом, что позволяет управлять эффективностью генерации второй гармоники в реальном времени. Это открывает новые возможности для создания динамических оптических устройств. Различные геометрии могут создавать различные эффекты, такие как усиление поля, усиление рассеяния и интерференция. Это влияет на генерацию второй гармоники и позволяет контролировать ее параметры.

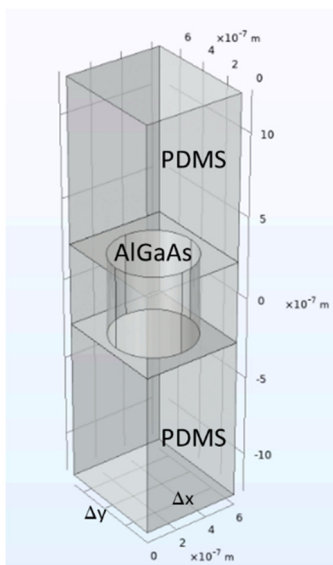


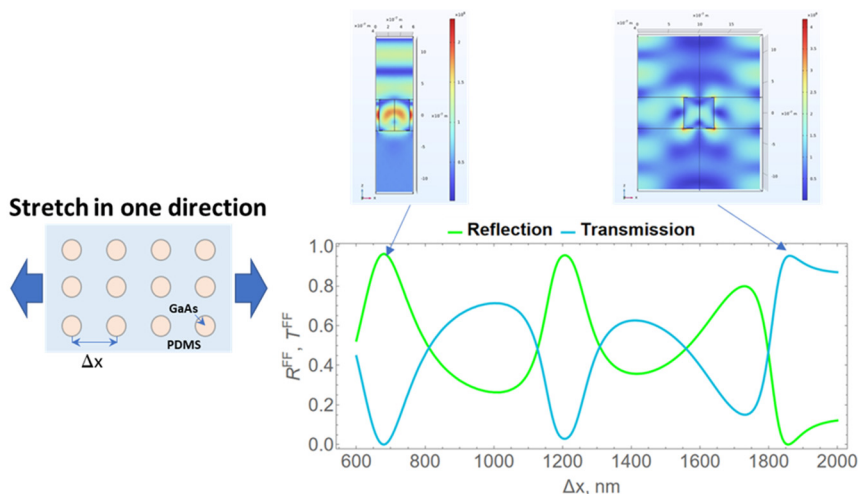
Рис. 1. Элементарная ячейка периодической метаповерхности

В качестве прозрачной эластичной матрицы отлично подходит полидиметилсилоксан (PDMS). Это эластомер, широко используемый в различных областях, включая микрофлюидику, биомедицину и оптику. Он обладает прекрасными оптическими и механическими свойствами, что делает его привлекательным для использования в различных устройствах.

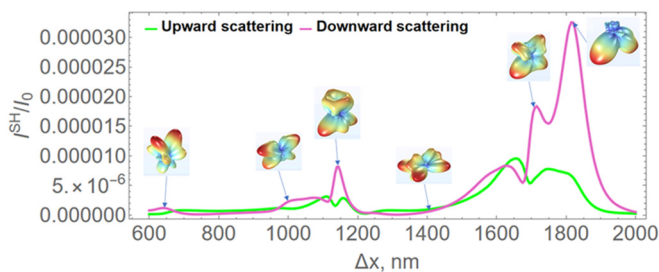
Для выбранных в исследовании длин волн PDMS характеризуется почти постоянным показателем преломления $n = 1,4$ и практически отсутствующим поглощением.

В COMSOL Multiphysics была реализована модель периодической метаповерхности, метаатомы которой расположены в матрице PDMS. На рис. 1 представлена элементарная ячейка метаповерхности, Показаны цилиндрические метаатомы из AlGaAs в матрице из PDMS. Их размер фиксирован: $R=250$ nm, $H=500$ nm. Δx и Δy – период метаповерхности вдоль осей x и y . На гранях вдоль осей x и y реализованы периодические граничные условия типа Флоке. Верхняя и нижняя грани задаются периодическими портами, которые генерируют плоскую линейно поляризованную волну с постоянной интенсивностью $I_0 = 10^{13}$ Вт/м².

Для начала были исследованы оптические характеристики метаповерхности при изменении периодичности только вдоль оси x . При этом период по оси y оставался неизменным, $\Delta y = 600$ нм. На рис. 2, *a* приведены графики коэффициентов отражения и пропускания метаповерхности при нормальном падении и растяжении PDMS-матрицы вдоль оси x .



a



b

Рис. 2. Результаты моделирования оптических свойств метаповерхности в PDMS при растяжении вдоль направления оси x : *a* – коэффициенты отражения и пропускания метаповерхности на фундаментальной частоте; на вставках показано пространственное распределение ближнего поля для двух разных периодов метаповерхности; *b* – эффективность рассеяния ВГ «вверх» и «вниз»; на вставках показаны диаграммы направленности дальнего поля на частоте второй гармоники

Показано, что при растяжении метаповерхности светоотражающая/светопропускающая способность промодулирована. На вставках показаны карты пространственного распределения ближнего поля для случая полного отражения (левая панель) и случая полного пропускания (правая панель). Приведенные графики демонстрируют, что метод

пригоден для точного обратимого управления оптическими характеристиками диэлектрической метаповерхности.

На рис. 2, б показаны результаты моделирования эффективности рассеяния одного метаатома на частоте ВГ в верхнее и нижнее полупространство с учетом влияния соседних метаатомов периодической 2D-решетки. Анализируя кривые, следует выделить два диапазона периодов метаповерхности, где эффективность ГВГ становится на порядок больше по сравнению с ГВГ уединенного метаатома ($I_{SH}/I_0 \approx 10^{-6}$). Так, например в диапазоне Δx от 1000 до 1200 нм эффективность в пике возрастает до значения $I_{SH}/I_0 \approx 10^{-5}$. При этом более эффективна генерация «вниз», что подтверждается диаграммой направленности рассеяния в дальней зоне. Второй диапазон периодов Δx , который следует отметить, от 1600 до 2000 нм. Здесь также более эффективна ГВГ в нижнее полупространство (см. диаграмму направленности в дальней зоне). При этом значение эффективности в пике $I_{SH}/I_0 \approx 3 \cdot 10^{-5}$. Таким образом, можно сделать вывод, что, управляя оптическими характеристиками на фундаментальной частоте, можно получать усиление ГВГ, причиной которого будут коллективные эффекты в метаповерхности.

Далее были исследованы оптические свойства метаповерхности при одинаковом растяжении ее в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 3). Графики коэффициентов отражения и пропускания промодулированы с большей частотой по сравнению с предыдущей метаповерхностью (сравнить рис. 2, а и 3, а).

На графиках эффективности ГВГ также стало больше резонансов по сравнению с предыдущей метаповерхностью, что очевидно связано с другой структурой ближних полей при изменении периодичности метаповерхности и интерференцией рассеянного поля отдельными метаатомами. При этом значение эффективности ГВГ в нижнее полупространство в пике становится еще больше и достигает значения $I_{SH}/I_0 \approx 10^{-4}$, что соизмеримо с полной эффективностью ГВГ уединенной цилиндрической наночастицей в воздухе.

Генерация второй гармоники (ГВГ) – важное явление в физике и оптике, которое широко используется в различных областях. С другой стороны, управляемые метаповерхности – это новые искусственные структуры, созданные с целью управления и модификации электромагнитных волн. Они позволяют манипулировать фазой, амплитудой и направлением света, что открывает новые возможности для генерации второй гармоники. Объединение этих двух технологий позволяет создавать эффективные источники света с широким диапазоном частот.

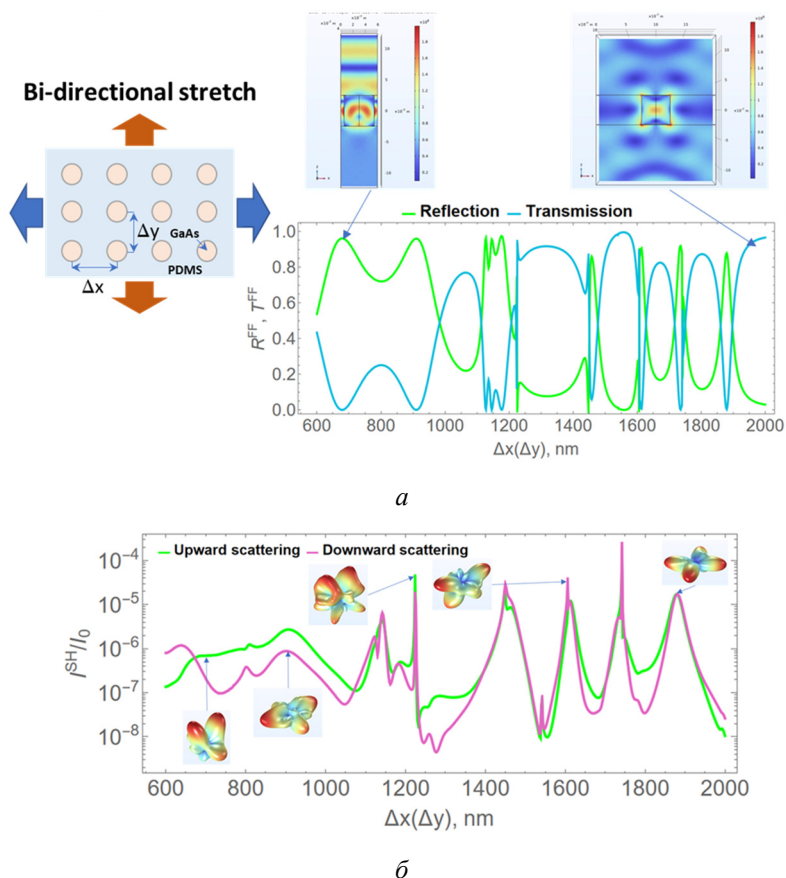


Рис. 3. Результаты моделирования оптических свойств метаповерхности в PDMS при одинаковом растяжении вдоль направления осей x и y : a – коэффициенты отражения и пропускания метаповерхности на фундаментальной частоте; на вставках показано пространственное распределение ближнего поля для двух разных периодов метаповерхности; b – эффективность рассеяния ВГ в верхнее и нижнее полупространство; на вставках показаны диаграммы направленности дальнего поля на частоте второй гармоники

Одним из перспективных направлений развития данной технологии является создание сверхкомпактных источников света на основе обратно управляемых метаповерхностей. Это позволит уменьшить габариты и повысить эффективность генераторов второй гармоники, что имеет большое значение для интеграции этих источников в микроэлектронику и микрофотонику. Такие устройства могут быть использованы в оптических коммуникационных схемах, биомедицинских исследованиях, а также в оптических устройствах обработки информации.

Дальнейшие исследования и разработки в этой области могут привести к созданию новых инновационных устройств и открытию новых горизонтов в оптической науке.

Список литературы

1. Li, Aobo. Metasurfaces and their applications / Li, Aobo, Singh, Shreya and Sievenpiper, Dan // *Nanophotonics*. – 2018. – Vol. 7, no. 6. – P. 989–1011.
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. Medvedev, I.D. Exceptional Points in All-Dielectric Structure with Only In-Plane Symmetry Breaking / I.D. Medvedev, A.V. Kuznetsov, V. Bobrovs // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2024. – P. 184–188.
5. Исследование поляризационных свойств генерации второй гармоники в световодах с периодически наведенной квадратичной нелинейностью / Е.И. Донцова, И.А. Лобач, А.В. Достовалов, С.И. Каблуков // *Прикладная фотоника*. – 2015. – Т. 2, № 4. – С. 238–256.

References

1. Li A., Singh S., Sievenpiper D. Metasurfaces and their applications. *Nanophotonics*, 2018, vol. 7, no. 6, pp. 989-1011.
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. 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*, 2024, vol. 1126, pp. 184-188.
5. Dontsova E.I., Lobach I.A., Dostovalov A.V., Kablukov S.I. Issledovanie polarizatsionnykh svoystv generatsii vtoroi garmoniki v sve-tovodakh s periodicheski navedennoi kvadratischnoi nelineinost'iu [Polarization features of second harmonic generation in periodically poled silica fibers]. *Applied Photonics*, 2015, vol. 2, no. 4, pp. 238-256.

Сведения об авторах

КИСЛОВ Д.А.

e-mail: denis.a.kislov@gmail.com

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории контролируемых оптических наноструктур Московского физико-технического института, г. Долгопрудный

ШАЛИН А.С.

e-mail: alexandesh@gmail.com

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Лаборатории контролируемых оптических наноструктур Московского физико-технического института, г. Долгопрудный

About the authors

D.A. KISLOV

e-mail: denis.a.kislov@gmail.com

Ph.D., Senior Researcher, Laboratory of Tunable Optical Nanostructures, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

A.S. SHALIN

e-mail: alexandesh@gmail.com

D.Sc., Chief Researcher of the Laboratory of Tunable Optical Nanostructures of the Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 15.08.2024

Одобрена: 20.08.2024

Принята к публикации: 22.08.2024

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

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

Author Contributions. All authors have made an equivalent contribution to the publication.

Received: 15/08/2024

Approved: 20/08/2024

Accepted for publication: 22/08/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Кислов, Д.А. Управление эффективностью генерации второй гармоники метаповерхностью за счет ее механического растяжения / Д.А. Кислов, А.С. Шалин // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 3. – С. 22–29.

Please cite this article in English as: Kislov D.A., Shalin A.S. Controlling the efficiency of second harmonic generation from a metasurface due to its mechanical stretching. *Applied Photonics*, 2024, vol. 11, no. 2, pp. 22-29.