

## УСИЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В МЕТАПОВЕРХНОСТЯХ НА ОСНОВЕ ГАЛОИДНОГО ПЕРОВСКИТА\*

✉ П. А. Тонкаев<sup>1,2</sup>, М. А. Машарин<sup>1</sup>, С. В. Макаров<sup>1</sup>, Ю. Кившарь<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Австралийский национальный университет, Канберра, Австралия

✉ pavel.tonkaev@metalab.ifmo.ru

Многофотонное поглощение с последующей фотолюминесценцией в настоящее время привлекает большое внимание. За последние годы эти процессы нашли применение в нанофабрикации [1], микроскопии [2], оптическом хранении данных [3] и других областях. С другой стороны, генерация высоких гармоник используется для создания источников экстремального ультрафиолетового излучения [4], мягкого рентгеновского излучения [5] и аттосекундных импульсов [6]. Несмотря на быстрый прогресс в этой области, многофотонные процессы сильно ограничены их низкой эффективностью. Методы нанوفотоники нашли применение в усилении двухфотонной фотолюминесценции [7] и генерации гармоник как в одиночных нанорезонаторах [8,9], так и в метаповерхностях [10]. В этой работе мы исследуем двухфотонную фотолюминесценцию и генерацию пятой гармоники в одномерной поверхности из галоидного перовскита и демонстрируем усиление нелинейных процессов в области резонанса структуры по сравнению с тонкой пленкой.

Исследуемая метаповерхность для генерации пятой гармоники представляет одномерную решетку, полученную из  $\text{MAPbBr}_3$  методом наноимпринта, в то время как метаповерхность для двухфотонной фотолюминесценции была получена методом электронной литографии.

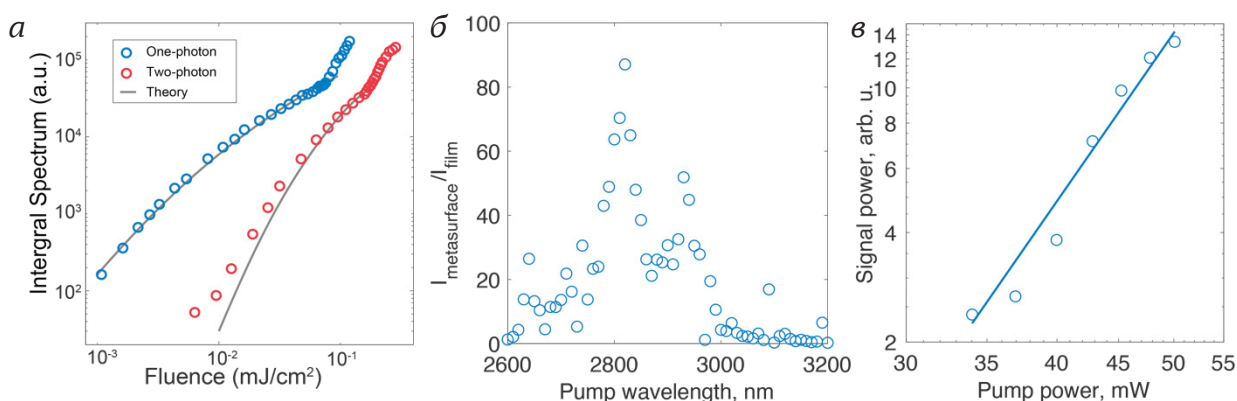


Рис. 1. *a* — зависимость от интенсивности одно- и двухфотонной фотолюминесценции от мощности возбуждения; *б* — отношение интенсивности пятой гармоники в метаповерхности галоидного перовскита к сигналу от тонкой пленки; *в* — зависимость сигнала пятой гармоники с учетом мощности возбуждения

© П. А. Тонкаев, М. А. Машарин, С. В. Макаров, Ю. Кившарь, 2022

\* Автор выражает благодарность научным группам профессора Ю. Кившаря из Австралийского национального университета и профессора Ш. Сяо из Харбинского политехнического университета. Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет-2030».

Для сравнения однофотонной и двухфотонной фотолюминесценции метаповерхность перовскита оптически возбуждалась фемтосекундным лазером с длиной волны 400 и 650 нм (рис. 1). При плотности возбуждающего излучения  $10 \text{ мкДж/см}^2$  интенсивность двухфотонного излучения составляет примерно  $1/60$  однофотонного излучения. Из-за высокой степени нелинейного процесса интенсивность двухфотонного излучения нарастает значительно быстрее и достигает около 60 % от линейного излучения при плотности энергии накачки  $79 \text{ мкДж/см}^2$ . При дальнейшем увеличении плотности потока возбуждающего излучения как линейное возбуждение, так и двухфотонное возбуждения производят сопоставимое спонтанное излучение. Линейное возбуждение первым достигает порога вынужденного излучения, в то время как для при двухфотонном возбуждении порог всего в 2,7 раза выше.

Метаповерхность перовскита для исследования генерации высоких гармоник облучалась пикосекундными лазерными импульсами с перестраиваемой длиной волны в диапазоне 2600–3200 нм. Нормирование полученного от метаповерхности сигнала на референсное значение, полученное от пленки, показало усиление генерации пятой гармоники для длины волны 564 нм, что соответствует резонансу метаповерхности. Стоит отметить пертурбативный режим взаимодействия, так как зависимость мощности пятой гармоники от возбуждения имеет степень 4,77 (см. рис. 1).

Таким образом, в работе продемонстрировано усиление двухфотонной фотолюминесценции в метаповерхности перовскита и снижение порога стимулированного излучения до значения, большего в 3 раза, чем при однофотонном возбуждении. Показано увеличение генерации пятой гармоники в несколько раз для длины волны, соответствующей резонансу структуры.

### Список литературы

1. Geng Q. et al. Ultrafast Multi-Focus 3-D Nano-Fabrication Based on Two-Photon Polymerization // *Nat. Commun.* 2019. Vol. 10. P. 2179.
2. Arbabi E. et al. Two-Photon Microscopy with a Double-Wavelength Metasurface Objective Lens // *Nano Lett.* 2018. Vol. 18. P. 4943–4948.
3. Lott J. et al. Two-Photon 3D Optical Data Storage via Aggregate Switching of Excimer-Forming Dyes // *Adv. Mater.* 2011. Vol. 23. P. 2425–2429.
4. Paul A. et al. Quasi-phase-matched generation of coherent extreme-ultraviolet light // *Nature.* 2003. Vol. 421. P. 51–54.
5. Chen M. C. et al. Generation of bright isolated attosecond soft X-ray pulses driven by multicycle midinfrared lasers // *Proc. National Acad. Sci.* 2014. Vol. 111. P. E2361–E2367.
6. Hernández-García C. et al. Attosecond extreme ultraviolet vortices from high-order harmonic generation // *Phys. Rev. Lett.* 2013. Vol. 111. P. 083602.
7. Fan Y. et al. Enhanced multiphoton processes in perovskite metasurfaces // *Nano Lett.* 2021. Vol. 21. P. 7191–7197.
8. Makarov S. V. et al. Efficient second-harmonic generation in nanocrystalline silicon nanoparticles // *Nano Lett.* 2017. Vol. 17. P. 3047–3053.
9. Koshelev K. et al. Subwavelength dielectric resonators for nonlinear nanophotonics // *Sci.* 2020. Vol. 367. P. 288–292.
10. Zograf G. et al. High-Harmonic generation from resonant dielectric metasurfaces empowered by bound states in the continuum // *ACS Photonics.* 2022. Vol. 9. P. 567–574.