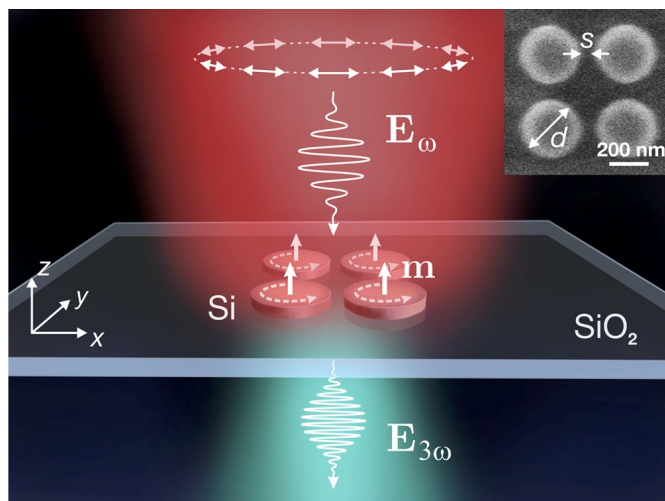
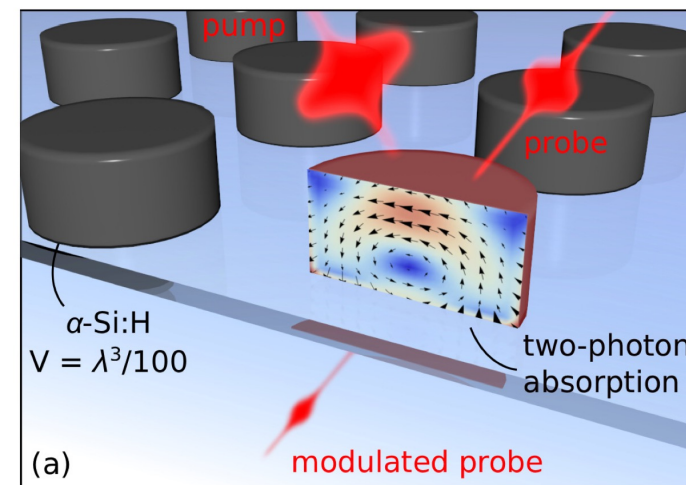


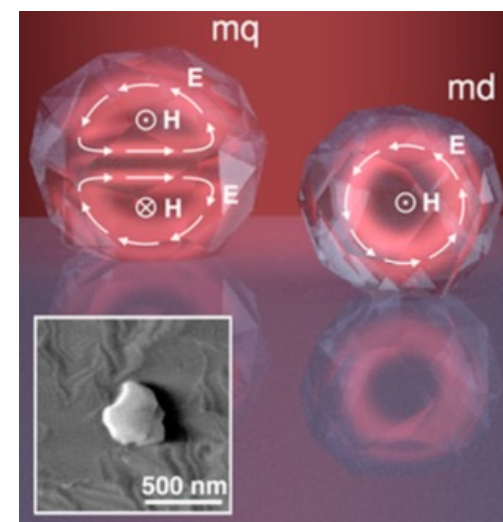
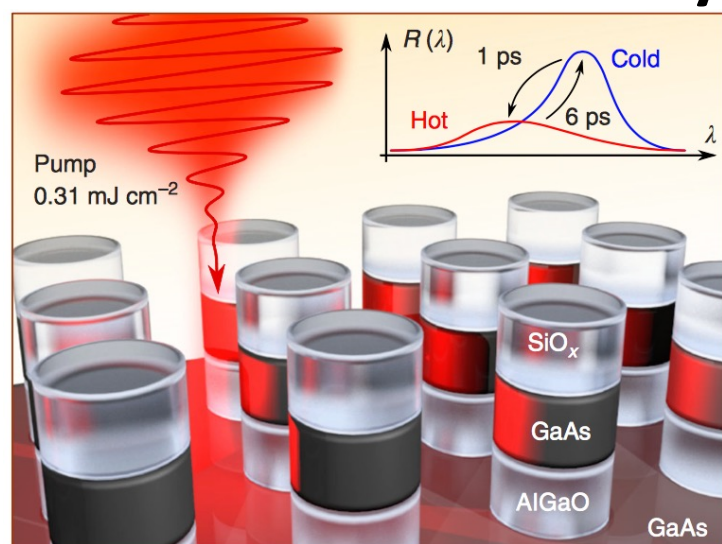


nanolab

<http://nanolab.phys.msu.ru>



Искусство управления светом

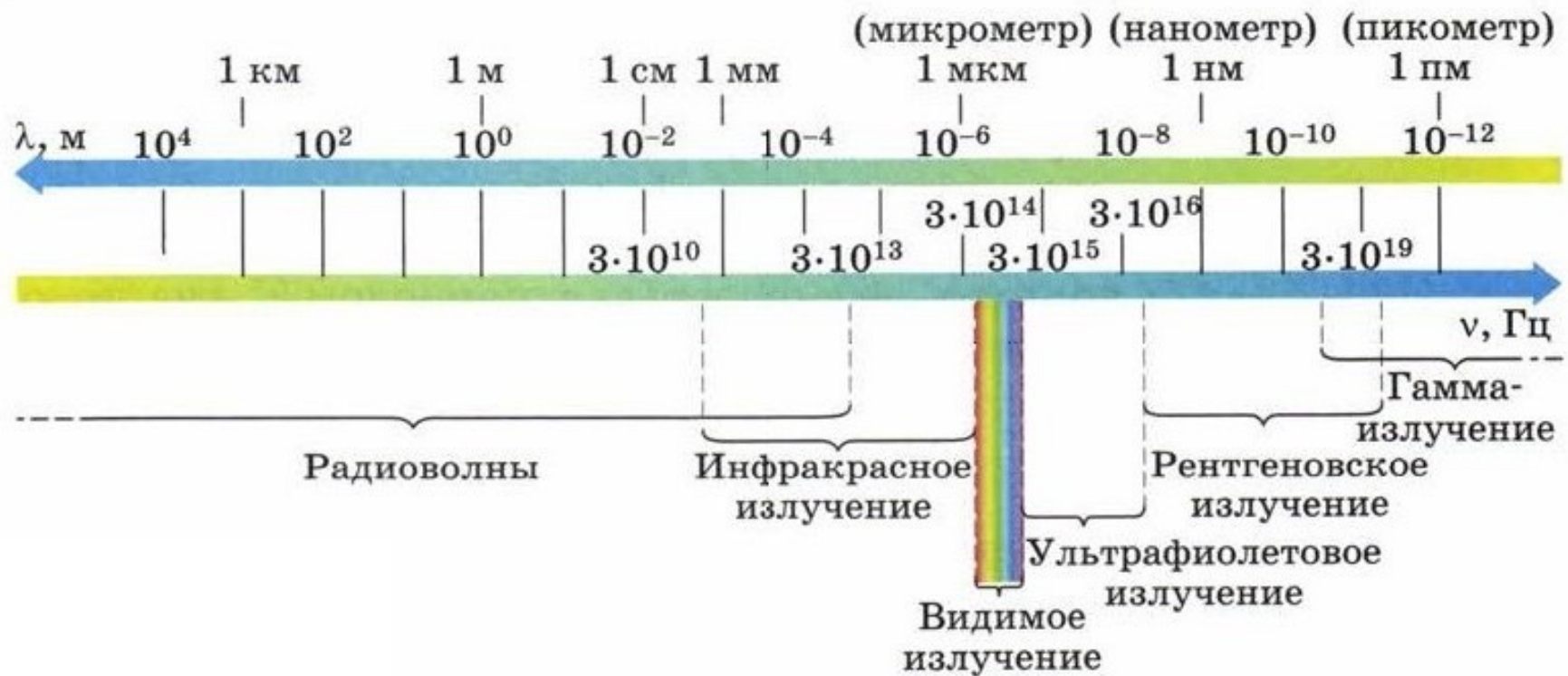


Андрей Федянин, физфак МГУ, член-корр РАН

СВЕТ и ТЬМА

фотоны в нашей жизни

Что такое свет?



Что является источником света?

Реликтовое излучение. 3K или 32 см



Что является источником света?
все нагретые тела

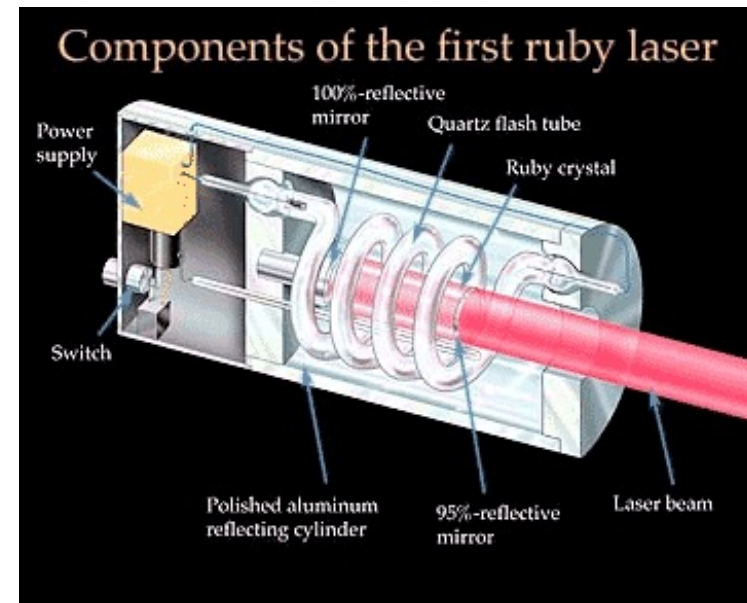
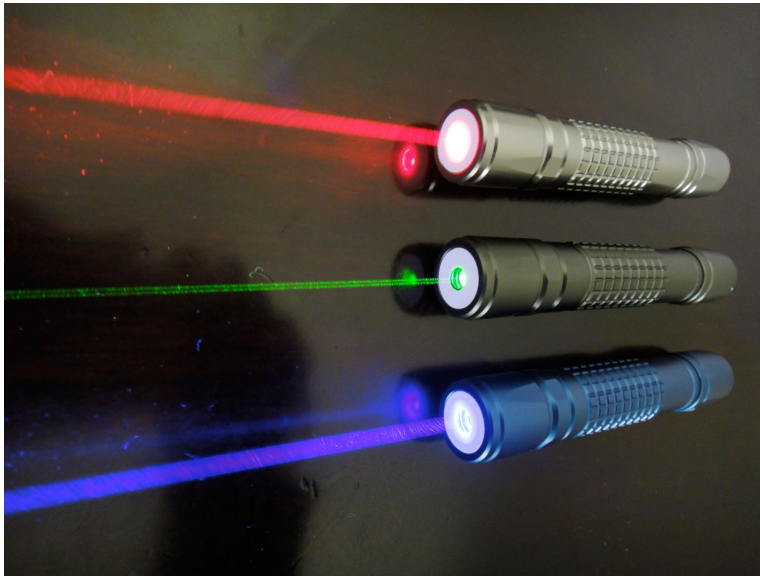


Что является источником света?

белые светодиоды



Что является источником света? лазеры



Нобелевская премия
(Басов, Прохоров, Таунс) — 1964

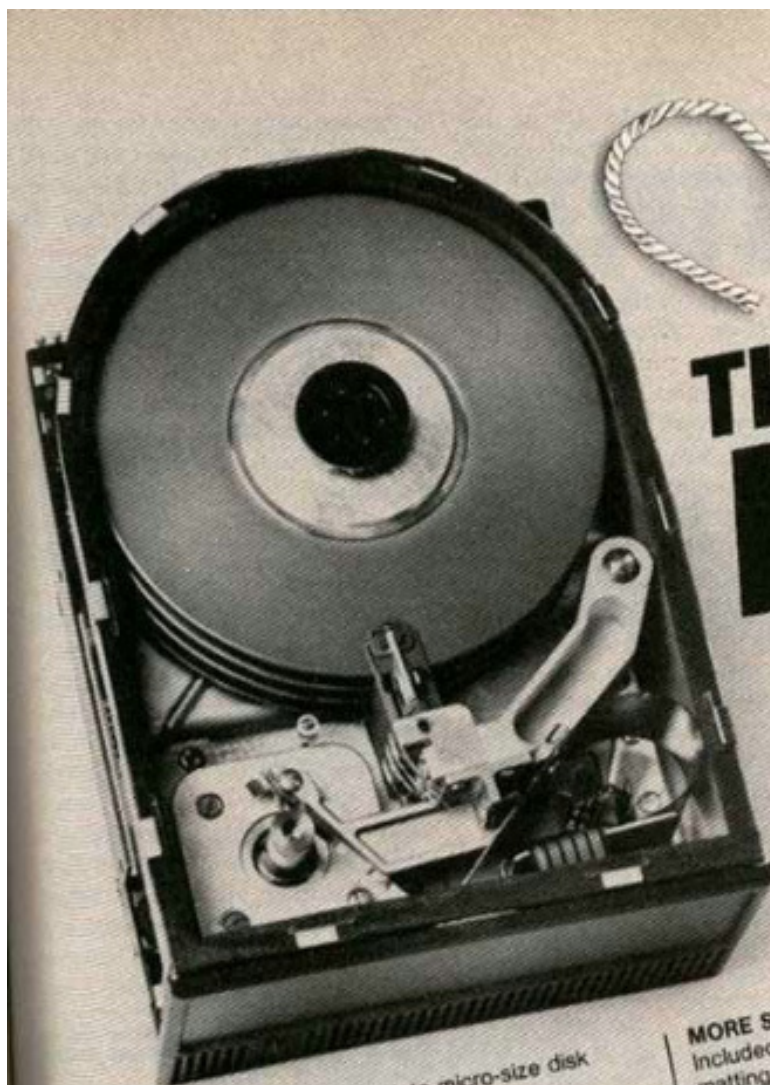
**Нанопотоника будущего –
системы обработки и передачи
информации**





Оптические телекоммуникации





\$3398

THE HARD DISK

**YOU'VE BEEN
WAITING FOR**

XCOMP introduces a complete micro-size disk subsystem with more...

- MORE STORAGE
- MORE SPEED
- MORE VALUE
- MORE SUPPORT

MORE SOFTWARE

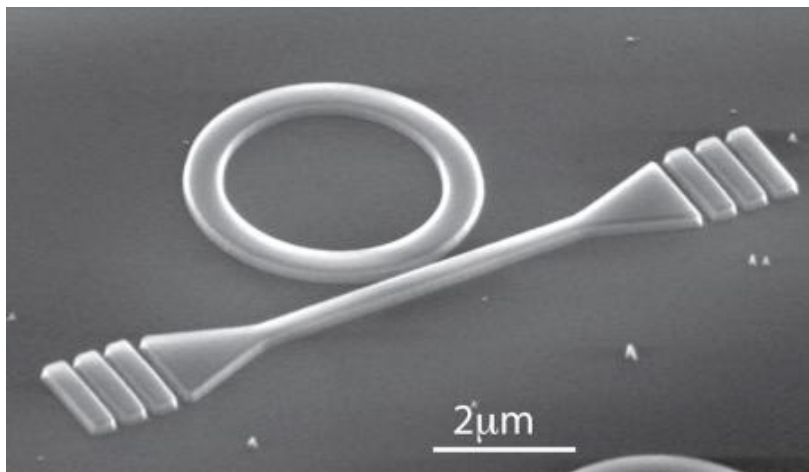
Included with the system is software for testing, formatting, I/O drivers for CP/M[®], plus an automatic CP/M driver attach program. Support software and drivers for MP/M[®] and Oasis[®] are also available. The sophisticated formatting program assigns alternate sectors for any weak sectors detected during formatting, assuring the lowest possible error rate — at least ten times better than floppies.

warranty on parts and

Нанопотоника

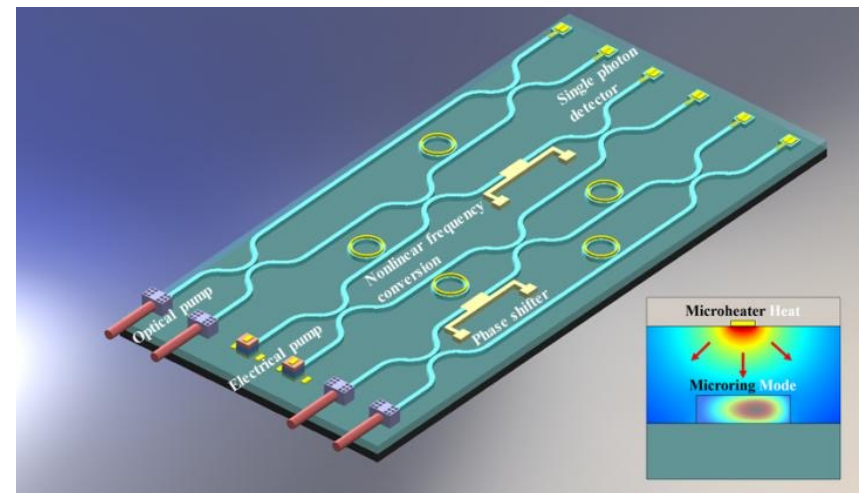
Подходы нанопотоники позволяют управлять распространением и излучением света на субмикронных масштабах

Элементы нанопотоники



- *Возможность миниатюризации элементов*
- *Усиление нелинейных эффектов за счет резонансов*
- *Сверхбыстрые эффекты*

Интегральные фотонные чипы



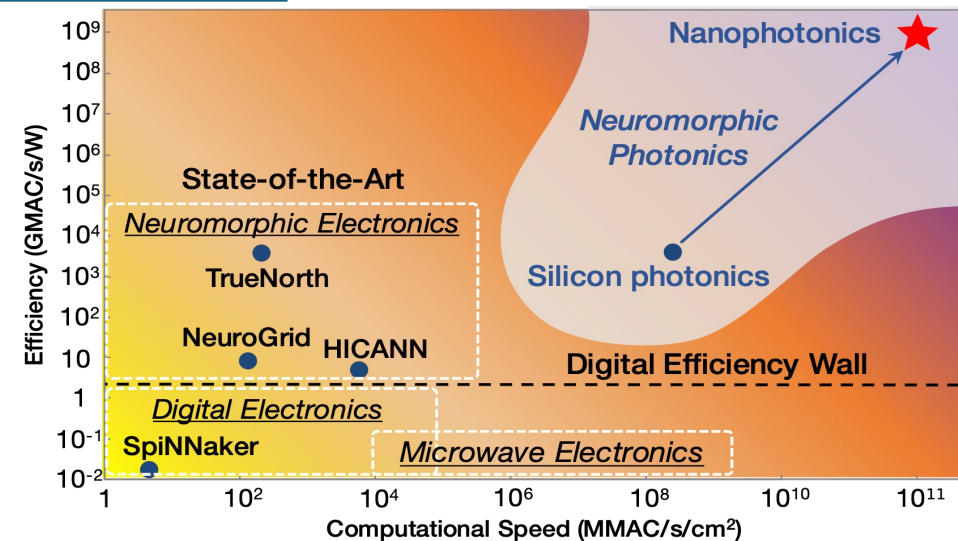
Xi Wu, Tianren Fan, Ali A. Eftekhari, and Ali Adibi, "High-Q microresonators integrated with microheaters on a 3C-SiC-on-insulator platform," *Opt. Lett.* 44, 4941-4944 (2019)

Подходы фотоники для вычислений

[arXiv:1801.00016](https://arxiv.org/abs/1801.00016)

За счет чего возможно ускорение вычислений?

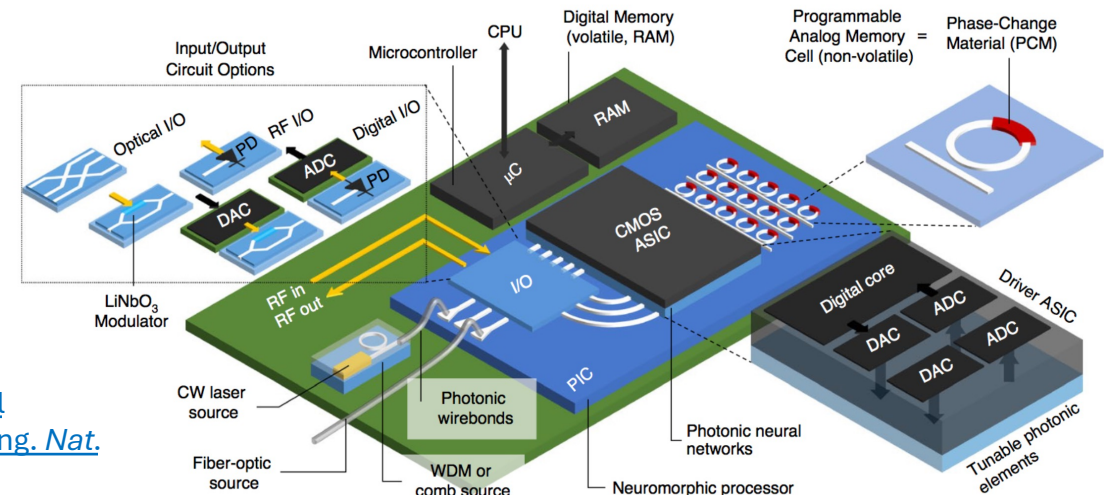
- Увеличение тактовой частоты
- Высокая параллельность
- Возможность 3D архитектур
- Внедрение элементов аналоговости

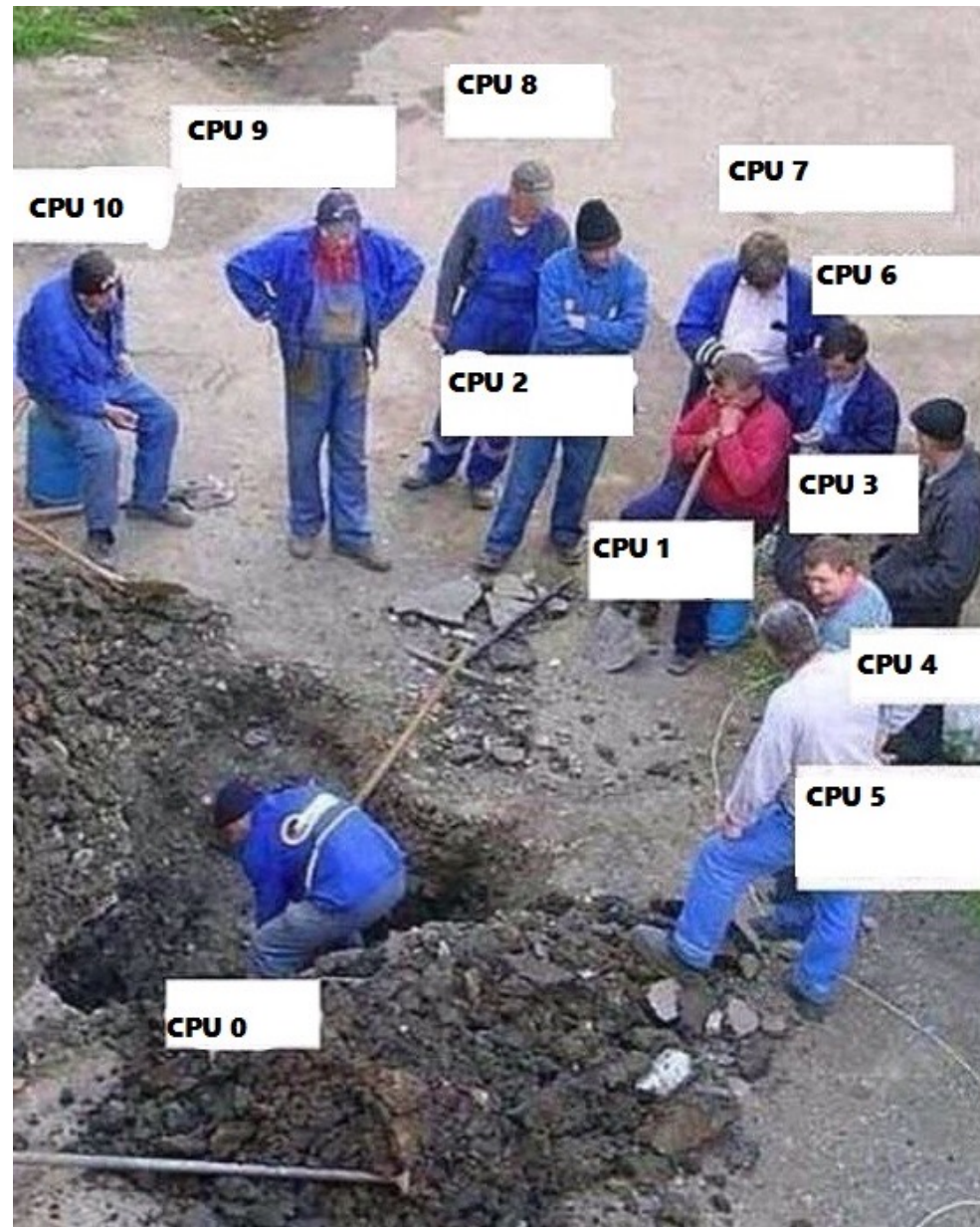


Возможности инструментов фотоники:

- Суммирование
- Нелинейность
- Генерация импульсов
- Частотная фильтрация
- Интегрирование
- Пороговые эффекты
- **Память**

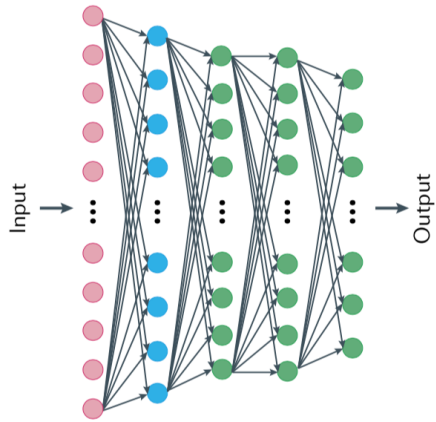
[Shastri, B.J.. et al. Photonics for artificial intelligence and neuromorphic computing. *Nat. Photonics* 15, 102–114 \(2021\).](#)



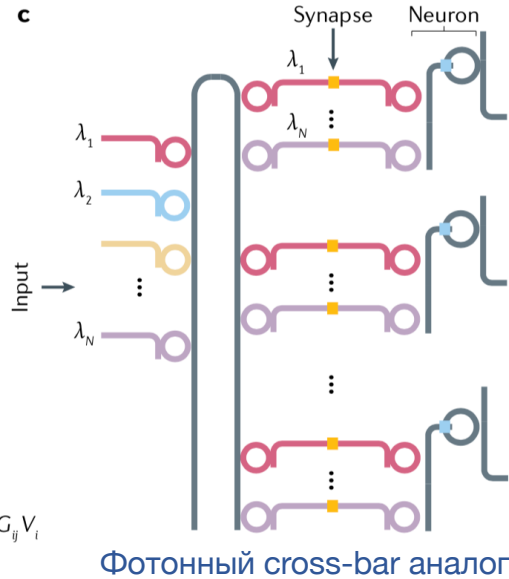
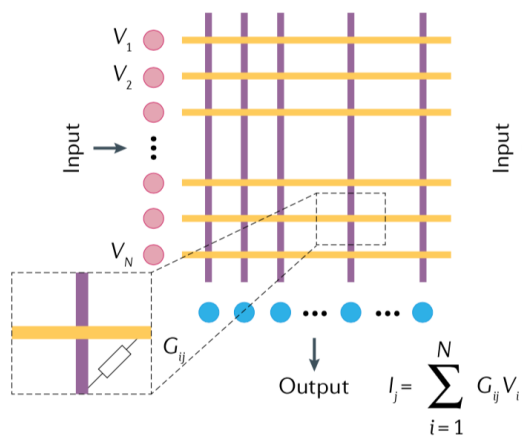


Платформы нейроморфных вычислителей

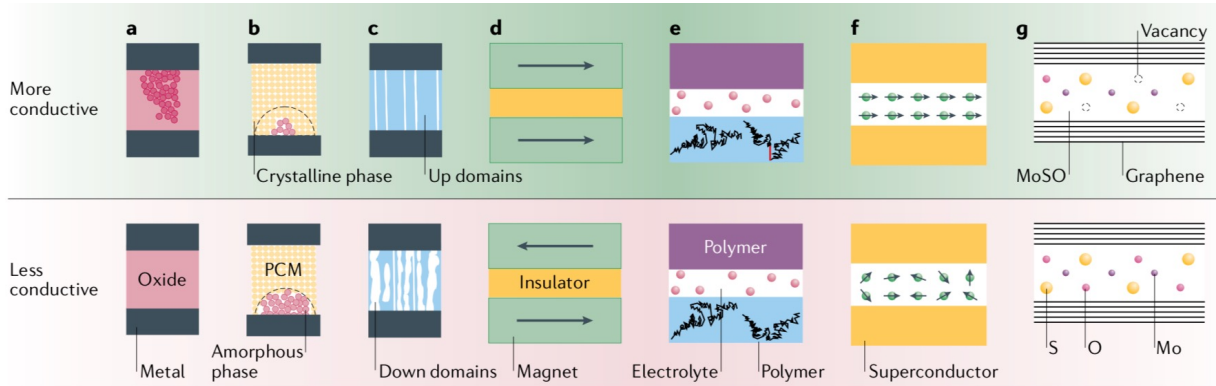
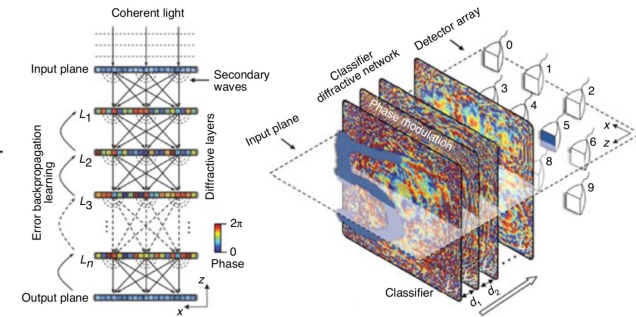
a Полносвязная нейронная сеть



b Cross-bar с мемристорами



Дифракционная нейронная сеть

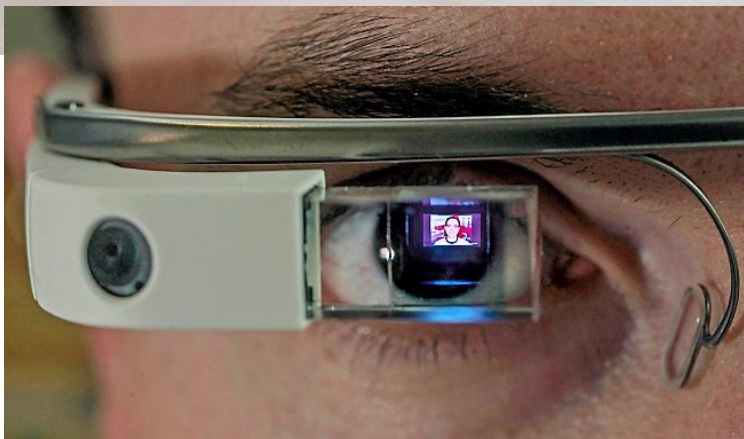


D. Marković et al., Nat. Rev. Phys. 4, 499–510 (2020)
B. Shastri et al., Nat. Photon. 15, 102–114 (2021)

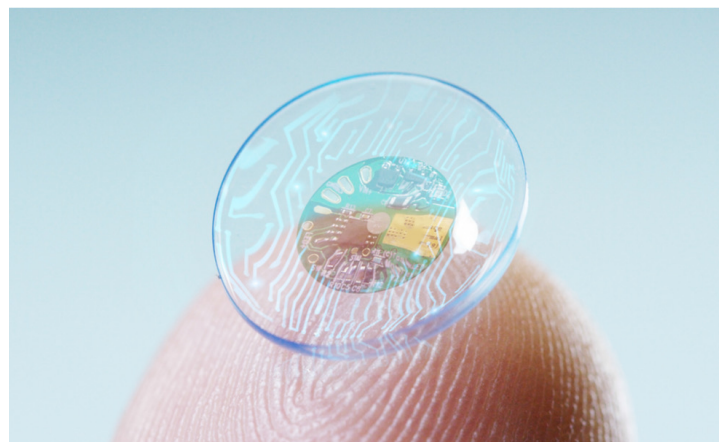
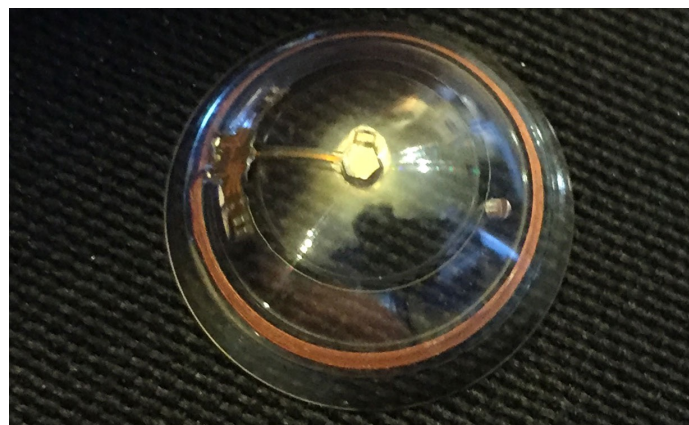
Нанопотоника будущего – дополненная
реальность

Дополненная реальность: очки и линзы

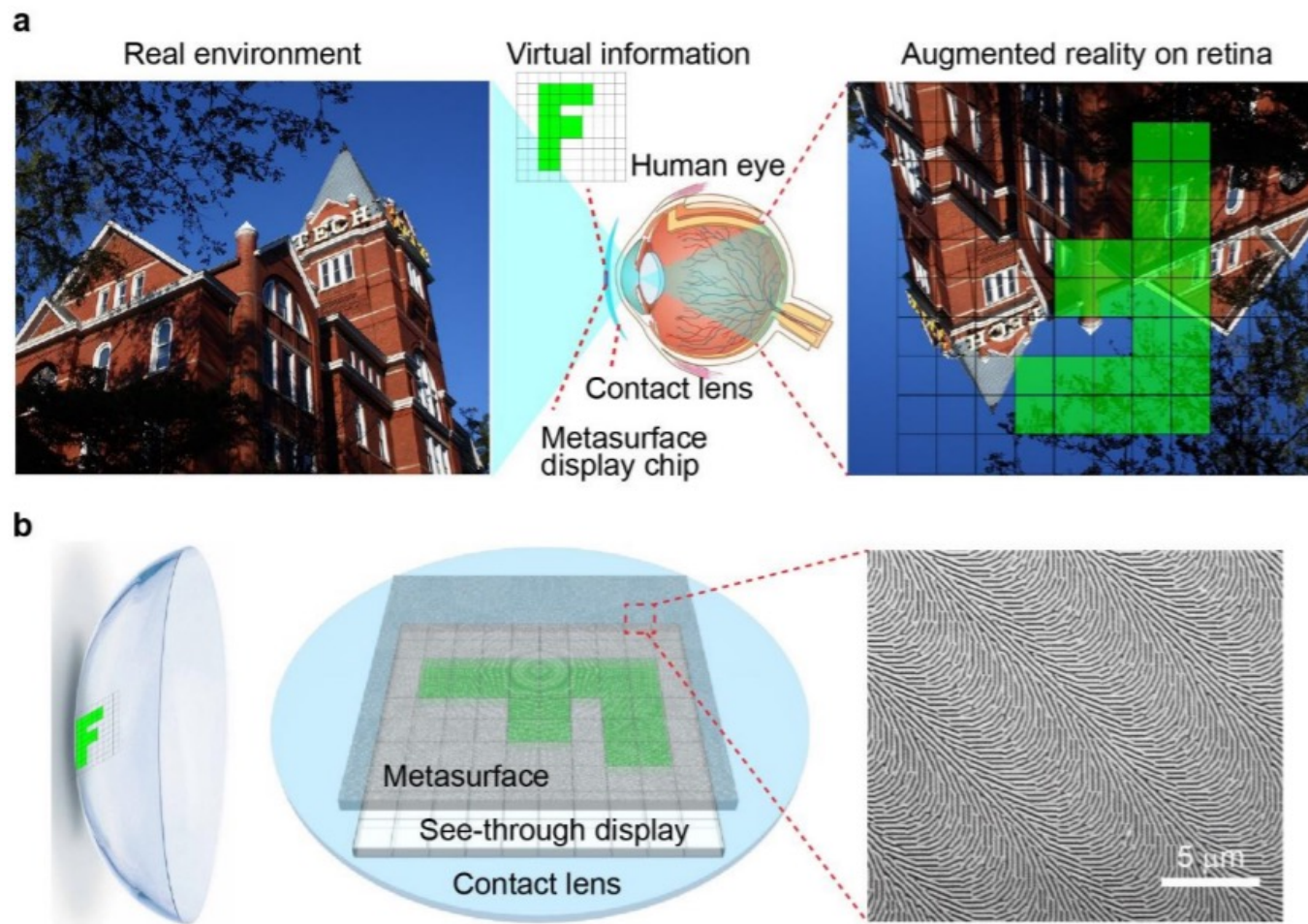
Google Glass



Mojo Lens



Дополненная реальность: метаповерхности



Метаматериалы
(от греч. «μετα-» — «за», «над»)

Метаматериалы

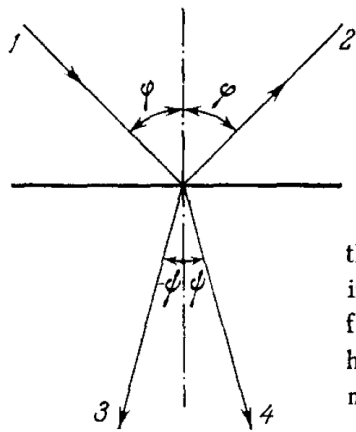
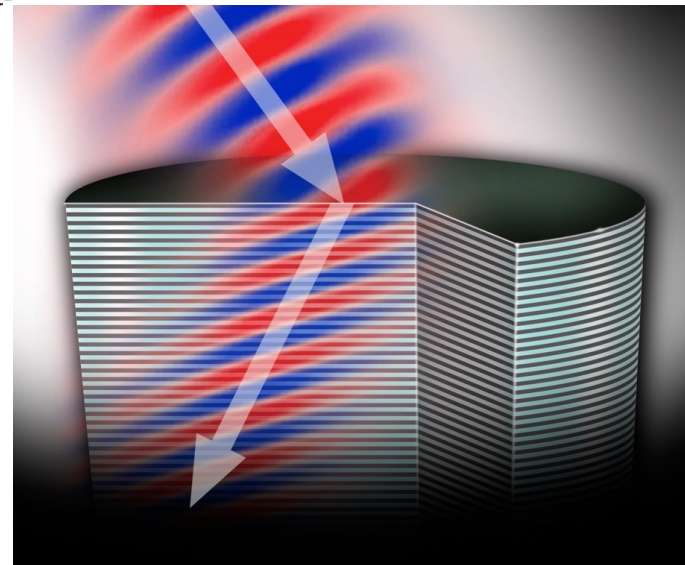
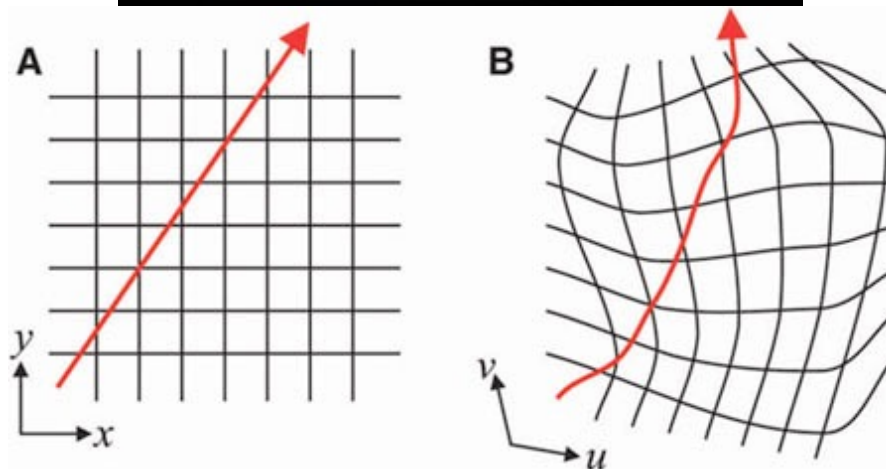
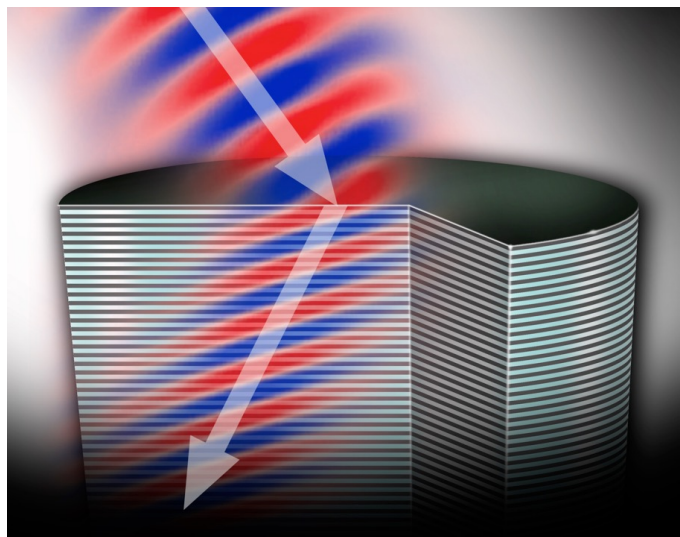


FIG. 3. Passage of a ray through the boundary between two media. 1 – incident ray; 2 – reflected ray; 3 – reflected ray if the second medium is left-handed; 4 – refracted ray if the second medium is right-handed.

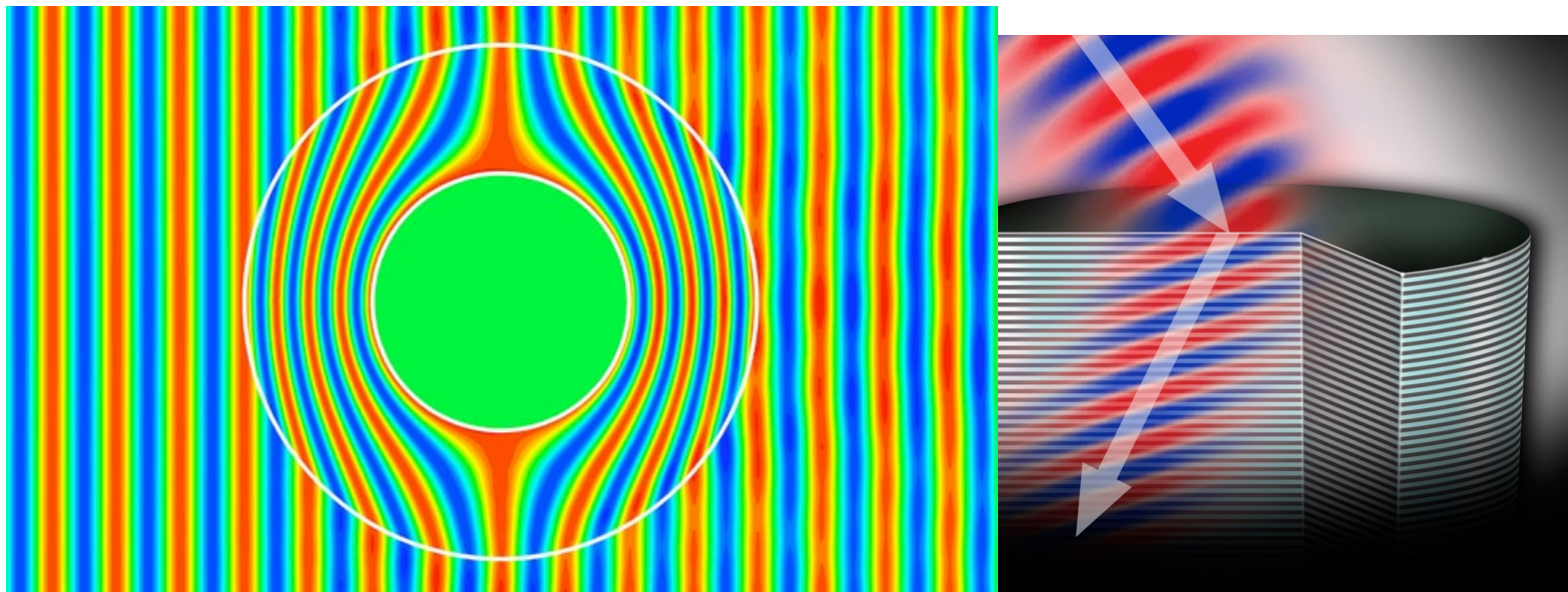
Леворукие среды: Виктор Веселаго (1968)



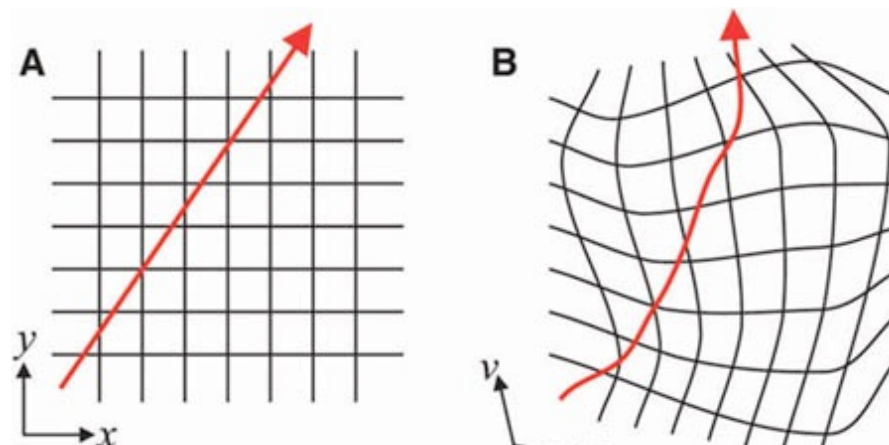
Метаматериалы: трансформационная оптика



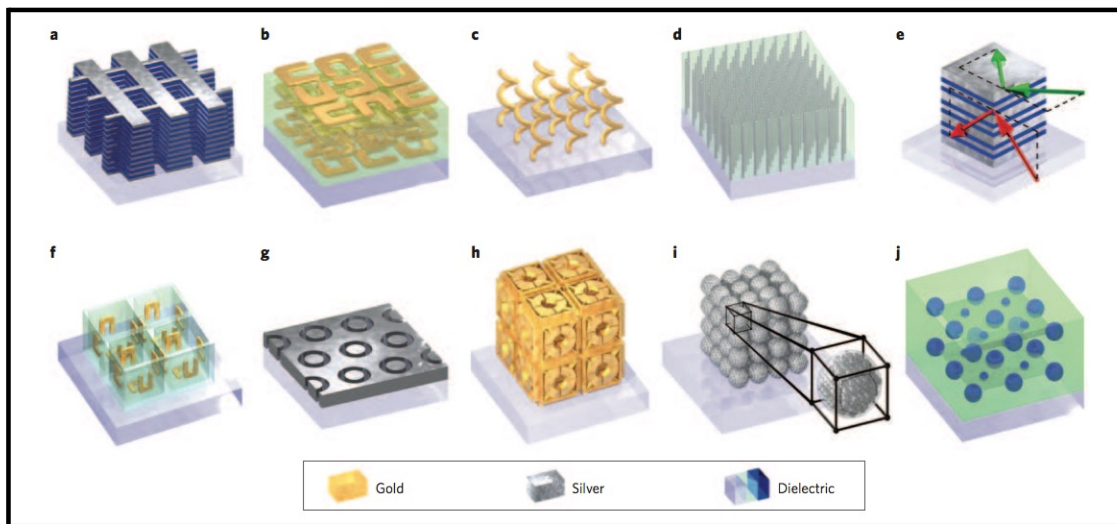
Метаматериалы: плащ-невидимка??



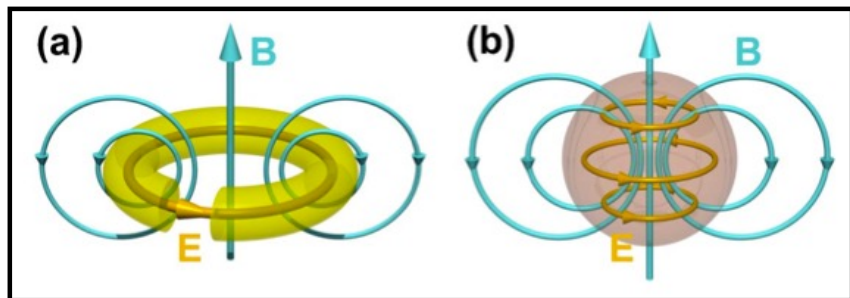
John Pendry (2000)



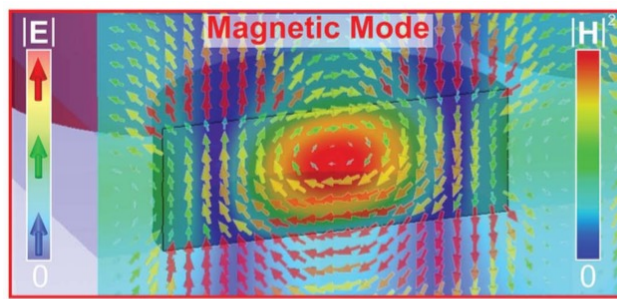
Диэлектрическая нанофотоника



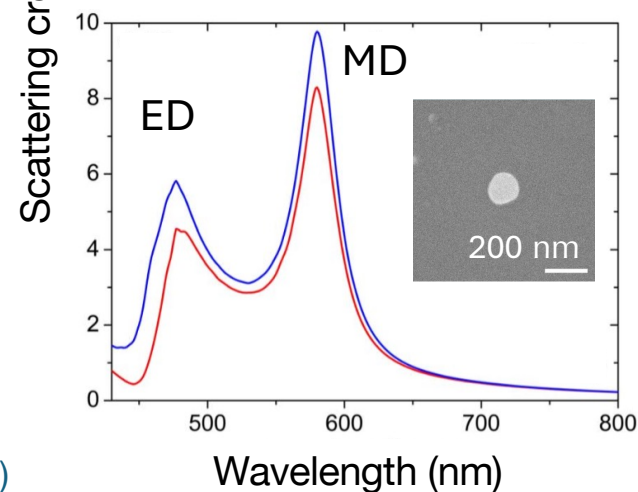
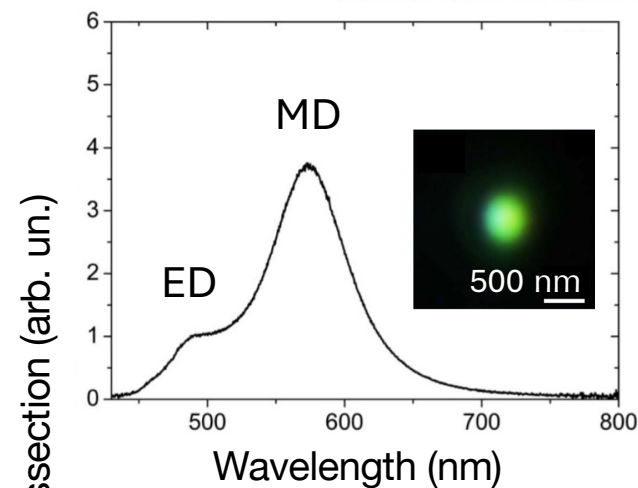
C.M. Soukoulis, M. Wegener, Nature Photonics 5, 523 (2011)



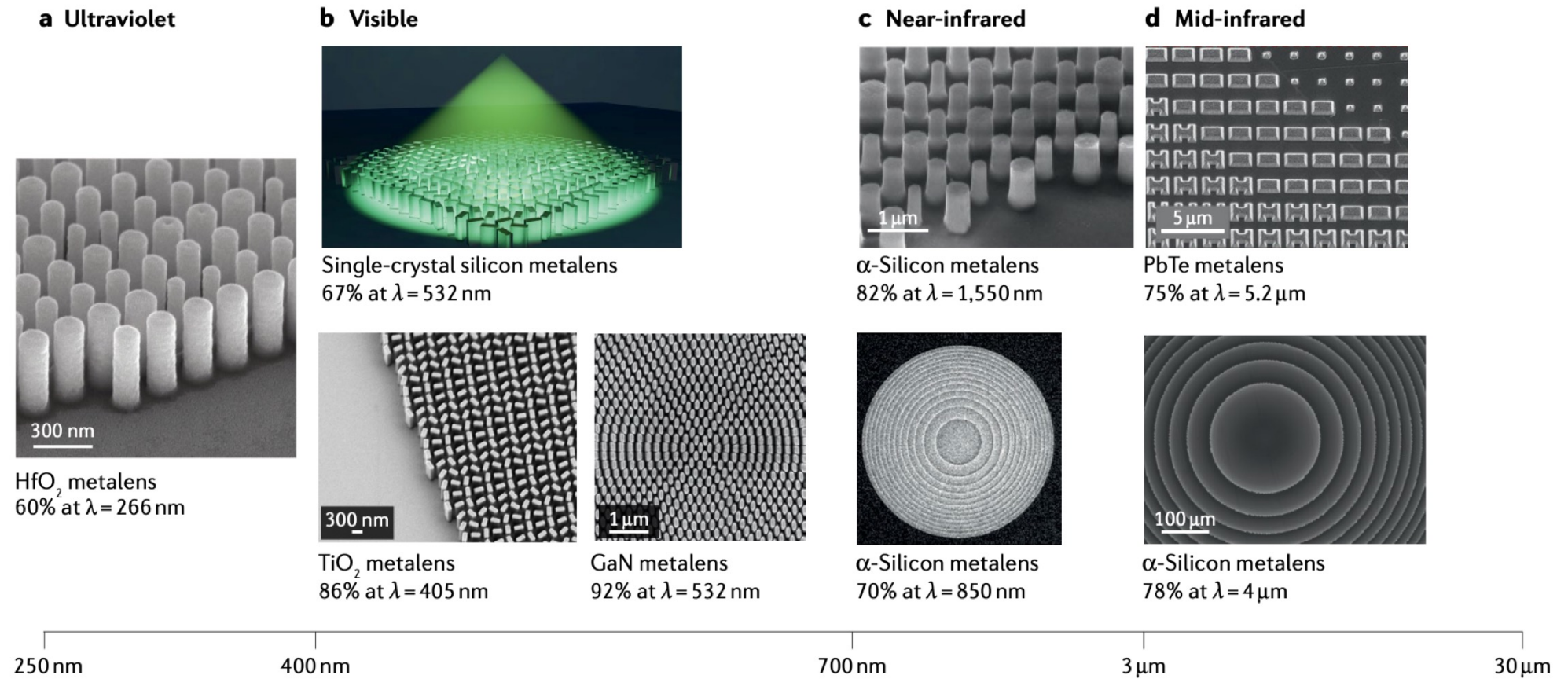
A. Kuznetsov et al., Sci. Rep. 2, 492 (2012)



M. Decker et al., Adv. Opt. Mat. 3, 813 (2015)



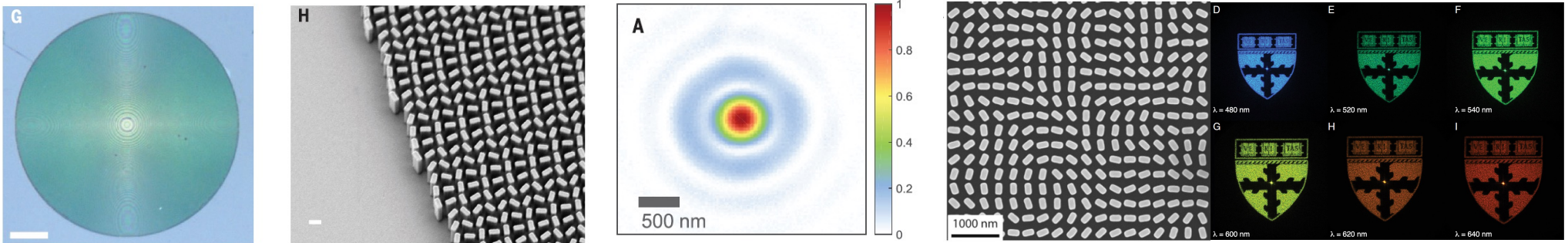
Оптические метаповерхности



W. Chen et al., Nat. Rev. Mater. (2020)

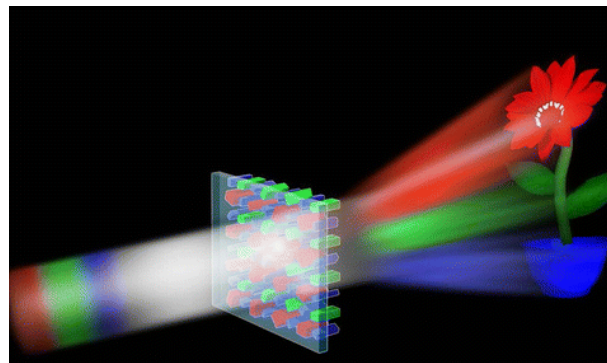
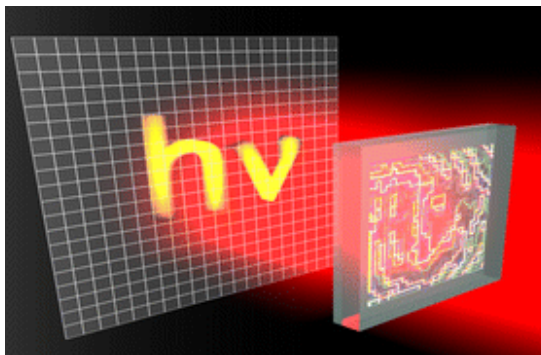
Метаповерхности и планарная оптика

- оптические метаповерхности – субволновые массивы наноантенн, с помощью которых можно создавать сверхтонкие амплитудно-фазовые профили любой сложности
- продемонстрированы различные структуры, от ахроматических металинз до голограмм и фазовых корректоров



M. Khorasaninejad et al., Science (2016)

R.C. Devlin et al., PNAS (2016)



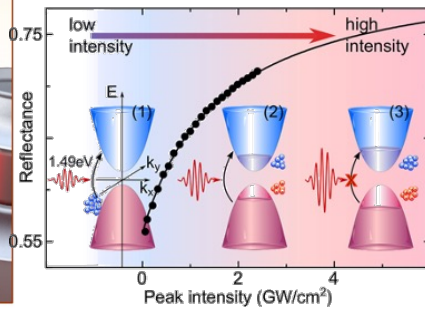
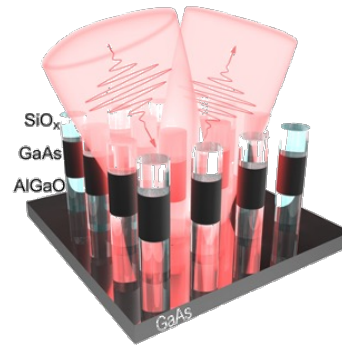
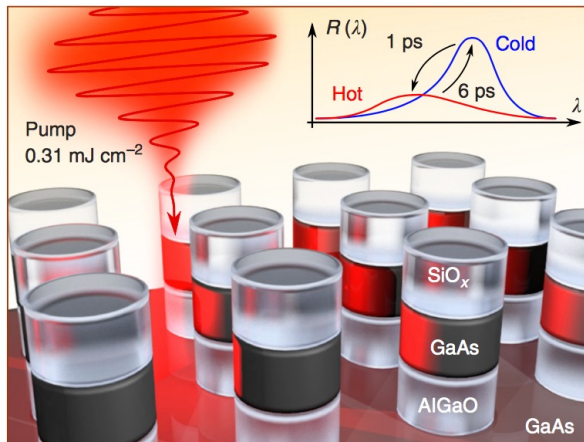
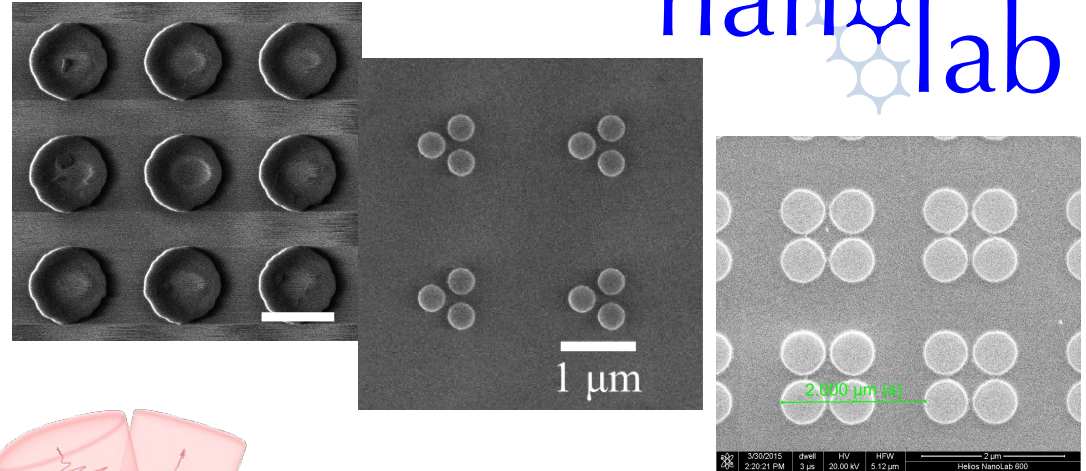
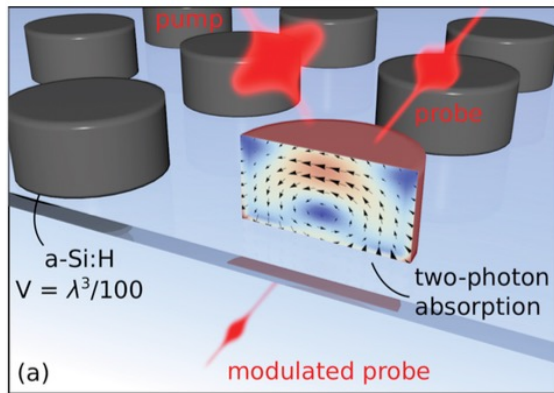
K.E. Chong et al., ACS Photonics (2016)

B. Wang et al., Nano Letters (2016)

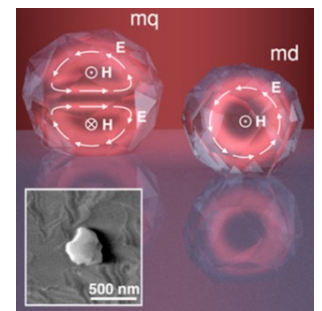
L. Wang et al., Optica (2016)

High-index metamaterials and metasurfaces

nanolab



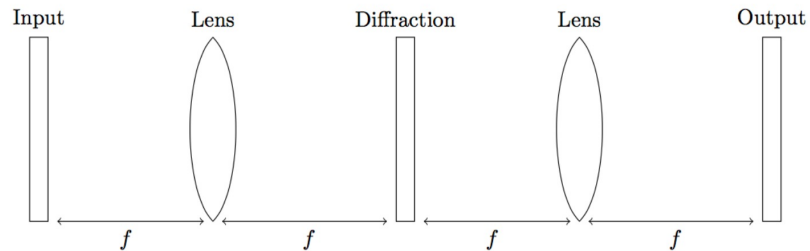
- Adv. Opt. Mater. **12**, 2302276 (2024)
- ACS Photonics **6**, 2797 (2019)
- ACS Photonics **6**, 189 (2019)
- Nat. Commun. **8**, 17 (2017)
- Nano Lett. **17**, 7629 (2017)
- ACS Photonics **4**, 1153 (2017)
- ACS Photonics **4**, 2312 (2017)
- ACS Photonics **3**, 1494 (2016)
- Sci. Rep. **6**, 28440 (2016)
- Nano Lett. **15**, 6985 (2015)



Нанопотоника будущего
– оптическое машинное обучение
и аналоговые вычисления

Подходы фотоники для применения в области вычислений

Преобразование Фурье



Использование оптического Фурье может снизить вычислительную сложность с $O(n^2)$ или $O(n \cdot \log n)$ до $O(1)$.

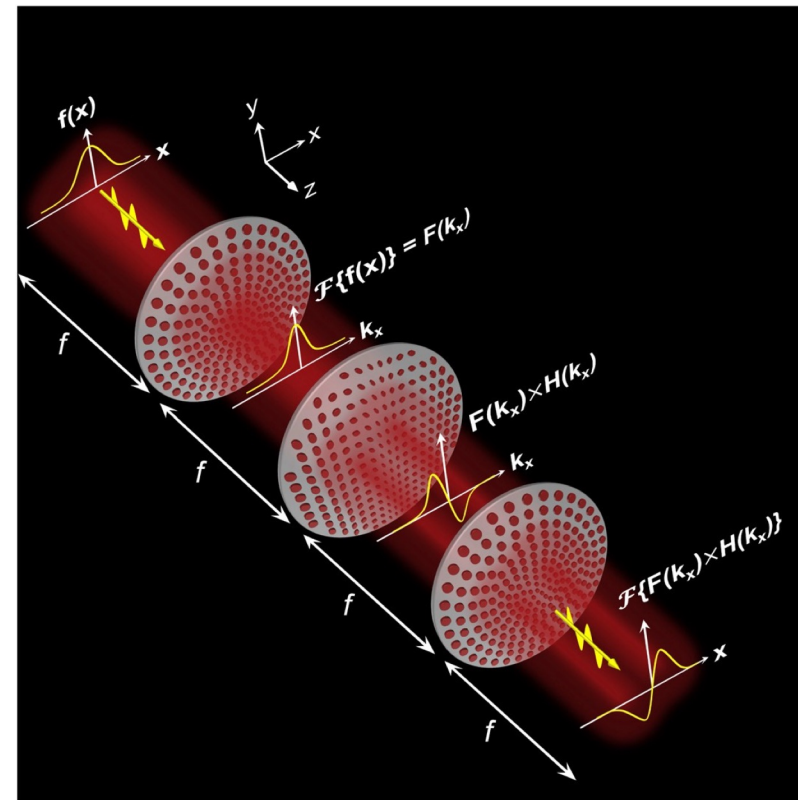
Дифракция согласно принципу Гюйгенса-Френеля:

$$U(x', y') = \int_P \int U(x, y) f(x - x', y - y') dx dy$$

$$\text{где } f(x - x', y - y') = \frac{z \exp(ikr_{01})}{i\lambda r_{01}^2}.$$

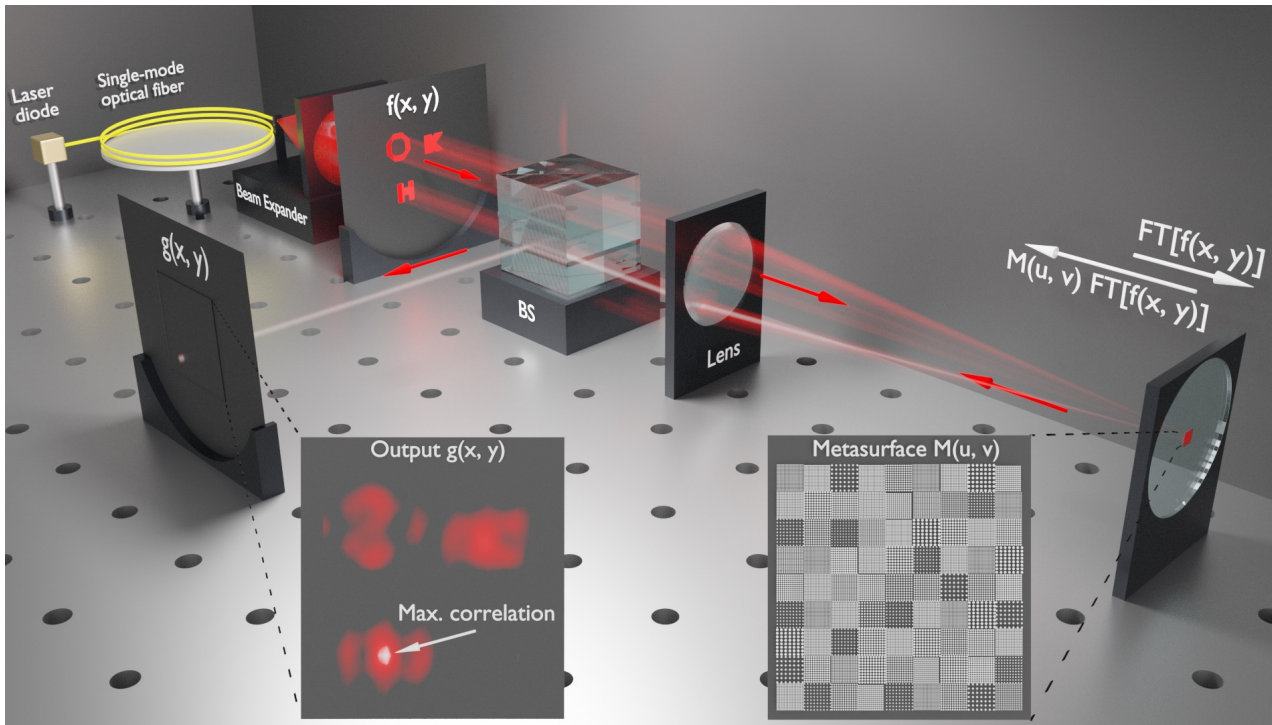
распределение поля $U(x, y)$ в свободном пространстве на расстоянии z равносильно применению операции свертки с фиксированным ядром.

Фурье-преобразования с помощью оптических метаповерхностей



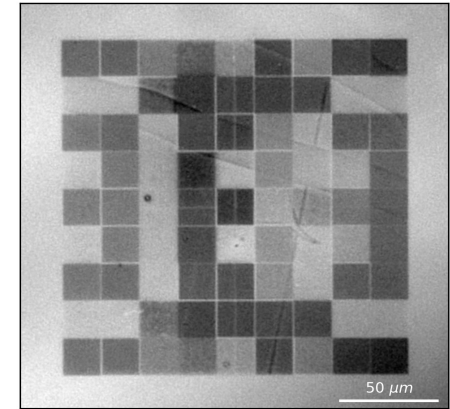
S. Abdollahramezani et al., Nanophotonics (2020)

Метаповерхности для Фурье-фильтрации

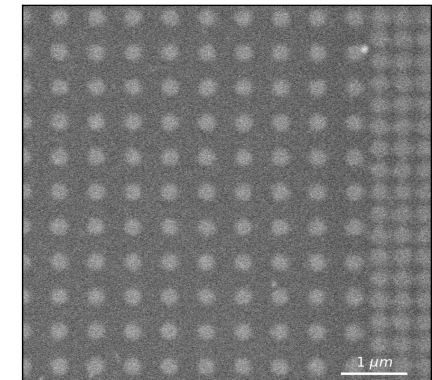


Излучение диодного лазера, прошедшее через амплитудную маску для формирования исходного изображения, пропускается через схему Фурье-фильтрации с кремниевой метаповерхностью в качестве амплитудно-фазового фильтра. Метаповерхность кодирует Фурье-образ опорного изображения (буква «Н») для поиска корреляции.

V.V. Yushkov et al,
ACS Photonics 11, 2506 (2024)



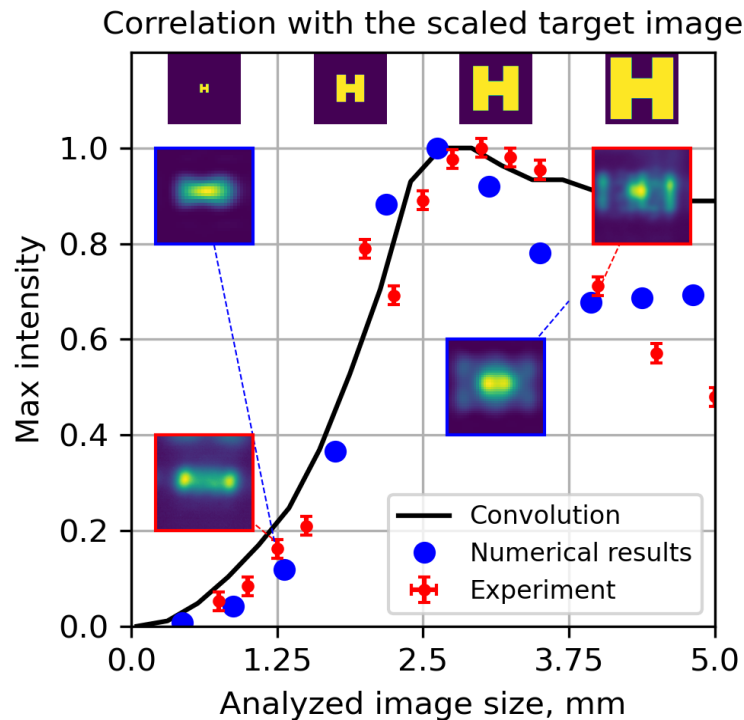
Изображение метаповерхности
в СВЕТЛОМ ПОЛЕ



РЭМ изображение части
метаповерхности

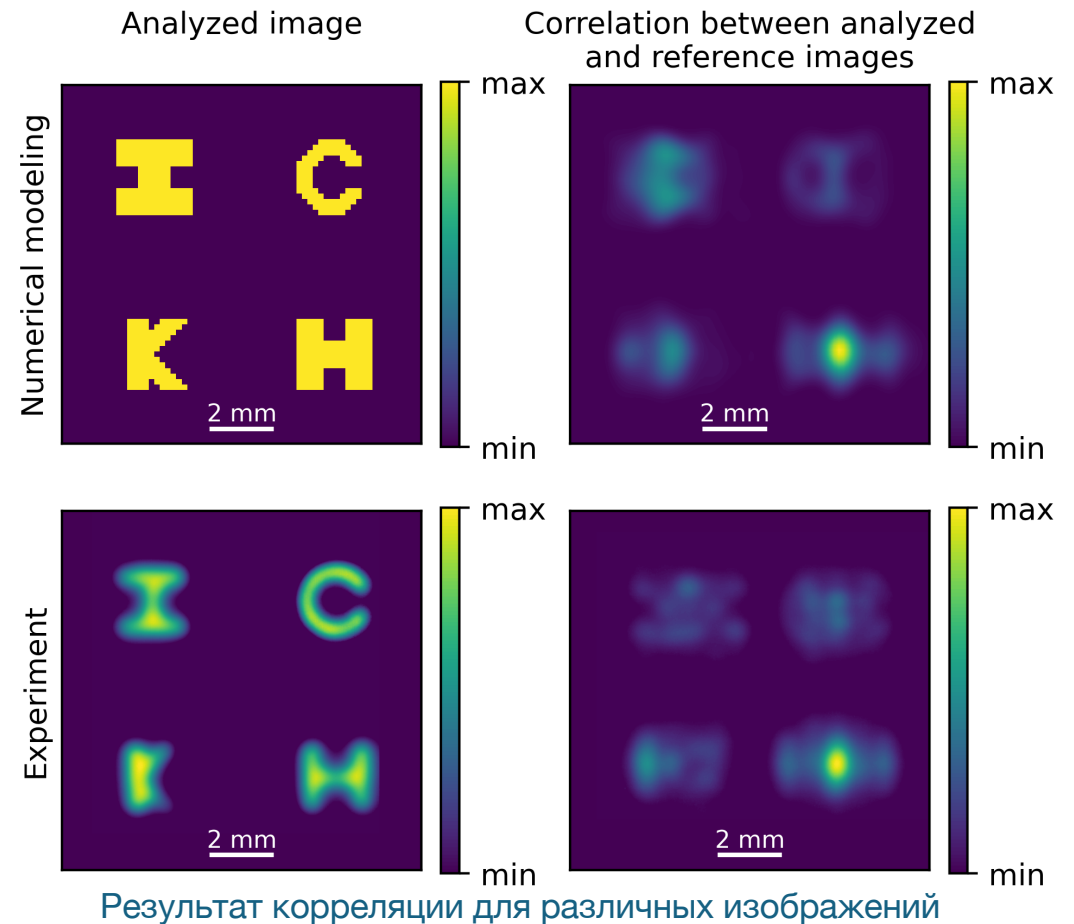
Результаты корреляционного анализа

- использование метаповерхности вместо SLM может существенно уменьшить размер устройства
- возможность независимого задания амплитуды и фазы дает преимущество в точности анализа



Эффективность корреляции при масштабировании
входного изображения

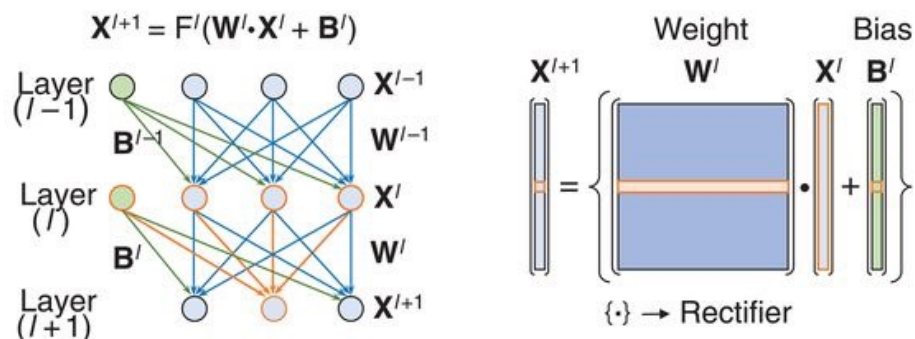
V.V. Yushkov et al,
ACS Photonics 11, 2506 (2024)



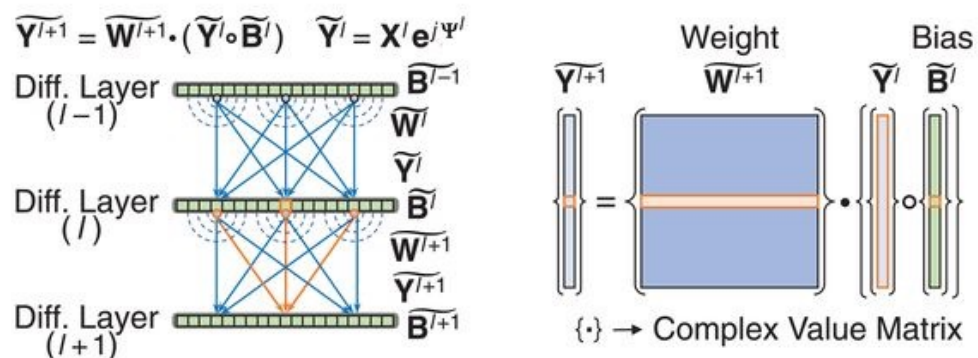
Результат корреляции для различных изображений

Дифракционные нейронные сети

Электронные нейронные сети



Дифракционные нейронные сети

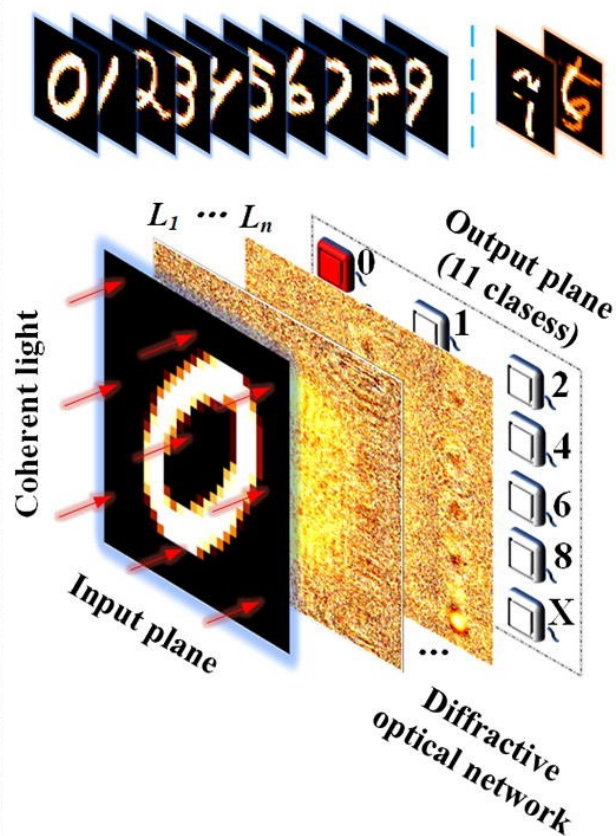


Преимущества:

1. Энергоэффективность: прохождение света через фазовую маску является аналогом умножения вектора на комплексное число или в случае структурированных масок на матрицу;
2. Масштабируемость: размер вычислительной системы определяется размером маски, операции умножения при этом легко распараллеливаются;
3. Компактность: при работе в видимом диапазоне характерный размер элемента составляет сотни нанометров;
4. Простота изготовления: матрица, на которую происходит домножение, определяется фазовой маской, вносимой в пучок, которую в пассивном случае можно легко изготавливать и заменять;
5. КМОП-совместимость: структуру можно легко совмещать и существующими технологиями и использовать в качестве преобразующего устройства.

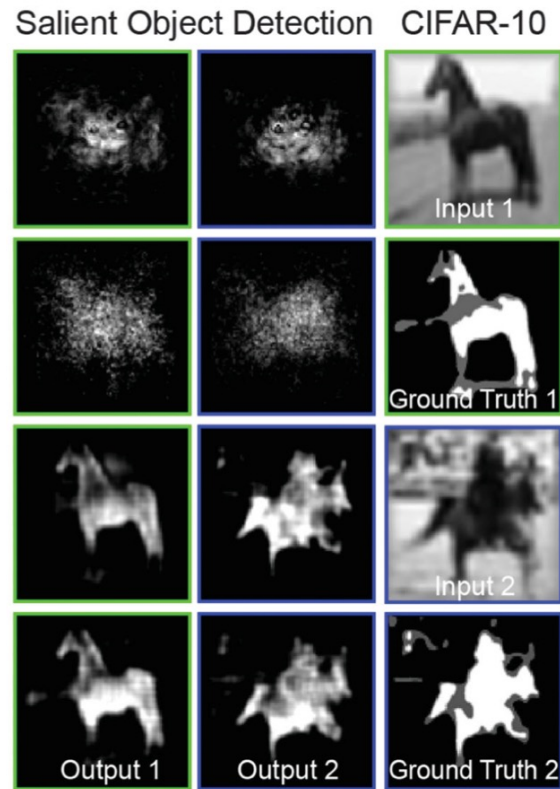
Дифракционные нейронные сети: применения

Задачи классификации



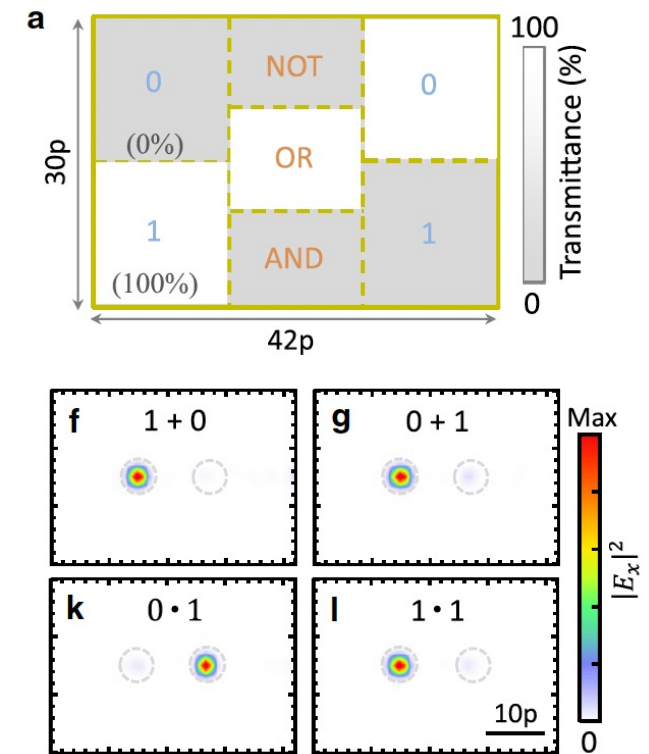
Chen, H., et al. *Engineering*, 7(10), 1483-1491 (2021)

Детектирование объектов



Yan, T., et al. *Physical Review Letters*, 123(2), (2019)

Реализация логических операций



Qian, C., et al. *Light: Science & Applications*, 9(1), 59 (2020).

Вычисления и искусственный интеллект

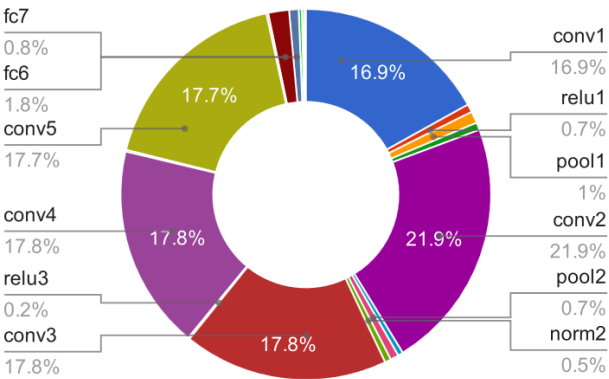
В основе вычислений лежит математическая операция перемножения матриц

$$D = A \cdot B$$

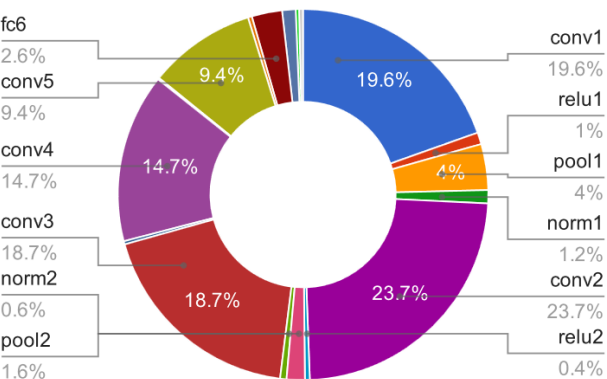
При больших размерностях матриц данный процесс становится **затратный** по машинному времени

Распределение времени вычисления отдельных слоев DNN (Deep Neural Networks)

GPU Forward Time Distribution

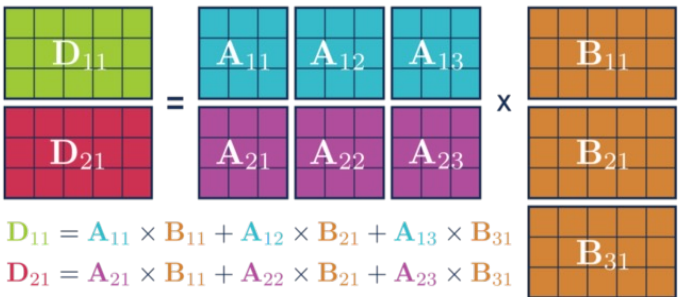


CPU Forward Time Distribution



Yangqing Jia Technical Report No. UCB/EECS-2014-93 (Berkley)

Параллельное вычисление



Затрачено времени на произведение матрицы на матрицу

92,1%
(GPU)

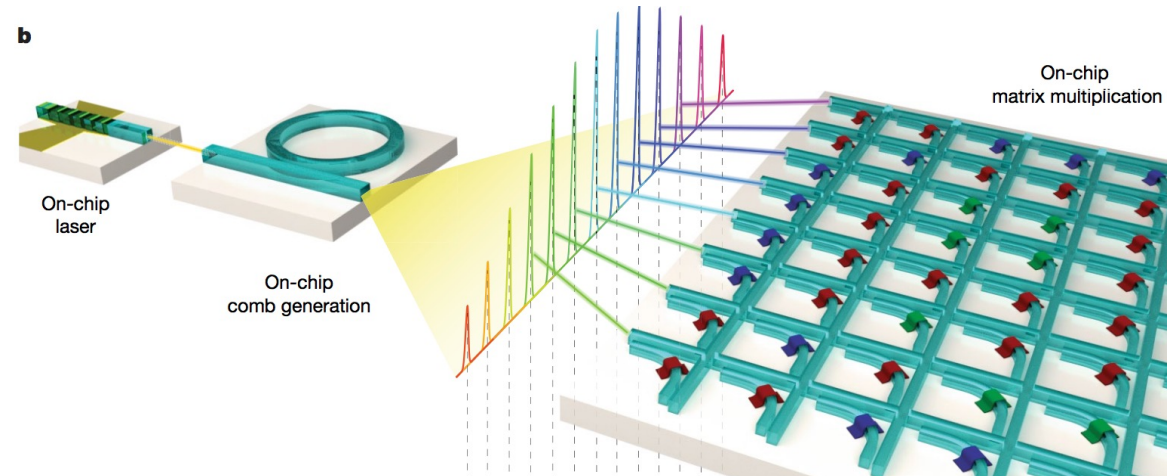
86.1%
(CPU)

Вывод: задача построения матричного вычислительного ядра на принципах фотоники

Оптические тензорные вычисления: фотонная матрица на основе cross-bar-архитектуры

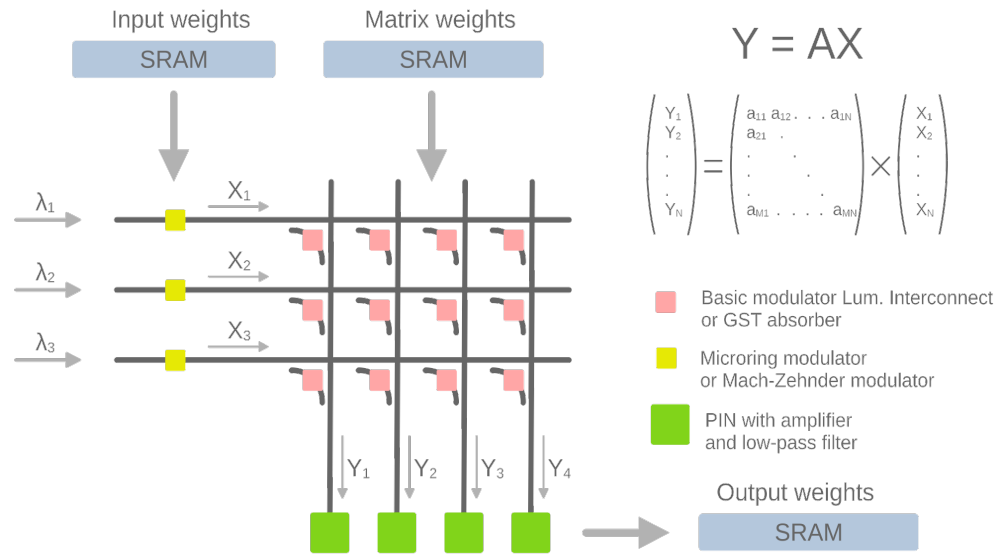
Стартап Salience Labs (2022)

- Операция свертки вектора с ядром матрицы 8x8
- WDM мультиплексирование: параллельная обработка сразу нескольких входных векторов (5 бит)
- Оценка до 10^{15} MAC операций в секунду при энергопотреблении около 20 фДж на операцию (учитывая только оптические потери)

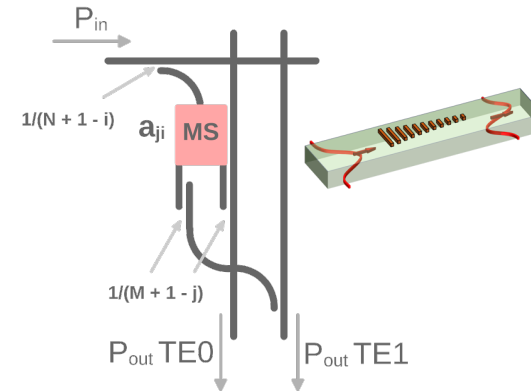


[Feldmann, J., Youngblood, N., Karpov, M. et al. Parallel convolutional processing using an integrated photonic tensor core. *Nature* 589, 52–58 \(2021\)](#)

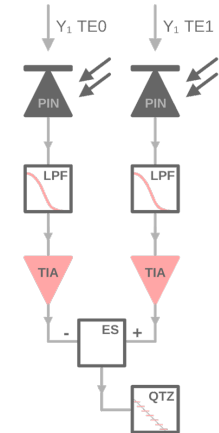
Модель фотонного вычислительного ядра



Схематическое изображение фотонного вычислителя

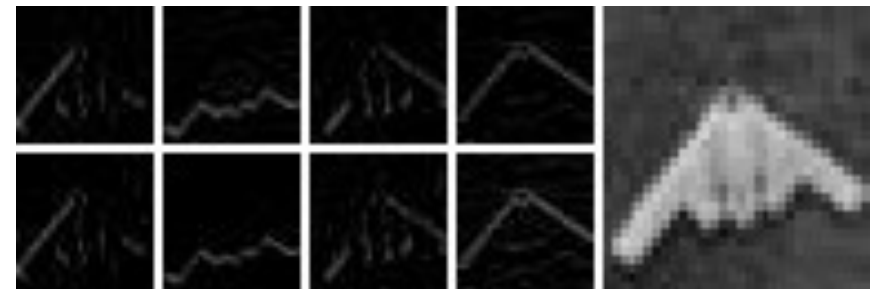


Весовой элемент на основе метаповерхности (MS)



Балансный фотодетектор с электрической обвязкой

- построена численная модель основе реконфигурируемых метаповерхностей из материалов с фазовым переходом
- проведена оптимизация параметров балансного фотодетектора на выходе схемы для минимизации битовых ошибок при вычислениях
- численно продемонстрирована операция свертки с фильтром для выделения границ на примере изображений из базы CIFAR-10, закодированных амплитудой оптического сигнала на входе



пример свертки с помощью построенной модели

Занимайтесь нанофотоникой!

nanolab.phys.msu.ru

fedyanin@nanolab.phys.msu.ru

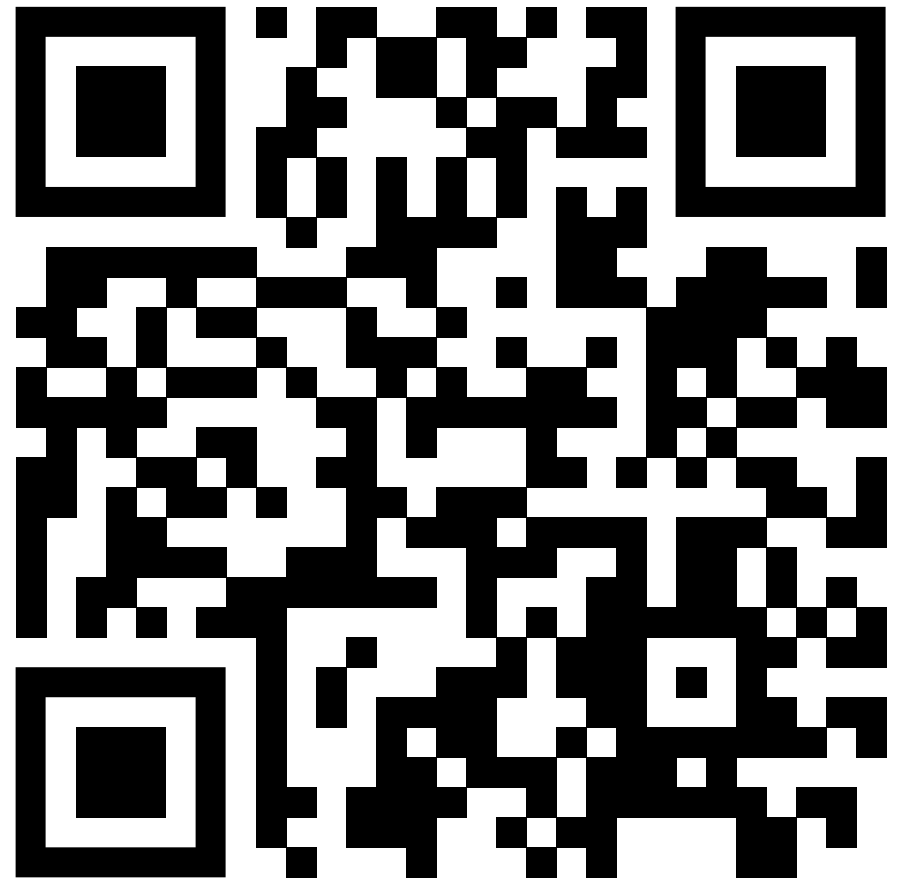


- 41 студент
 - 10 аспирантов
 - 15 сотрудников
- <http://nanolab.phys.msu.ru>

кафедра нанофотоники, ФизФак МГУ

Где нас искать?

- [http:// nanolab.phys.msu.ru](http://nanolab.phys.msu.ru)
- [http:// photonics.phys.msu.ru](http://photonics.phys.msu.ru)
- [https:// additivemsu.ru](https://additivemsu.ru)



кафедра нанофотоники, ФизФак МГУ