

Разработка алгоритма управления интегральной оптической структурой на основе многомодовых интерферометров методами машинного обучения

Беляева Вероника Сергеевна

Научный консультант: Беляков Никита Викторович

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Биленко Игорь Антонович (кафедра физики
колебаний, Физический факультет МГУ)



Содержание

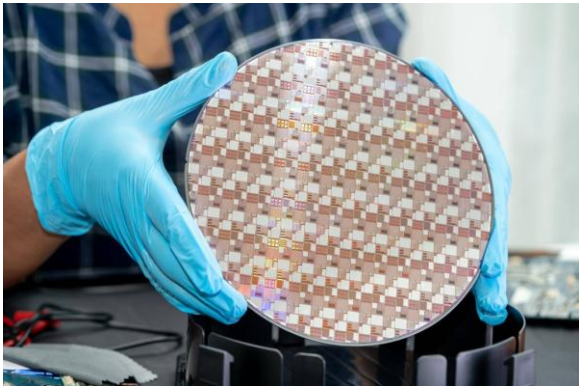
- Введение
 - Мотивация работы
 - Целевая структура
 - Постановка задачи
- Рассмотрение одного элемента
 - Параметризация единичного слоя
- План и экспериментальные данные для полной структуры
- Заключение



Введение



Мотивация

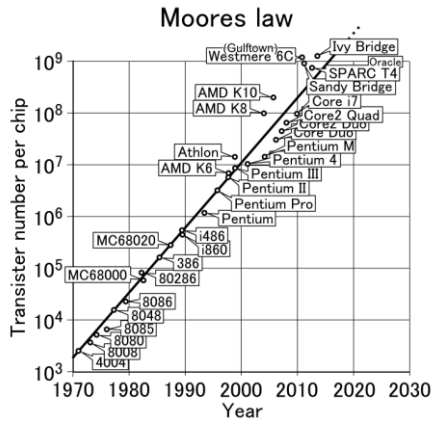


Основные проблемы, связанные с использованием вычислителей на основе полупроводников для нейронных сетей:

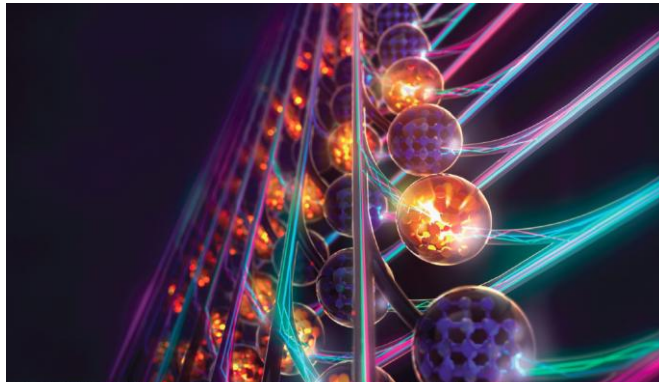
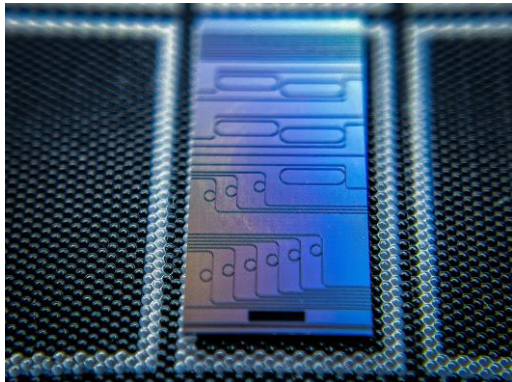
- 1. Вычислительные мощности и стоимость их использования
- 2. Закон Мура

Model	Params	C[PF/s-days]	GPUs for 30-day run
GPT-3 3B	3B	50	13
GPT-3 (low)	175B	2 500	667
GPT-3 (high)	175B	10 000	2 667

Brown, Tom, et al. *Advances in neural information processing systems* (2020)



Интегральная оптика

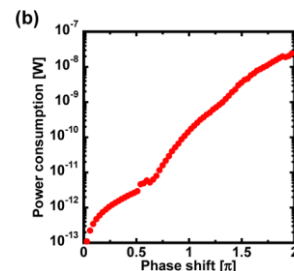
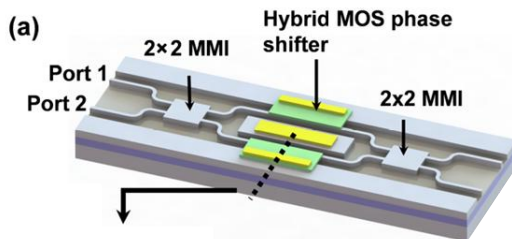


Фотонные процессоры могут устранить «бутылочные горлышки» современных электрических вычислительных систем.

Скорость вычислений:

До 100 Гбит/с

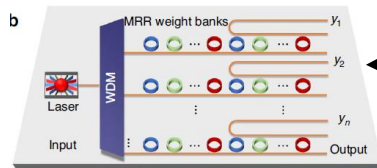
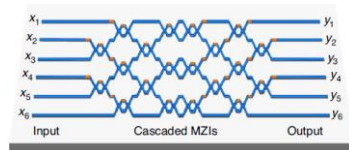
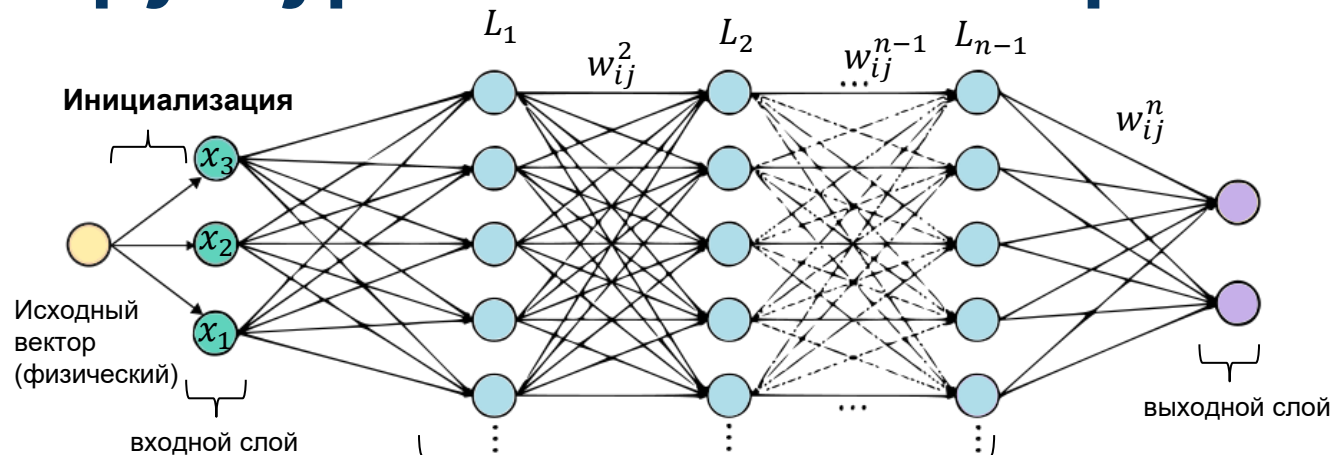
Patterson, Deborah, Isabel De Sousa, and Lousi-Marie Achard. *Chip Scale Rev* (2017)



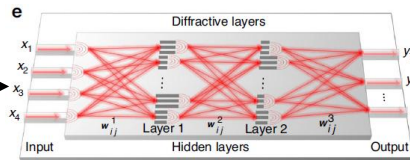
Li, Q., et al. *Optics express* (2018)



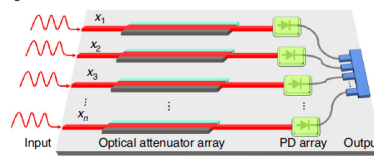
Структура оптической нейросети



скрытые слои

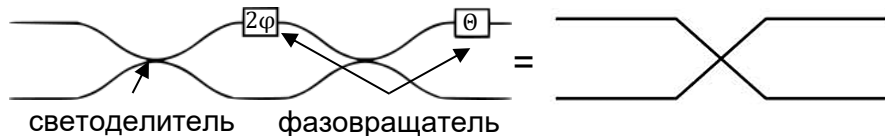


Fu, Tingzhao, et al.
Light: Science & Applications (2024)



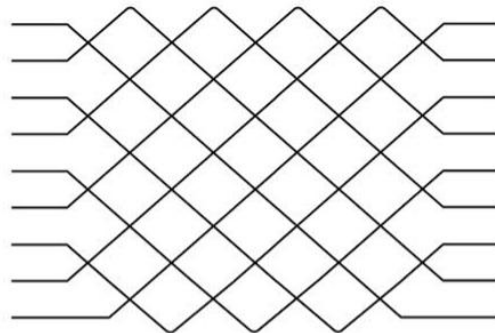
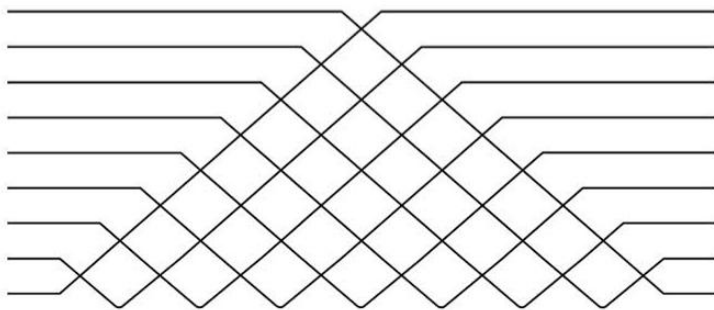
Универсальное унитарное преобразование

Элементарный building block



$$\begin{pmatrix} k'_1 \\ k'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{i\theta} \sin(\varphi) & e^{i\theta} \cos(\varphi) \\ \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \end{pmatrix}$$

Алгоритм декомпозиции



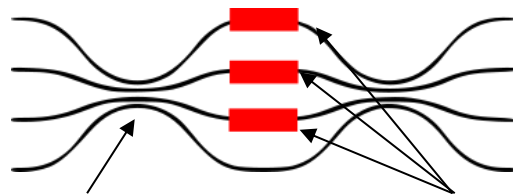
Reck, Michael, et al. *Physical review letters* (1994)

Clements, William R., et al. *Optica* (2016)

Необходимое количество элементов светоделения в обеих схемах: $\frac{N(N-1)}{2}$, где N – размерность рассматриваемой матрицы.

Альтернативное решение

Использовать сложную структуру для конструирования произвольного унитарного преобразования.



Многомодовый интерферометр (MMI)

Фазовращатели

Тогда универсальная схема для четырёхмодовой структуры с использованием многоканальных MMI



Количество необходимых светоделительных элементов линейно пропорционально количеству входов.



Цель работы

Экспериментально охарактеризовать и параметризовать, используя оптимизационные алгоритмы ML, четырёхпортовую структуру с линейными элементами в виде четырёхпортовых многомодовых интерферометров и фазовращателей для возможности реализации универсального унитарного преобразования.



Задачи:

- Параметризация единичной оптической структуры с учетом кросс-толка элементов с использованием данных эксперимента
- Проведение экспериментальной характеристики интегрально-оптической структуры на основе нитрида кремния
- Выполнение ML-оптимизации параметров системы для настройки оптической системы
- Экспериментальная валидация полученной параметризации по метрике фиделити



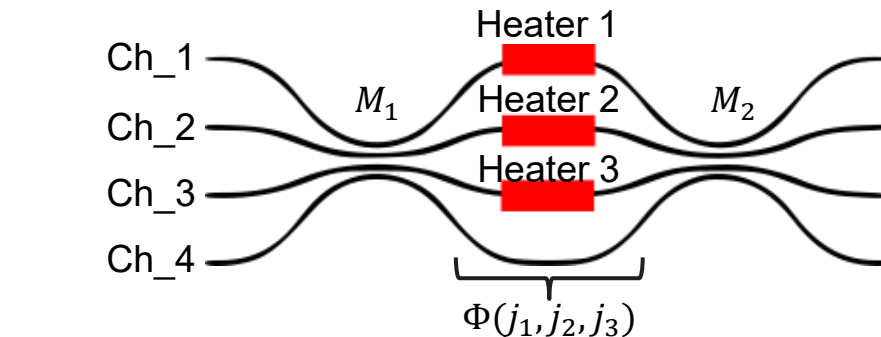
Параметризация одного элемента



Единичный элемент содержит в себе три смысловых фрагмента:

1. 2 MMI (M_1 и M_2), которые представимы в виде унитарного преобразования, близкого к светоделительному (но не равному, в следствие несовершенства литографического процесса)
2. Один фазовый слой.

$$\Phi(j_1, j_2, j_3) = \begin{pmatrix} e^{i\varphi_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\varphi_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



Из-за сильного кросс-толка внутри элементов, каждый из фазовращателей влияет не только на свой волновод, но и на все остальные → зависимость от тока будет негармонической и выражаться в матричном виде.

$$\begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_{10} \\ \varphi_{20} \\ \varphi_{30} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} j_1^2 \\ j_2^2 \\ j_3^2 \end{pmatrix},$$

j_1, j_2, j_3 — силы тока на соответствующих хитерах

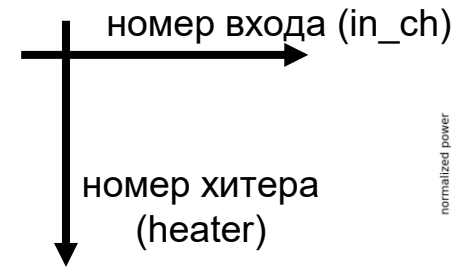


Подбор параметров унитарных матриц и фазового слоя решался как **задача регрессии**, используемая **метрика** — суммарное значение абсолютной ошибки (total absolute error, **TAE**).

Инициализация случайными параметрами дает значение TAE ~ 920.

Разработка алгоритма управления интегральной оптической структурой на основе многомодовых интерферометров методами машинного обучения

При поддержке фонда развития науки и образования «Интеллект»



Столбцы:

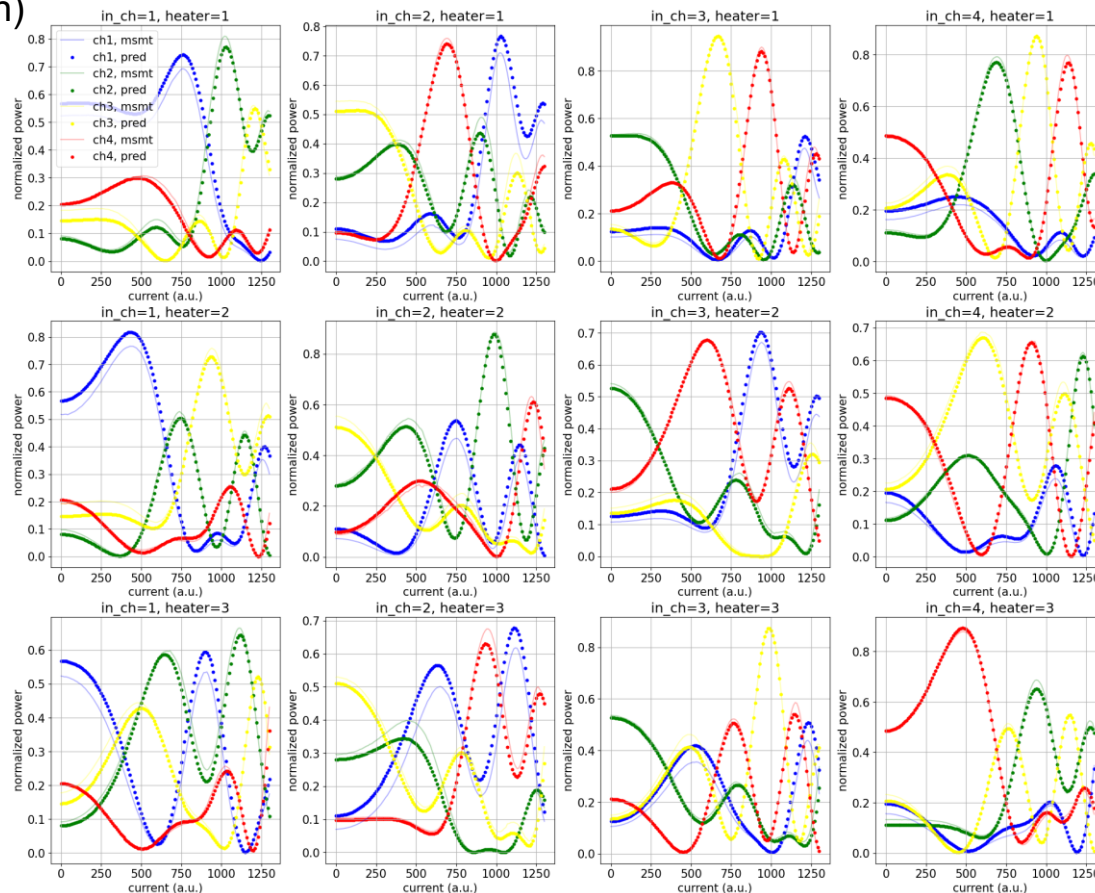
номер входа, в
который заводилось
лазерное излучение

Строки:

номер хитера,
который грелся на
фазовом слое.

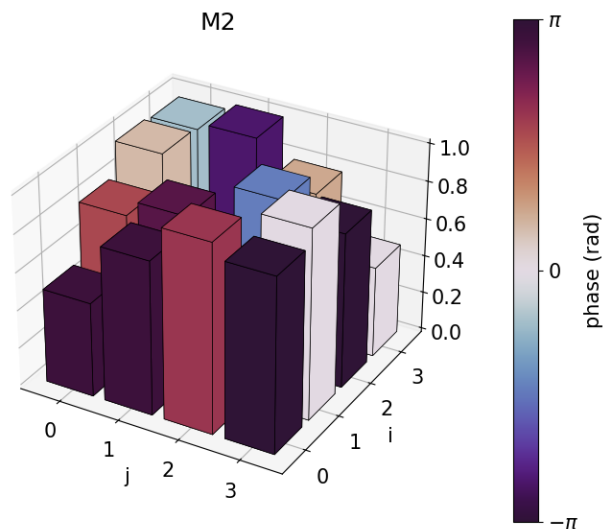
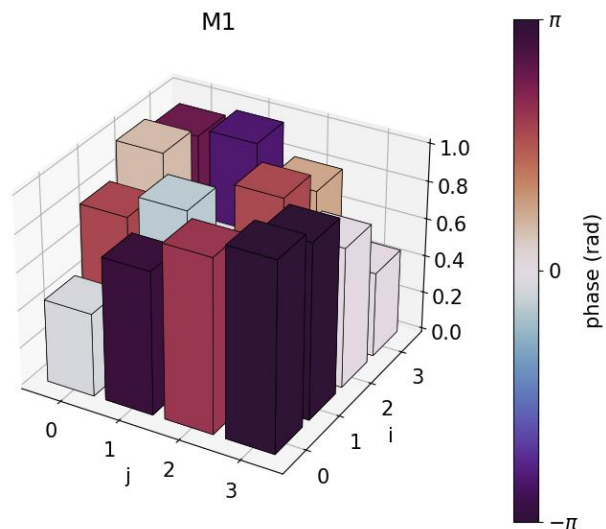
Параметризация
проведена
оптимизатором **LBFGS**

TAE = 78



Полученная параметризация в результате аппроксимации

$$\alpha = \begin{pmatrix} 9.51 & 2.12 & -2.79 \\ 3.8 & 8.49 & -0.42 \\ 1.38 & 2.49 & 6.13 \end{pmatrix}, \varphi_0 = \begin{pmatrix} 0.57 \\ 2.67 \\ 0.39 \end{pmatrix}$$



План

Далее необходимо параметризовать полную структуру:



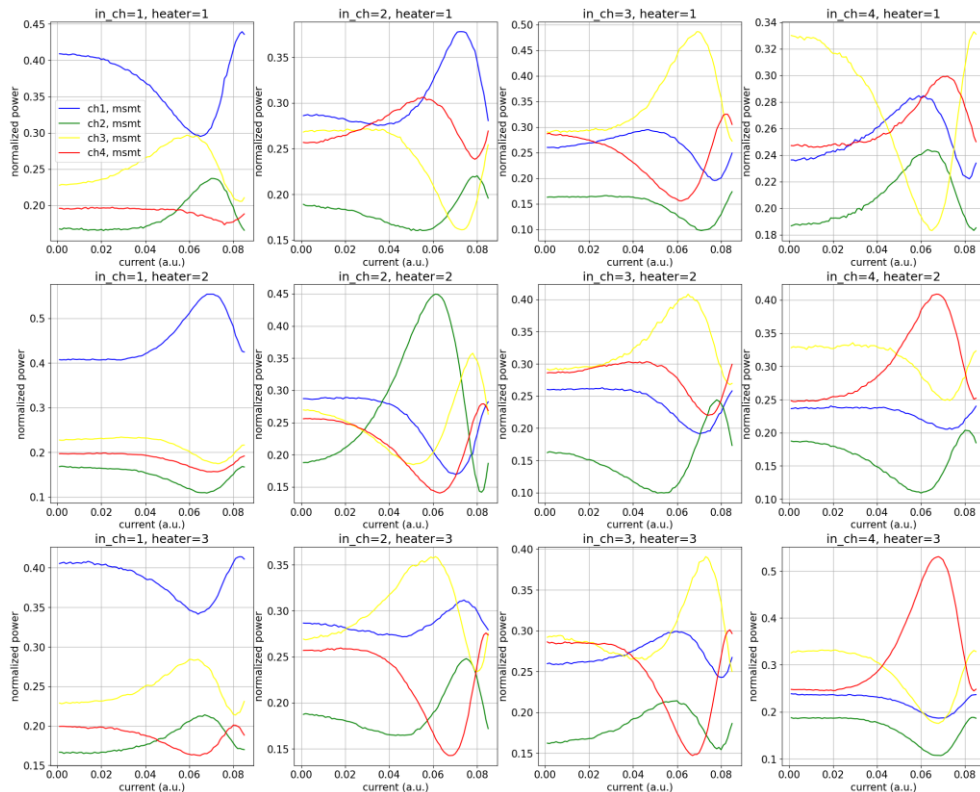
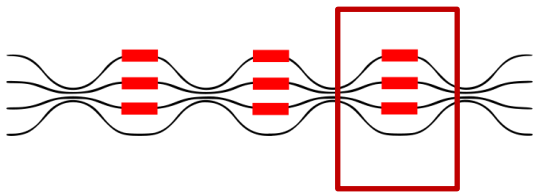
Данных и параметров больше практически в 3 раза.

Тут есть несколько нюансов:

1. Полная структура, для которой есть экспериментальные данные, сделана из другого материала – для неё нельзя применить полученное решение.
2. Можно заметить, что M_1 и M_2 не совпадают – это одно из возможных решение, которое, тем не менее, затруднит параметризацию полной структуры в дальнейшем.
3. В данных по полной структуре можно заметить, что система не делает оборот на 2π .



Данные по фазовому слою полной структуры



Заключение

- Была успешно реализована параметризация сложной структуры с учётом кросс-толка.
- Показана применимость ML-оптимизации для настройки целевой системы. Метрика TAE показала значение 78 (при инициализации случайными параметрами ~920).
- Проведена экспериментальная характеристика интегрально-оптической структуры 4x4 на нитриде кремния, базовыми элементами которой выступили четырехканальные MMI и фазовращатели.
- Результаты подтверждают работоспособность схемы и задают основу для масштабирования и управления подобной схемой.



Спасибо за внимание!

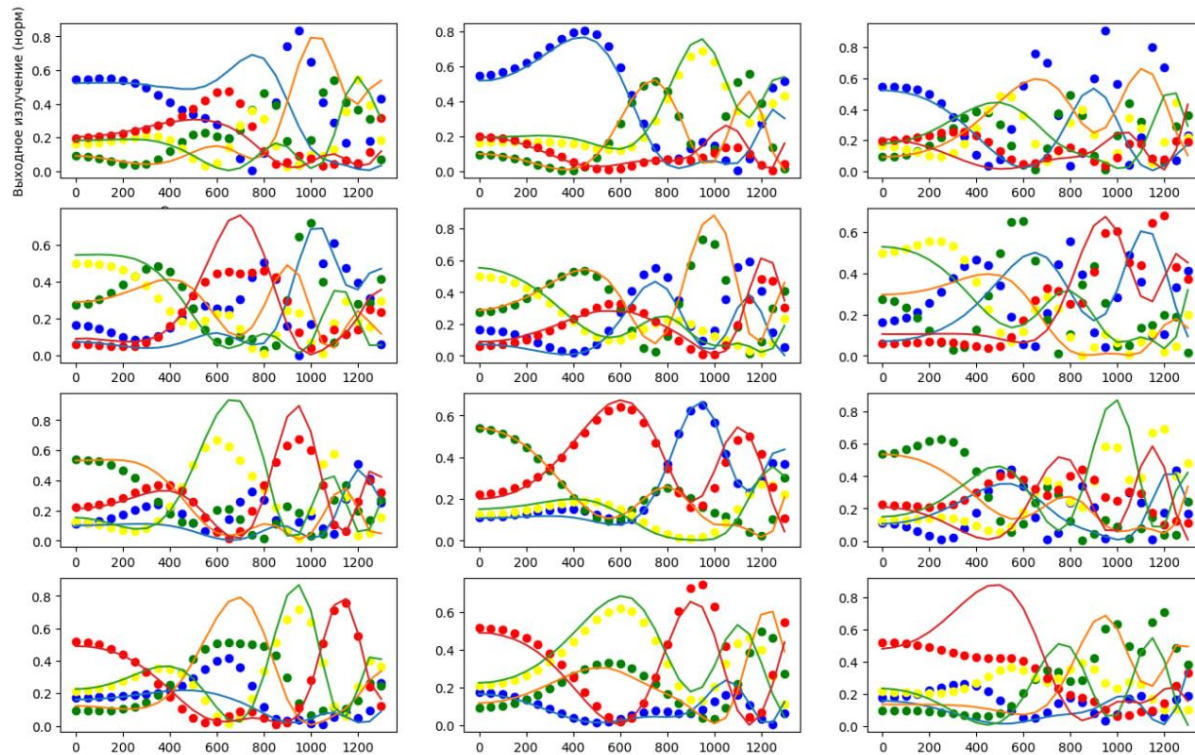
Изначальная
инициализация
унитарной
матрицы,
кодирующей
работу MMI

```
1 def create_un_mat(v, device):
2     Mc = torch.zeros((4, 4), dtype=torch.complex128, device=device)
3     Mc[0, 1] = v[0] + 1j * v[1]
4     Mc[1, 0] = v[0] - 1j * v[1]
5
6     Mc[0, 2] = v[2] + 1j * v[3]
7     Mc[2, 0] = v[2] - 1j * v[3]
8
9     Mc[0, 3] = v[4] + 1j * v[5]
10    Mc[3, 0] = v[4] - 1j * v[5]
11
12    Mc[1, 2] = v[6] + 1j * v[7]
13    Mc[2, 1] = v[6] - 1j * v[7]
14
15    Mc[1, 3] = v[8] + 1j * v[9]
16    Mc[3, 1] = v[8] - 1j * v[9]
17
18    Mc[2, 3] = v[10] + 1j * v[11]
19    Mc[3, 2] = v[10] - 1j * v[11]
20
21    U = torch.matrix_exp(1j * Mc)
22
23    return U
```

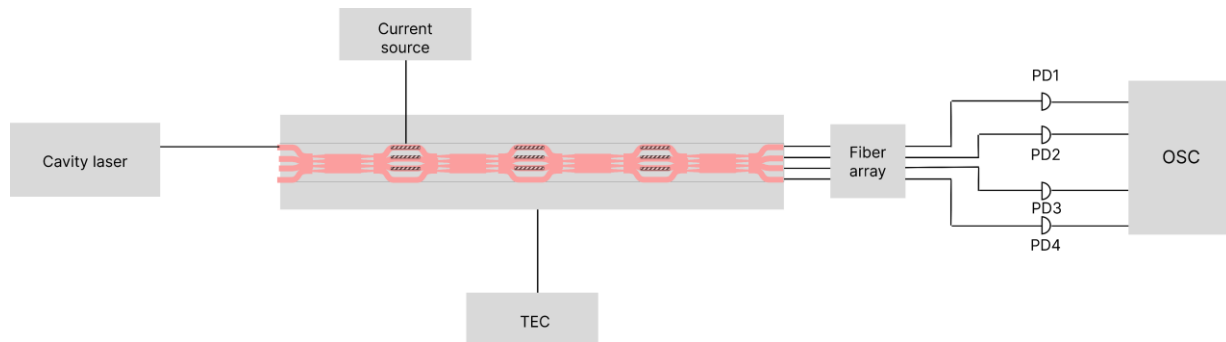
Кососимметричная
матрица

Матричная экспонента





Основная проблема – «пробуксовка» оптимизации, она всё время сваливалась в локальный минимум при любых параметрах



Произведена
характеризация
чипов Legintec с
рассматриваемой
структурой на
основе нитрида
кремния.

