

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЛИТОГРАФИИ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Шульга А.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Мадвейко С.И. – к.т.н., доцент, зав. кафедрой ЭТТ

Аннотация. Фотолитография – один из ключевых этапов производства микросхем. Когда размеры элементов становятся меньше, начинают сильнее сказываться оптические искажения, и без вычислительной литографии уже не обойтись. В статье разбирается, как методы машинного обучения помогают настраивать параметры литографического процесса.

Ключевые слова: фотолитография, вычислительная литография, машинное обучение, нейронные сети, микроэлектроника.

Введение. Одним из самых сложных этапов в микроэлектронике является фотолитография, то есть перенос рисунка с фотошаблона на пластину. При прохождении света через шаблон и оптику, возникают дифракция, интерференция и прочие волновые эффекты, из-за которых картинка искажается и элементы могут получиться с большими погрешностями. Чтобы это компенсировать, инженеры из EDA-компаний (Synopsys, Cadence, Mentor Graphics) и производители чипов (Intel, TSMC) разработали вычислительную литографию – набор алгоритмических методов, активно развиваемых в полупроводниковой индустрии, позволяющих заранее корректировать и модернизировать форму фотошаблона. Этот подход требует большие вычислительные мощности и затраты по времени. Машинное обучение (ML – machine learning) перерабатывает огромные объёмы данных и находит в них закономерности, делает прогнозы с высокой точностью. Сейчас есть много готовых библиотек Python для машинного обучения, используемые для анализа данных, классификации, регрессии и создания нейросетей, таких как: TensorFlow, Keras, Scikit-learn, CatBoost, XGBoost. Они активно используются в промышленности для прогнозирования параметров, анализа процессов или контроля качества.

Основная часть. Фотолитография является основным методом литографии в микроэлектронике. Это процесс нанесения на пластину фоторезистора, который затем засвечивают через шаблон, проявляют и травят [2]. Так как разрешение ограничено длиной волны при уменьшении деталей проявляется эффект оптической близости – искажения топологического рисунка при фотолитографии, вызванные дифракцией света и рассеянием электронов, что приводит к скруглению углов, уменьшению размеров линий и замыканию элементов. Оно требует коррекции шаблонов для точного переноса изображения на полупроводниковую пластину. Для исправления используют коррекцию оптической близости – шаблон делают немного искажённым, чтобы после прохождения через оптику получить нужное изображение [1].

Цель ML научить программу делать выводы на основе данных в различных задачах: классификация, регрессия, кластеризация, поиск аномалий и так далее. В производстве электроники активно применяется ML. Например, позволяет предсказывать, сколько проработает компонент, находить бракованные экземпляры или группировать похожие элементы. Для этого используют различные алгоритмы: от простой регрессии до нейросетей. Анализ изображений микросхем является одним из направлений, в котором с помощью свёрточных нейросетей можно автоматически сравнивать элементы одной партии и выявлять отклонения. Кластеризация помогает понять, какие детали действительно являются одинаковыми, какие – нет [4].

В литографии для облегчения и упрощения работы можно обучить нейросеть предсказывать результат экспонирования. Например, подача на входе разных вариантов шаблонов и анализ данных на выходе. Результаты показали, что использование нейронных сетей позволяет ускорить расчет фотошаблонов примерно в 100 раз при сохранении точности в 92% [5]. Это особенно важно, когда нужно быстро рассмотреть множество вариантов или встроить расчёты в автоматизированную систему проектирования.

Современные фабрики собирают большой объём информации о каждом этапе производства. Вручную это всё не проанализируешь, а алгоритмы эффективно анализируют. Они могут найти скрытые закономерности, которые помогут улучшить процесс или повысить качество. Также машинное обучение хорошо справляется с нелинейными зависимостями. В литографии много таких зависимостей, и аналитическими формулами её описать проблематично. В дальнейшем машинное обучение будет всё глубже встраиваться в систему автоматизированного проектирования и системы автоматического контроля. Например, компьютерное зрение уже сейчас демонстрирует высокую точность с поиском дефектов на пластинах, а с развитием методов будет работать ещё точнее.

Заключение. Данное направление перспективно развивается. Машинное обучение даёт возможность ускорить расчёты, повысить точность и корректно использовать данные с производства. Эти методы применяются для анализа качества компонентов, поиска дефектов и автоматизации контроля. Возможность быстрой аппроксимации сложных зависимостей делает эти методы перспективными для оптимизации литографических процессов в микроэлектронике.

Список литературы

1. *Computation lithography: virtual reality and virtual virtuality* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-17-15-12259>. Дата доступа: 06.03.2026.
2. *Литографические методы формирования структур* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://physics42.ru/tutorials/metamaterialy/litograficheskie-metody-formirovaniya-struktur/>. Дата доступа: 06.03.2026.
3. *Электронная вычислительная техника* [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://computer-museum.ru/books/sbornik_EVT_1987.pdf#page=19. Дата доступа: 06.03.2026.
4. *Нанотехнологии в сфере микроэлектроники* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://elibrary.udsu.ru/xmlui/bitstream/handle/123456789/21665/161.pdf?sequence=1>. Дата доступа: 06.03.2026.
5. *Исследование эффективности применения различных архитектур нейросетей в расчете маски в задаче инверсной фотолитографии* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.t-niisi.ru/jour/article/view/24>. Дата доступа: 06.03.2026.

UDC 004.85:621.3.049.77

APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS FOR OPTIMIZING LITHOGRAPHY PROCESSES IN MICROELECTRONICS

Shulga A.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Madveika S.I. – Cand. Of Sci., associate professor, head of the department of EET

Annotation. Photolithography is one of the key stages in microchip production. As elements become smaller, optical distortions begin to have a greater impact, and computational lithography becomes indispensable. This article examines how machine learning methods help to adjust the parameters of the lithography process.

Keywords: photolithography, computational lithography, machine learning, neural networks, microelectronics, process optimization