

# Нано-печатная литография

Нано-печатная литография (nano-imprint lithography, нано-импринт литография) является одной из передовых литографических технологий, отличающейся низкой себестоимостью, высоким разрешением (до ~10 нм) и производительностью. В основе НПЛ лежит копирование наноразмерных структур с исходной подложки (так называемого мастер-штампа) посредством механического изменения формы полимерного слоя на целевой подложке. Данный подход позволяет создаватьnanoструктуры сложной трехмерной формы на большой площади за один производственный шаг. Благодаря своим уникальным возможностям НПЛ стала одним из основных методов производства нанофотонных структур для очков дополненной реальности и проточных ячеек для секвенирования ДНК.

## Подготовка мастер-штампа



Рис. 1 Процесс создания мастер штампа для НПЛ

Процесс НПЛ начинается с подготовки мастер-штампа — подложки, содержащей необходимые наноразмерные структуры в масштабе 1:1. Мастер-штампы для НПЛ изготавливаются с использованием традиционных литографических методов: электронно-лучевой (EBL) или оптической (DUV) литографии. Ключевые этапы DUV процесса показаны на Рисунке 1: вначале слой светочувствительного полимера (резиста), нанесенный на подложку, облучают ультрафиолетом через фотомаску, что изменяет его свойства и позволяет выборочно удалить экспонированные участки. Полученный рельеф служит маской для химического или плазменного травления, переносящего структуру в основной материал. Поскольку создаваемые таким способом маски имеют бинарную природу с четкими границами между обработанными и защищенными зонами, этот метод оптимальен для создания структур с вертикальными стенками. Для изготовления наклонных структур, часто используемых в оптических элементах и фотонных мета-материалах, применяется ионно-лучевое травление под углом или селективное химическое травление по кристаллографическим направлениям.

Изготовление мастер-штампа представляет собой наиболее затратную стадию процесса. Однако, как и в случае проекционной фотолитографии, после однократного изготовления такой шаблон может использоваться многократно

для серийного воспроизведения наноструктур. Первичный мастер-штамп обычно не применяется непосредственно в серийном производстве. Вместо этого процесс предусматривает создание рабочих копий с оригинала, которые и используются для массового тиражирования наноструктур.

## Процесс НПЛ

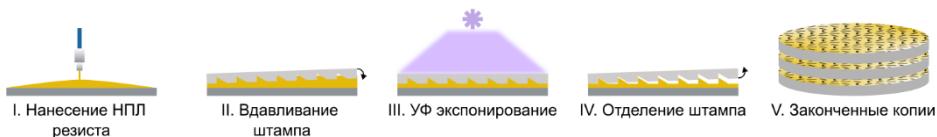


Рис. 2 Перенос наноструктур на целевую подложку методом НПЛ

Рисунок 2 показывает ключевые шаги процесса переноса наноструктур с мастер-штампа на целевую подложку. Процесс начинается с нанесения НПЛ резиста на подложку методом центрифугирования (spin-coating) или струйной печати (ink-jetting), после чего следует предварительный отжиг (pre-bake) для испарения растворителей и увеличения вязкости резиста. Затем мастер-штамп, изготовленный на предыдущем этапе, приводится в прямой контакт с полужидким резистом на подложке. Благодаря пластичности материала резист точно повторяет все особенности рельефа штампа, формируя его зеркальную копию. На следующей стадии созданная таким образом наноструктура фиксируется путем фотохимического отверждения резиста под воздействием ультрафиолетового облучения. После полного затвердевания мастер-штамп аккуратно отделяется и может быть использован для копирования наноструктуры на следующую подложку.

Полимерные материалы, используемые в качестве резиста для НПЛ, должны соответствовать специфическим требованиям технологии: они должны быть жидкими для нанесения методом центрифугирования или струйной печати и иметь оптимальную вязкость для заполнения рельефа мастер-штампа в процессе репликации. Кроме того, поверхностные свойства отверженного НПЛ резиста должны обеспечивать легкое отделение штампа без повреждения реплицированных наноструктур.

## Перенос наноструктур

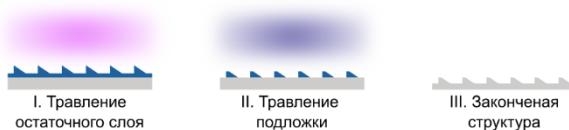


Рис. 3 Травление с использованием НПЛ маски

Полимерный слой может использоваться как непосредственно для формирования наноструктур, так и в качестве маски для последующего

травления, что позволяет перенести сформированный рельеф в другой материал. Процесс травления с использованием НПЛ маски показан на Рисунке 3. Сначала наноструктура переносится в полимерный слой, нанесённый на целевую подложку, с помощью НПЛ. Важным шагом этого этапа является удаление тонкого слоя полимера, оставшегося по скопированной структурой после НПЛ, при помощи предварительного травления кислородной плазмой (plasma ashing). После этого структурированный слой НПЛ полимера используется как маска для плазменного травления. Разница в толщине участков полимерной маски приводит к разной задержке начала травления подложки - более тонкие области открывают доступ к подложке раньше, чем толстые. При правильно подобранном режиме травления этот эффект позволяет напрямую воспроизвести сложные трёхмерные профили маски в материале подложки.

Хотя данный подход упрощает процесс изготовления по сравнению с традиционными литографическими методами, позволяя создавать 3D-структуры за один этап, он имеет свои ограничения. Во-первых, толщину остаточного слоя под отпечатанным рисунком необходимо минимизировать, чтобы его удаление не привело к деградации элементов структуры. Во-вторых, требуется разработка подходящего процесса травления, способного переносить различные 3D-формы с маски в подложку с минимальными искажениями критических размеров. Это особенно сложно, поскольку разные элементы одной наноструктуры часто демонстрируют существенно разные скорости травления. Если такие искажения неизбежны, их следует компенсировать на этапе создания мастер-штампа - при условии, что деформации исходного рисунка известны и стабильны в рамках производственного процесса.

## Области применения НПЛ

Главным преимуществом НПЛ является возможность массового производства наноразмерных структур сложной трехмерной геометрии на больших площадях при низкой себестоимости. Однако физический контакт штампа с подложкой рано или поздно приводит к появлению локальных дефектов, что ограничивает применение метода для производства микроэлектронных компонентов. Основной областью применения НПЛ является создание нанофотонных и других периодических структур, в которых отдельные дефекты лишь незначительно снижают общую эффективность устройства.

Сейчас главная область коммерческого применения НПЛ — производство оптических элементов для прозрачных очков дополненной реальности. Способность НПЛ создавать наноструктуры с наклонными боковыми поверхностями является критически важной для повышения и точной подстройки эффективности дифракционных оптических элементов. Другая

активно развивающаяся область применения НПЛ – секвенирование ДНК. НПЛ используется для создания оптических ячеек, которые содержат до десятков миллиардов наноразмерных колодцев, расположенных в строго фиксированных позициях. Такая структура обеспечивает равномерное распределение кластеров для секвенирования, при этом сохраняя высокую плотность, что позволяет значительно сократить время проведения каждого цикла секвенирования.

Несмотря на сложность использования технологии для производства электронных компонент, в 2023 году Компания Canon представила первую в мире коммерческую систему НПЛ для производства полупроводников. Согласно заявленным характеристикам, система способна изготавливать элементы с критическим размером до 14 нм, что сравнимо с последним поколением EUV литографов от ASML, при ожидаемой стоимости покупки и обслуживания до десяти раз меньше. Стоит отметить, что предполагаемой областью применения в первую очередь является производство флеш памяти по технологии 3D NAND со сложной трехмерной структурой, но более устойчивой к локальным дефектам.

## Мы предлагаем

Мы специализируемся на нанопечатной литографии и помогаем исследователям и инженерам производитьnanoструктуры с высокой точностью и по низкой цене. Наша работа начинается с проектирования мастер-штампа и заканчивается готовым образцом — мы подбираем резисты, оптимизируем параметры печати, отрабатываем процессы травления. Мы можем провести весь цикл у вас в лаборатории, адаптировать процесс под имеющееся оборудование или помочь с поиском подходящей производственной площадки. Если нужно, мы разрабатываем специализированные установки НПЛ под конкретные исследовательские задачи.

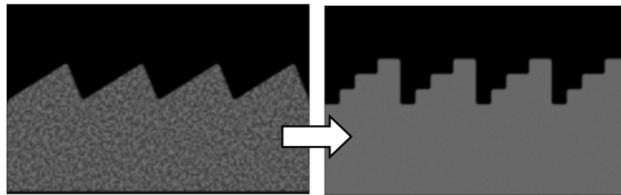
## Наши компетенции

Мы обладаем многолетним опытом производства наноразмерных фотонных и оптоэлектронных структур с использованием различных литографических методов, полученных за более чем 10 лет работы в ведущих технологических компаниях (WaveOptics, Snapchat) и исследовательских университетах (University of Cambridge, University of Exeter). **Достижения членов нашей команды включают разработку производственного процесса НПЛ для дифракционных волноводов дополненной реальности, создание линии средне-серийного производства волноводов, а также их внедрение в массовое производство на мощностях фабрики-партнера.** В данный момент мы заканчиваем разработку собственной лабораторной установки НПЛ,

предназначенной для отработки технологического процесса и пилотного производства дифракционных волноводов и ячеек для секвенирования ДНК.

## Наши сервисы

### Разработка производственных процессов НПЛ



- Дизайн мастер-штампа с учётом технологических особенностей и ограничений производства
- Допусковый анализnanoструктур для обеспечения устойчивости к производственным отклонениям
- Производство мастер-штампа на мощностях партнеров
- Подбор НПЛ полимера и оптимизация параметров процесса под решаемую задачу
- Разработка и оптимизация процессов травления для переноса nanoструктур в целевой материал

### Внедрение в массовое производство

- Разработка производственных процессов на площадях заказчика:
  - Нано-печатная литография (NIL), оптическая литография (DLR, MPL, DUV)
  - Процессы травления (RIE, ICP, IBE)
  - Нанесение оптических материалов (CVD, PVD, ALD)
- Выявление и коррекция производственных дефектов
- Внедрение Ср-СрК моделей для мониторинга процессов и контроля качества

### Разработка лабораторных установок НПЛ

- Разработка лабораторный установок НПЛ, оптимизированных под задачи заказчика
- Подбор метода (термический, УФ, гибридный) и параметров (температура, длина волны) отверждения полимера
- Разработка программно-аппаратного комплекса для управления и автоматизации процесса НПЛ

## **Патенты и публикации участников команды**

- WO2023118266A1 (2023), Arseny Alexeev et al., **Optical waveguide manufacturing method.**
- WO2022221196A1 (2022), Arseny Alexeev et al., **Imaging waveguide.**
- Arseny Alexeev et al, "**Meta-optics for Augmented Reality applications**", Applied Physics Letters 124.26 (2024).
- «**От гравюр к AR-очкам: как 200-летняя технология меняет современную фотонику**» - научно-популярная статья для Наука @Mail.ru