

УДК 535.211

## СРАВНЕНИЕ СХЕМ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ВЫТЯЖКИ НАНОПИПЕТОК И НАНОЗОНДОВ

**В.Н. Матыжонок, А.А. Петров**

Во многих областях науки требуется либо получить данные об объекте с наноразмерным разрешением, либо произвести с ним какие-то действия с нанометровой точностью. В данной статье рассмотрены две схемы для лазерной вытяжки нанопипеток и нанозондов, предложенные и используемые на кафедре лазерных технологий и экологического приборостроения СПбГУ ИТМО. Проведено сравнение этих схем по техническим данным, а также по удобству использования. Даны результаты вытяжки, полученные на данных схемах.

**Ключевые слова:** нанозонд, СЗМ, лазерная вытяжка, зондовая микроскопия, нанопипетка, оптическое волокно.

### Введение

Во многих областях современной науки требуется получить данные о различных физических, электрических, химических свойствах объектов, установить их геометрические характеристики, исследовать рельеф поверхности с микро- и наноразмерным разрешением. Также возникают задачи локального изменения свойств или геометрии поверхности объектов. Решить данные задачи с требуемой точностью позволяют, в том числе, методы сканирующей зондовой микроскопии.

Существует множество различных методов сканирующей зондовой микроскопии. Основным элементом в данных методах является зонд, и решающее значение для разрешения в большинстве случаев имеют характеристики острия зонда. Поэтому важную роль играет оптимизация существующих типов зондов, а также разработка и исследования новых типов зондов. На кафедре лазерных технологий и экологического приборостроения СПбГУ ИТМО были разработаны и опробованы различные схемы для лазерного изготовления различных типов зондов для силовой зондовой микроскопии. В данной работе проводится анализ схем для лазерной вытяжки с вращением заготовки и схемы с использованием тороидального зеркала, оказавшихся наиболее перспективными.

### Лазерная установка для вытяжки с вращением заготовки

Процесс лазерной вытяжки нанопипеток и нанозондов основан на том, что при поглощении лазерного излучения нагревается малый участок оптического волокна (или стеклянного капилляра). К концам волокна прикладывается растягивающее механическое усилие. При увеличении температуры разогреваемого участка волокна происходит уменьшение его вязкости, в результате чего на этом участке происходит растяжение волокна, его диаметр уменьшается с последующим обрывом и образованием зонда на концах волокна.

Схема для лазерной вытяжки с вращением заготовки исторически появилась раньше схемы с тороидальным зеркалом. Она может использоваться для лазерной вытяжки различных элементов (нанопипеток, нанозондов), а также для создания сферических торцевых элементов и изготовления кантилеверов [1].

Схема установки для лазерной вытяжки наноинструментов представлена на рис. 1. Излучение CO<sub>2</sub> лазера перенаправляется глухим зеркалом, фокусируется линзой и попадает на заготовку. Заготовка закреплена в подвижных суппортах. Мотор через гибкие передачи передает крутящий момент на суппорты, которые обеспечивают вращение заготовки. Также к суппортам приложено усилие, направленное на разрыв заготовки. Заготовка под действием лазерного излучения локально нагревается, растягивается, од-

новременно сужаясь в зоне нагрева. В некоторый момент происходит разрыв заготовки. При правильном подборе параметров воздействия получается 1 или 2 нанoinструмента.

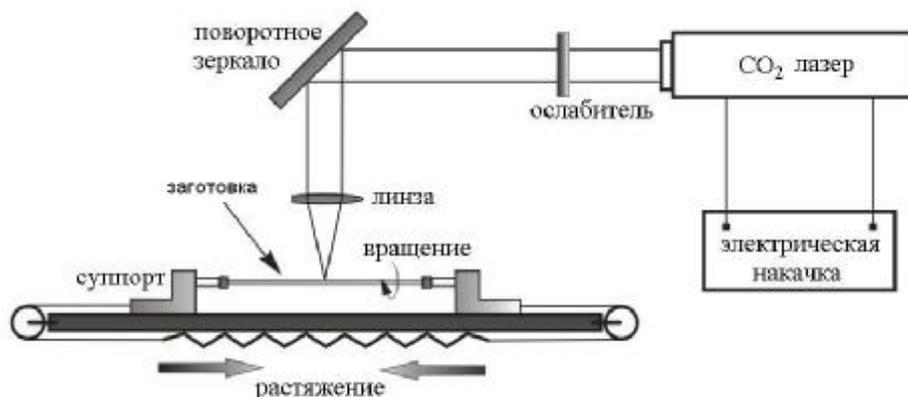


Рис. 1. Схема лазерной установки для вытяжки с вращением заготовки [1]

В качестве основного лазера используется непрерывный отпаянный CO<sub>2</sub> лазер с продольным разрядом. Длина волны излучения 10,6 мкм. Размер пятна излучения на выходе из лазера составляет 6 мм, расходимость излучения составляет 4 мрад. Лазер генерирует излучение мощностью до 21 Вт. Излучение фокусируется ZnSe линзой с фокусным расстоянием 75 мм. Схема позволяет создать зону воздействия размером до 300 мкм с плотностью мощности до 300 Вт/мм<sup>2</sup>. Для создания равномерной зоны нагрева заготовка вращается вокруг своей оси. Вращение осуществляется электромотором и передается на суппорты через гибкую передачу. В связи с хрупкостью заготовки большую роль играет синхронность начала вращения.

Данная схема обладает следующими достоинствами:

- простота юстировки – необходима юстировка только двух оптических элементов (плоского поворотного зеркала для обеспечения нормального падения излучения на заготовку и сферической линзы, предназначенной для обеспечения необходимой плотности мощности в зоне воздействия);
- возможность управлять размером зоны воздействия, перемещая линзу вдоль оси излучения;
- возможность изменения плотности мощности излучения на заготовке как за счет мощности излучения лазера, так и за счет размера зоны облучения (путем перемещения линзы). При этом изменяется температура, достигаемая в зоне обработки, а, следовательно, и характеристики получаемых зондов.

Однако вместе с тем данная схема обладает и рядом недостатков:

- требуется высокая точность синхронизации запуска и вращения заготовки в обоих суппортах. При невыполнении этого условия может происходить как облом заготовки в момент начала вращения, так и перекручивание получаемого в результате обработки острия нанoinструмента;
- так как зона воздействия – не сплошная, а соответствует перемещающемуся по поверхности источнику (из-за чего не обеспечивается равномерный нагрев со всех сторон), то в полученных образцах может наблюдаться осевая несимметрия острия (см. рис. 2).

Результат вытяжки структурированного волокна на такой установке представлен на рис. 3. Диаметр острия равен 629,5 нм.

Для решения указанных проблем была предложена схема для вытяжки с использованием тороидального зеркала.

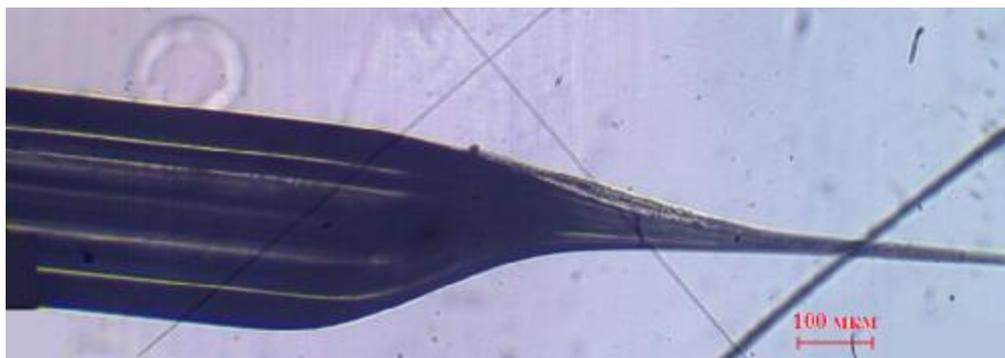


Рис. 2. Микрофотография структурированного волокна с нарушением осевой симметрии

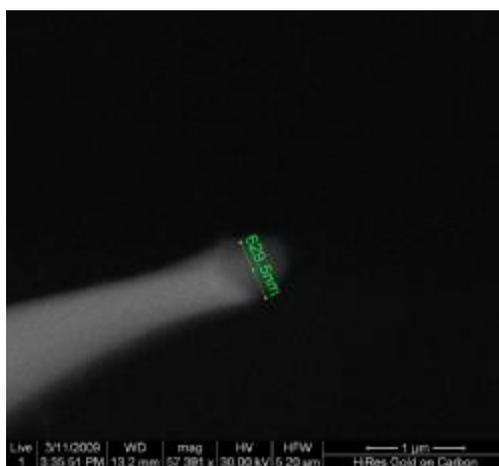


Рис. 3. Изображение на электронном микроскопе острия структурированного волокна, вытянутого на установке с вращением заготовки

### Лазерная установка для вытяжки с тороидальным зеркалом

Данная схема появилась как развитие схемы со сферическим зеркалом. В начальном варианте вместо тороидального зеркала было установлено сферическое, однако в этом случае излучения падало на заготовку под углом, и в процессе изготовления получалось два разных образца. Только один из них отвечал требованиям по форме и размеру острия [1].

Схема установки представлена на рис. 4. Излучение лазера перенаправляется глухим зеркалом, проходит затвор, позволяющий оперативно перекрывать излучение, приводится коническим элементом. Далее излучение перенаправляется на тороидальное зеркало еще одним глухим зеркалом, имеющим отверстие для прохода заготовки. Тороидальное зеркало фокусирует излучение в зону обработки, причем схема настроена так, что излучение на заготовку падает перпендикулярно, позволяя получать два идентичных наноинструмента.

В схеме используется импульсный  $\text{CO}_2$  лазер фирмы SYNRAD (частота генерации до 20 кГц). Он позволяет получать излучение мощностью до 10 Вт. Расходимость излучения составляет 4 мрад. Оптическая схема позволяет создать размер фокусного пятна 40 мкм и глубину фокуса 1,5 мм, однако, учитывая расходимость лазера, реально можно получить размер пятна в фокусе 200 мкм [2]. Из-за больших, чем в предыдущей схеме, потерь на оптических элементах достижимая плотность мощности составляет  $10,6 \text{ Вт/мм}^2$ . В данном случае заготовка не вращается, что накладывает меньшие требования на соосность суппортов.

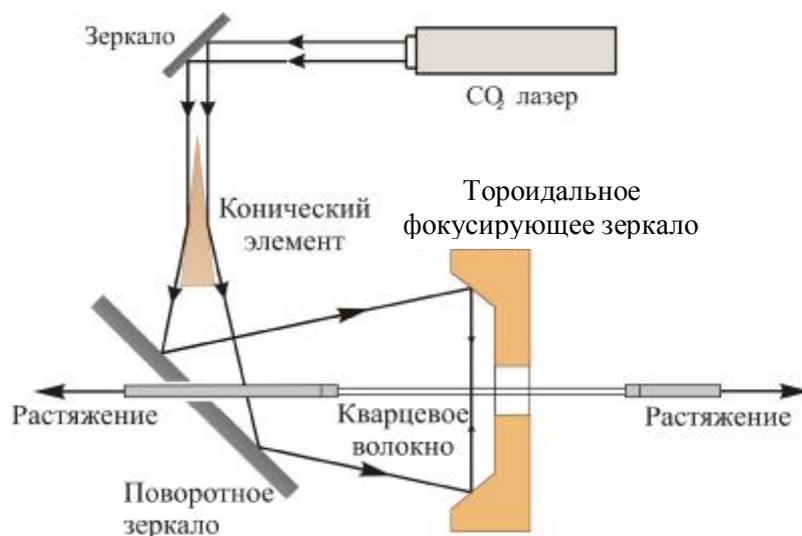


Рис. 4. Схема лазерной установки для вытяжки с тороидальным зеркалом [1]

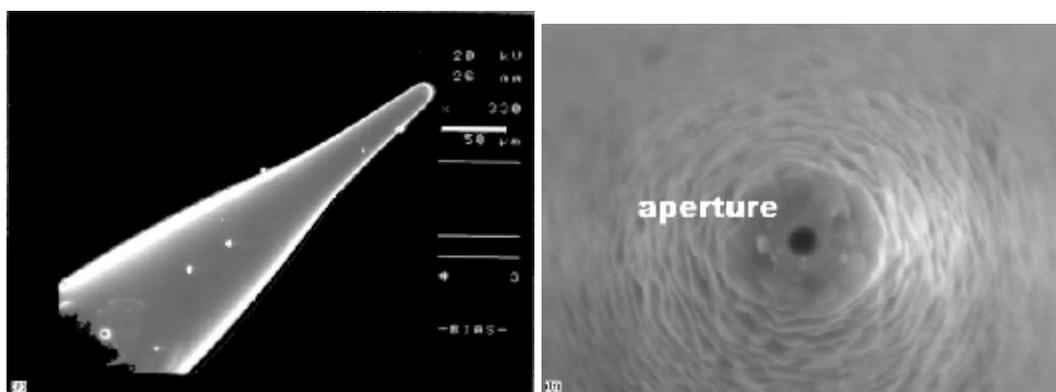


Рис. 5. SEM фотография ближнепольного зонда, полученного на схеме для вытяжки с тороидальным зеркалом [3]

Данная схема обладает следующими достоинствами.

- Оптическая схема создает кольцевую зону обработки, благодаря чему обеспечивается равномерный нагрев заготовки со всех сторон, что позволяет избежать осевой асимметрии.
- Излучение падает на заготовку перпендикулярно, что позволяет из одной заготовки изготавливать сразу два идентичных нанoinструмента.
- Точность изготовления выше, чем в предыдущей схеме.

Вместе с тем у нее есть и недостатки:

- сложность юстировки;
- невозможность регулировать размер зоны воздействия;
- плотность мощности излучения в зоне воздействия регулируется только мощностью излучения лазера;
- менее эффективное использование мощности лазера (при одинаковой мощности излучения создается меньшая плотность мощности излучения за счет большей площади воздействия)

Результат полученного на данной установке ближнепольного оптического зонда представлен на рис. 5 [3].

## Выводы

Рассмотренные выше схемы могут применяться для создания различных типов инструментов для зондовой микроскопии. Однако каждая схема обладает своими особенностями.

Схема для лазерной вытяжки с вращением заготовки требует большей точности юстировки механических элементов, однако позволяет создавать большую плотность мощности в зоне обработки. Размер зоны обработки можно легко изменять простым перемещением линзы. Такая схема может применяться для создания зондов на основе нанопипеток, металлостеклянных зондов, а также кантилеверов.

Схема для лазерной вытяжки на основе тороидального зеркала создает кольцевую зону обработки. В связи с этим, при прочих равных условиях, площадь облучаемой зоны получается больше, а плотность мощности – меньше. Вместе с тем точность изготовления у этой схемы выше. Установка требует более сложной юстировки оптических элементов, но, вместе с тем, накладывает меньше требований на соосность суппортов благодаря тому, что заготовка не вращается, а только растягивается. Недостатком этой схемы является невозможность изменения размеров зоны обработки. Такая схема может применяться для создания зондов на основе различных типов волокон.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки № 2.1.2/4187 «Многофункциональные нанозонды для сканирующей зондовой микроскопии, спектроскопии и литографии (СЗМ-С-Л): концепция, технология, характеристика, применение».

Авторы выражают благодарность д.т.н., профессору В.П. Вейко и д.т.н., профессору Е.Б. Яковлеву за ценную помощь в работе и написании статьи, а также Зыонг Ван Зунгу за предоставленные материалы и результаты.

## Литература

1. Зыонг Ван Зунг. Исследование лазерного формирования комбинированных нанозондов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.27.03. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 19 с.
2. Математическое моделирование процесса лазерной вытяжки микропипеток / Зыонг Ван Зунг [и др.] // Известия вузов. Приборостроение. – 2003 . – Т. 46. – № 6. – С. 42–45.
3. Veiko V.P., Voznesensky N.B., Voronin Y.M., Voznesenskya N.N., Markovkina N.N., Chuiko V.A. Laser-based micropipettes: design, technology and applications // SPIE. – 2000. – V. 4157. – P.174–182.

*Матыжонок Виктор Николаевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, [Victoor@yandex.ru](mailto:Victoor@yandex.ru)

*Петров Андрей Анатольевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, [aa\\_petrov@lastech.ifmo.ru](mailto:aa_petrov@lastech.ifmo.ru)