

УДК 004.085

**Е. Е. Голдаевич**

Институт проблем регистрации информации НАН Украины  
ул. Н. Шпака, 2, 03113 Киев, Украина

## **Анализ методов изготовления оптоволоконных ближнеполевых зондов для систем сверхплотной записи информации**

*Рассмотрены методы изготовления оптоволоконных ближнеполевых зондов: механический метод нагревания и растягивания, методы химического травления, метод формирования нанослепка и комбинированные методы. Рассмотрен метод ионно-лучевого фрезерования для формирования плоскости апертуры выходного отверстия острия оптоволоконного зонда.*

**Ключевые слова:** *ближнеполевой оптоволоконный зонд, сверхплотная запись информации, метод нагрева и растягивания, метод химического травления, метод создания нанослепка, фокусированное ионно-лучевое фрезерование.*

### **Введение**

В настоящее время активно разрабатываются новые методы сверхплотной оптической записи информации. Одной из главных задач таких методов является создание оптимальных по своим физическим и техническим характеристикам элементов систем ближнеполевой оптической записи информации. Основным элементом таких систем, использующих оптические волноводы, является оптоволоконный зонд. В зависимости от режима работы устройства сверхплотной записи информации зонд может излучать, принимать или излучать и принимать электромагнитное излучение. В таких устройствах оптоволоконный зонд состоит из световода с покрытием, предотвращающим утечку электромагнитного излучения, за исключением апертуры на конце острия зонда, размеры которой меньше длины волны электромагнитного излучения. Запись или считывание информации производится путем перемещения оптоволоконного зонда и носителя данных относительно друг друга на определенном расстоянии. Пространственная разрешающая способность чтения-записи не ограничивается длиной волны электромагнитного излучения как в случае стандартного оптического чтения-записи, а зависит от размеров апертуры, через которую проходит электромагнитное излучение (т.е.

меньшая апертура позволяет создавать биты памяти меньших размеров, и, соответственно, увеличивать плотность записи информации). Однако, передача электромагнитного излучения через апертуру, размеры которой меньше длины волны, значительно уменьшается с уменьшением размеров апертуры, что приводит к уменьшению скорости чтения-записи. Это происходит из-за того, что в заостренной области оптоволоконного зонда электромагнитное излучение больше не распространяется путем полного внутреннего отражения от границ сердцевинны оптоволокна, а излучается за его пределы через боковую поверхность острия зонда и частично поглощается слоем металла, напыленного на эту поверхность. Типичная величина отношения входного и выходного уровней электромагнитного излучения для таких зондов равна от  $10^{-6}$  до  $10^{-5}$  [6]. Металлизация играет роль порогового ограничителя интенсивности электромагнитного излучения во избежание теплового повреждения острия. В итоге, с выходного отверстия оптоволоконного зонда на носитель информации передается электромагнитное излучение мощностью всего в несколько нановатт. Следовательно, основной задачей в построении систем чтения-записи сверхплотной оптической информации является разработка методов изготовления оптоволоконных зондов, которые обладали бы высокой пропускной и разрешающей способностью.

### Метод нагревания и растягивания

Метод нагревания и растягивания оптоволокна [1] стандартно применяется для изготовления заостренного ближнеполевого оптического зонда, используемого в системах ближнеполевой микроскопии, нанопроизводства и сверхплотной оптической записи информации. Острие зонда получается в результате растягивания оптоволокна при воздействии теплового излучения, например,  $\text{CO}_2$ -лазера на участок оптоволокна (рис. 1а, б). В результате получаются два куска с заостренными концами (рис. 1в). Изменение силы, времени растягивания и количества теплоты определяют размер и форму острия.

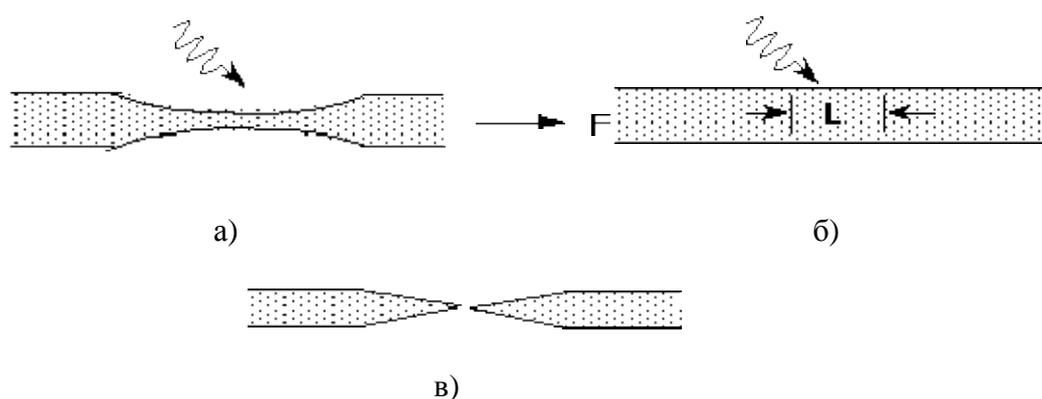


Рис. 1. Принцип изготовления ближнеполевого оптоволоконного зонда методом нагревания и растягивания: а) воздействие теплового излучения на участок оптоволокна L; б) размягчение нагреваемого участка оптоволокна и приложение силы F к концу оптоволокна для его растягивания; в) получение двух заостренных концов оптоволокна

Данный метод позволяет получить четкий контур и гладкую поверхность конуса острия. Однако он обладает рядом существенных недостатков. С его помощью не возможно воспроизводить одинаковые образцы острия совместно с одинаковыми размерами его апертуры. Излучение, передающееся по оптоволоконному зонду, переходит из фазы распространения в фазу рассеивания из-за достаточно большой длины конуса (малого угла при его вершине). Это объясняется утончением сердцевины оптоволокна, по которой и распространяется излучение, вследствие чего оно уже не отражается от границы раздела «сердцевина–оболочка», а преломляется и затухает, распространяясь в оболочке. Также уменьшается уровень сигнала вследствие потерь на отражение от слоя металлизации (рис. 2).

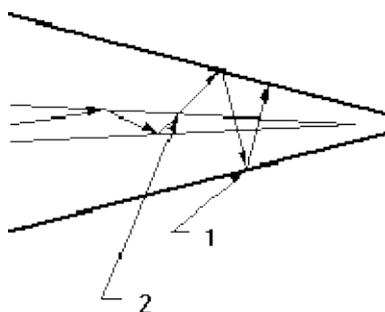


Рис. 2. Острие ближнеполевого оптоволоконного зонда, изготовленного по методу нагрева и растягивания: 1 — потери на отражение; 2 — излучение покидает пределы сердцевины оптоволокна

Как показано на рис. 3 уменьшить потери на отражение излучения от слоя металлизации можно металлизацией только области вблизи от выходного отверстия зонда.

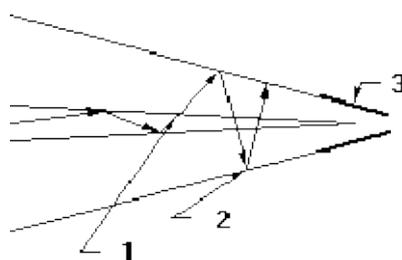


Рис. 3. Острие ближнеполевого оптоволоконного зонда, изготовленного по методу нагрева и растягивания с металлизацией в области выходного отверстия зонда: 1 — излучение покидает пределы сердцевины оптоволокна; 2 — излучение отражается от границ сердцевины оптоволокна; 3 — металлизация в непосредственной близости от выходного отверстия зонда

## Методы химического травления

Широко распространены методы химического травления конца оптоволокна, например, при помощи 40 %-й плавиковой кислоты (HF) или растворов фтористого аммония ( $\text{NH}_4\text{F}$ ). Травление происходит в области мениска, который образует-

ся в результате поверхностного притяжения молекул травящего раствора к поверхности оптоволоконна (рис. 4).

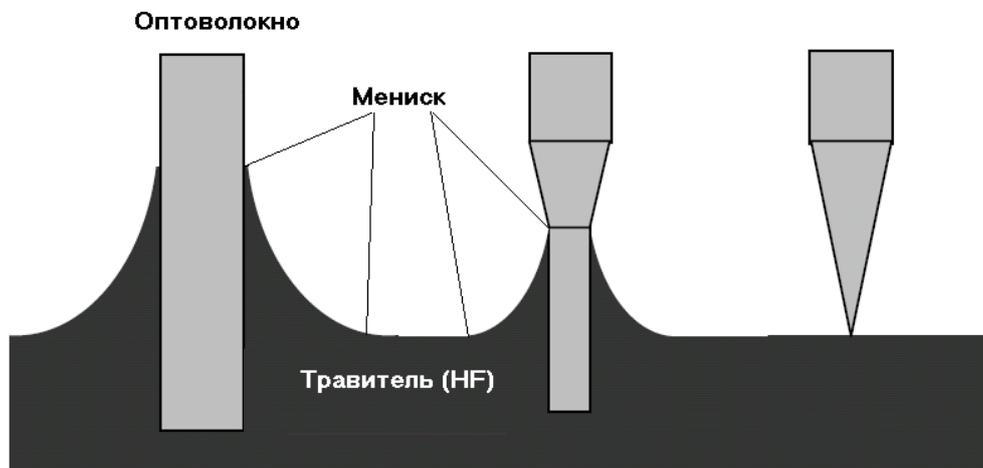


Рис. 4. Химическое травление оптоволоконна в 40 %-м растворе плавиковой кислоты (HF)

Среди этих методов выделяют динамические [2] и статические [1] методы. В динамических методах оголенный конец оптоволоконна с определенной скоростью погружается или вытаскивается из раствора для травления. Угол конуса острия зависит от времени, скорости и способа погружения (вытаскивания) конца оптоволоконна. Большой угол, а соответственно, меньший радиус острия получается при вытаскивании конца оптоволоконна из раствора с постоянной скоростью, а также при быстром его погружении. Меньший угол получается в результате медленного погружения. Возможно также ступенчатое травление, при котором через определенные интервалы времени конец оптоволоконна резко вытаскивается из раствора на определенные интервалы высоты. Статические методы травления предполагают закрепление конца оптоволоконна в травящем растворе на некоторое время.

Существует также новый метод травления [3], при котором участок в конце оптоволоконна покрывают полимером (защитным покрытием), плавящимся при нагреве (рис. 5). Конец оптоволоконна подносят к пластине, нагретой до температуры, выше температуры плавления полимерного слоя. Вследствие конвекции тепла от нагретой пластины, цилиндрический слой полимера уменьшается и создает заостренную форму в концевой области покрытия. После этого конец оптоволоконна погружается в травящий раствор. Угол получаемого острия зависит от угла полимерного покрытия, а, следовательно, от температуры, при которой производится плавление.

Методы химического травления характеризуются высокой производительностью и высоким уровнем воспроизведения формы острия. Недостатком является сложность контроля процесса травления в области мениска из-за его неустойчивости, т.к. мениск сильно чувствителен к любым изменениям в его области: вибрациям, термическим флуктуациям и др. Другой недостаток — пористая боковая поверхность острия. Это приводит к потерям излучения вблизи конца острия, а,

следовательно, к уменьшению мощности сигнала и отношения сигнал/шум на выходе. Метод травления с полимерным покрытием позволяет справиться с этими недостатками, дает более гладкую поверхность острия и не чувствителен к вибрациям, температурным флуктуациям и подходит для травления различных видов волокон [3].

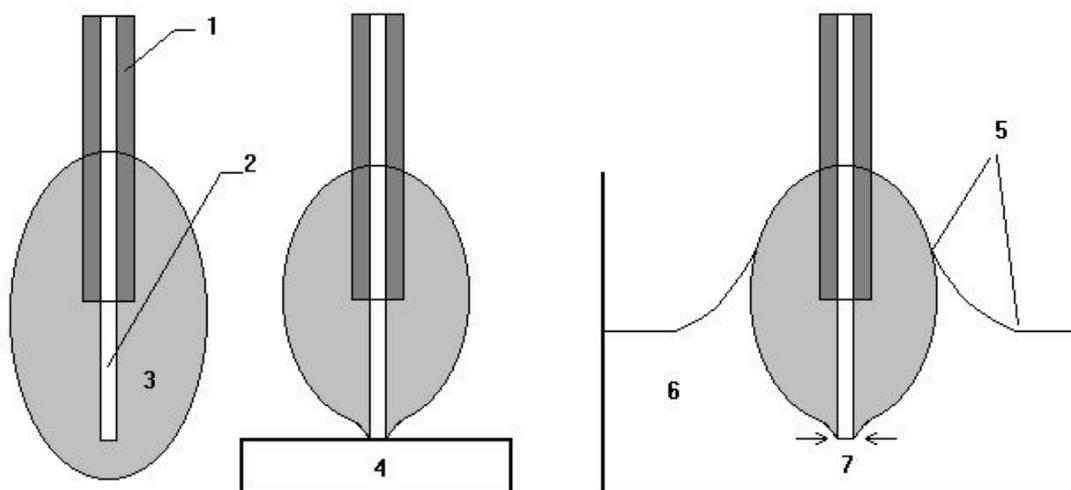


Рис. 5. Химическое травление оптоволокна с применением защитного полимерного покрытия: 1 — внешняя оболочка оптоволокна; 2 — оптоволокно; 3 — защитный слой плавкого полимера; 4 — нагретая пластина; 5 — мениск; 6 — травитель; 7 — область травления

### Метод создания нанослепка

Изготовление острия оптоволоконного ближнеполевого зонда также производится методом создания нанослепков [5]. Используется свойство полимеров тесно прилегать к поверхностям до размеров в несколько нанометров. Изготовление разбивается на следующие шаги (рис. 6): а) вытравливание микроформы в куске кремния раствором КОН; б) создание контуров низкотемпературным окислением; в) скругление формы оксидным травлением; г) формирование на стенках формы самообразующегося монослоя полимера (SAM — self-assembled monolayer); д) напыление слоя металла; е) фокусированное ионно-лучевое сверление (FIB — focused ion-beam) наноотверстия в металлизированной вершине конуса; ж) заполнение формы полимером SU-8 с формированием верхней части зонда; з) склеивание слепка острия зонда с оптоволоконном и извлечение его из формы.

Такие зонды можно производить массово, используя заготовленные формы. Антиадгезивный слой и скругленные края формы позволяют механически изготавливать зонды без образования поверхностных пор, способствующих утечке излучения.

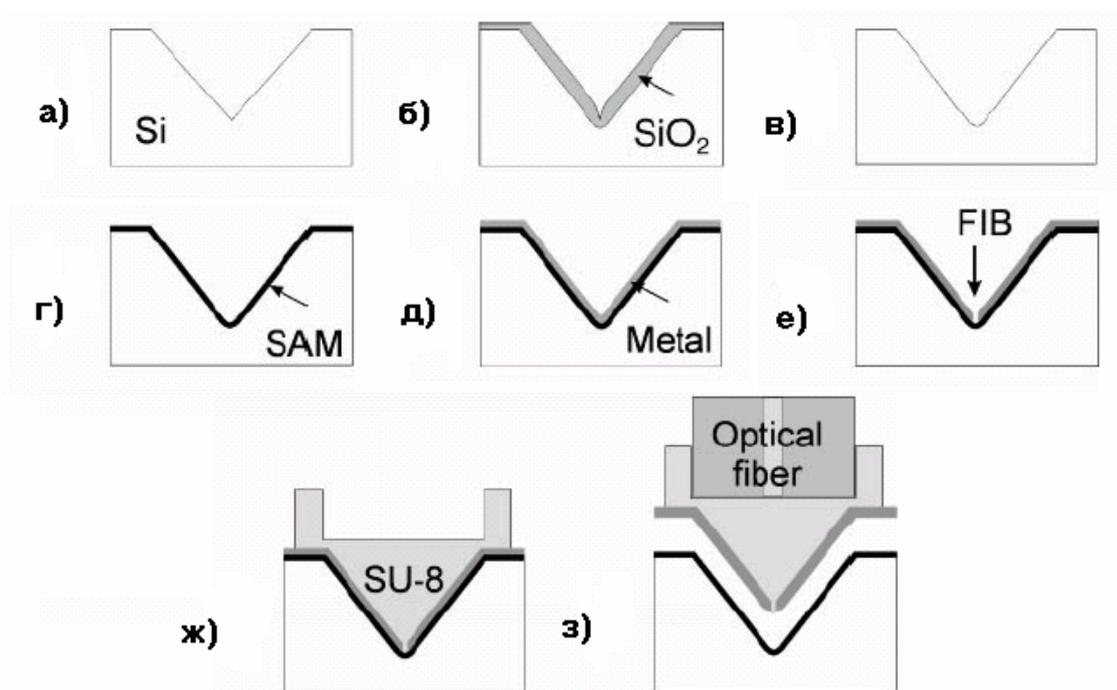


Рис. 6. Схематическая последовательность изготовления оптоволоконного зонда из нанослепка

### Комбинированные методы

Используются также комбинированные методы изготовления острия оптоволоконных зондов. После применения метода нагрева и растягивания дополнительно применяется метод химического травления для получения необходимой апертуры выходного отверстия острия, а также необходимой величины угла конуса острия.

Кроме того, для увеличения пропускной способности острия металлическое покрытие наносится в малой области вблизи острия, что позволяет уменьшить потери на отражение излучения от покрытия, когда излучение распространяется в режиме рассеивания (см. рис. 3).

К комбинированным методам можно отнести метод фокусированного ионно-лучевого изготовления апертуры острия оптоволоконного зонда [4]. В этом случае берется готовое заостренное металлизированное оптоволокно, вершина которого срезается фокусированным ионно-лучевым фрезерованием, что позволяет получить четкие формы апертуры, а также удалить частицы металла, образованные при его напылении, расположенные в области апертуры, которые уменьшают производительность оптоволоконного ближнеполевого зонда.

### Выводы

Среди проанализированных методов следует выделить метод химического травления конца оптоволоконного зонда с защитным полимерным покрытием, а также метод сфокусированного ионно-лучевого фрезерования. Данные методы позволяют по-

лучить достаточно гладкую поверхность конуса острия, варьировать величину угла при вершине конуса острия, а также формировать оптимальную апертуру отверстия на конце острия оптоволоконного ближнеполевого оптического зонда. В целом, методы химического травления доказывают свою простоту, скорость, воспроизводимость и эффективность при изготовлении оптоволоконных зондов. Однако они требуют дополнительных усовершенствований, например, как в случае с полимерным покрытием [3]. В методе изготовления нанослепка большим преимуществом является формирование апертуры острия оптоволоконного зонда в самой форме после металлизации стенок конуса, что позволяет контролировать размеры получаемой апертуры, а также избавиться от частиц металла, образующихся на поверхности апертуры в случае обычной процедуры напыления. Комбинированные методы позволяют дополнительно корректировать угол конуса и размеры апертуры ближнеполевых оптических зондов.

1. *Mufei Xiao*. Fabrication of Probe Tips for Reflection SNOM: Chemical Etch and Heating Pulling Methods // *J. Vac. Sci. Tech.* — 1997, Jul. — Vol. 15(4). — P. 1516–1520.

2. *Haber L.H., Schaller R.D., Johnson J.C., Saykally R.J.* Shape Control of Near-Field Probes Using Dynamic Meniscus Etching // *Journal of Microscopy.* — 2004, Apr. — Vol. 214. — Pt. 1. — P. 27–35.

3. Пат. 6905627 США, МКИ В 44 С 001/22. Etching Method for Fabricating High-Quality Optical Fiber Probe: Пат. 6905627 США, МКИ В44С 001/22/ Р.-К. Wei (Тайвань); Academia Sinica. — № 340572; Заявл. 10.01.03; Опубл. 14.06.05; НКИ 216/97. — С. 11.

4. Пат. 6633711 США, МКИ G 02 В 006/00. Focused Ion-Beam Fabrication of Fiber Probes for Use in Near-Field Scanning Optical Microscopy: Пат. 6633711 США, МКИ G02В 006/00/ S.Pilevar (США); University of Maryland. — № 584788; Заявл. 01.06.00; Опубл. 14.10.03; НКИ 385/123. — С. 17.

5. *Kim G.M., Kim B.J., Ten Have E.S., Segerink F., Van Hulst N.F., Brugger J.* Photoplastic Near-Field Optical Probe with Sub-100 nm Aperture Made by Replication from a Nanomould // *Journal of Microscopy.* — 2003, March. — Vol. 209. — Pt. 3. — P. 267–271.

6. Пат. 20050161594 США, МКИ Н 01 J 003/14. Plasmon Enhanced Near-Field Optical Probes: Пат. 20050161594 США, МКИ Н01J 003/14/ R.E.Hollingsworth (США); № 072017; Заявл. 04.03.05; Опубл. 28.07.05; НКИ 250/234. — С. 25.

Поступила в редакцию 14.11.2005