

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.

© Е. Е. Голдаевич

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 сердцевины 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.

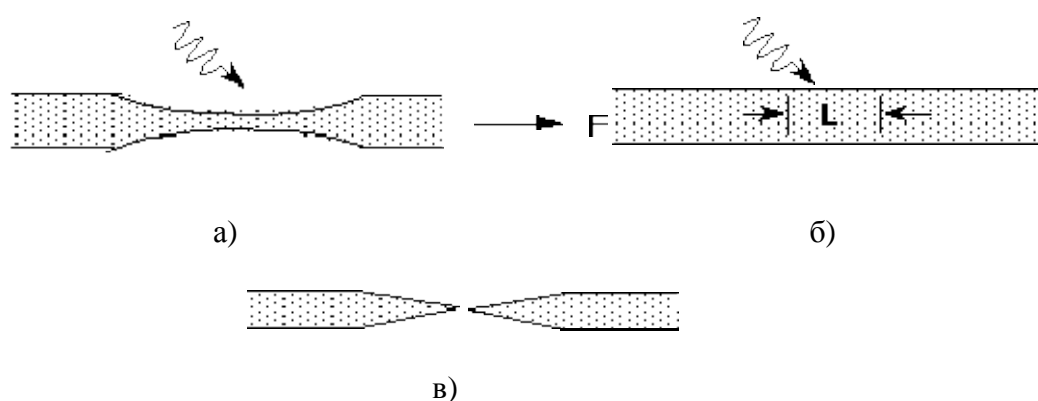


Рис. 1. Принцип изготовления ближнеполевого оптоволоконного зонда методом нагревания и растягивания: а) воздействие теплового излучения на участок оптоволокна L; б) размягчение нагреваемого участка оптоволокна и приложение силы F к концу оптоволокна для его растягивания; в) получение двух заостренных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

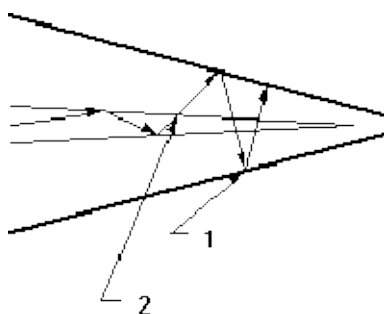


Рис. 2. Острие ближнеполевого оптоволоконного зонда, изготовленного по методу нагрева и растягивания: 1 — потери на отражение; 2 — излучение покидает пределы сердцевины оптоволокна

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

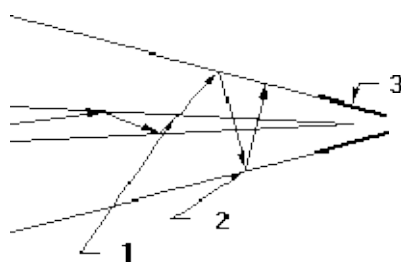


Рис. 3. Острие ближнеполевого оптоволоконного зонда, изготовленного по методу нагрева и растягивания с металлизацией в области выходного отверстия зонда: 1 — излучение покидает пределы сердцевины оптоволокна; 2 — излучение отражается от границ сердцевины оптоволокна; 3 — металлизация в непосредственной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

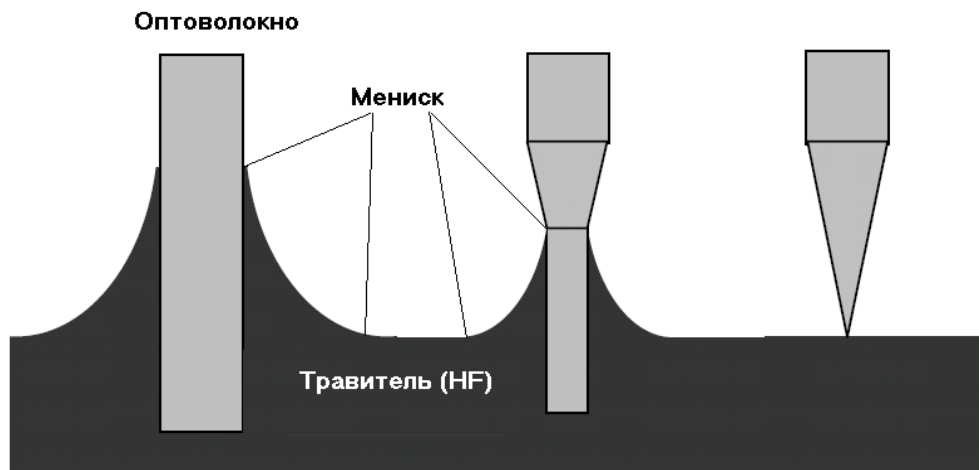


Рис. 4. Химическое травление оптоволоконна в 40 %-м растворе плавиковой кислоты (HF)

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].

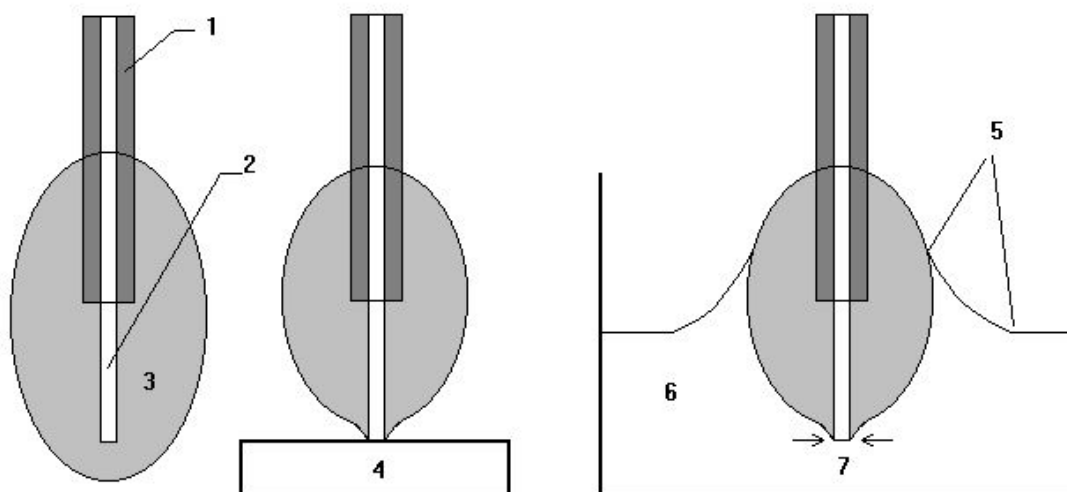


Рис. 5. Химическое травление оптоволокна с применением защитного полимерного покрытия: 1 — внешняя оболочка оптоволокна; 2 — оптоволокно; 3 — защитный слой плавкого полимера; 4 — нагретая пластина; 5 — мениск; 6 — травитель; 7 — область травления

### 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.

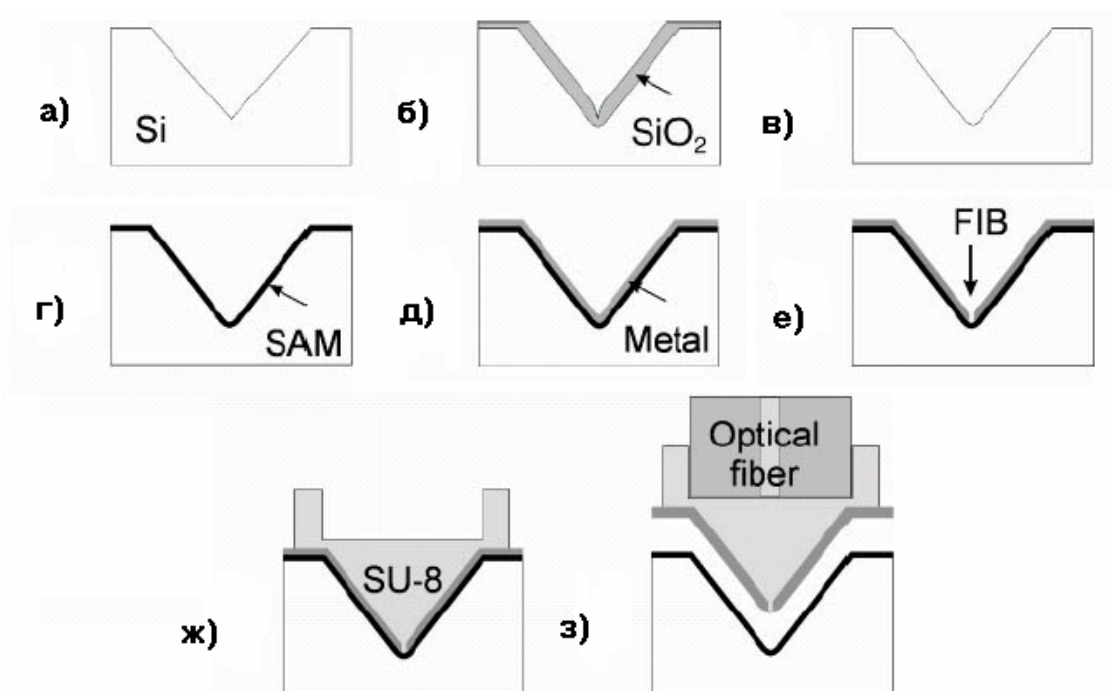


Рис. 6. Схематическая последовательность изготовления оптоволоконного зонда из нанослепка

### 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 оптоволоконно, 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; Опубли. 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; Опубли. 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; Опубли. 28.07.05; НКИ 250/234. — С. 25.

Поступила в редакцию 14.11.2005