

УДК 004.023

**В. В. Петров, А. А. Крючин, С. М. Шанойло,
Е. Е. Голдаевич, В. И. Сидоренко**

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

Анализ возможностей создания высокоразрешающих систем записи дисков-оригиналов

Создание малогабаритных полупроводниковых лазеров с длиной волны 405 нм позволяет реализовать системы считывания, которые имеют разрешающую способность, обеспечивающую считывание информации с дисковых носителей емкостью 27–30 Гбайт. В таких системах считывания предполагается использовать дифракционноограниченную оптику с максимальной разрешающей способностью (числовая апертура фокусирующего объектива составляет 0,95). В связи с тем, что разрешающая способность системы записи дисков-оригиналов должна почти вдвое превышать разрешающую способность оптической системы считывания, необходима разработка специальных систем записи дисков-оригиналов. В работе приведен анализ характеристик оптических систем записи дисков-оригиналов для изготовления компакт-дисков новых поколений.

Ключевые слова: иммерсия, фоторезист, разрешающая способность, дифракция, ближнеполевая запись.

Введение

Требования к разрешающей способности систем записи дисков-оригиналов постоянно возрастают. На компакт-дисках (CD) получение дорожек шириной 0,55 мкм и питов с минимальной длиной 0,8 мкм обеспечивалось системами записи информации, в которых применялись лазеры с длиной волны 457 нм и фокусирующие объективы с числовой апертурой не более 0,6. Для записи информации на диски-оригиналы в процессе изготовления DVD-носителей (ширина дорожек 0,4 мкм, минимальная длина питов 0,4 мкм) применяются более коротковолновые лазеры (300–400 нм) и фокусирующие объективы с числовой апертурой не менее 0,8. Такое повышение требований к разрешающей способности системы записи дисков-оригиналов не привело к радикальному изменению процесса записи инфор-

мации на них [1–3]. В станциях лазерной записи дисков-оригиналов DVD-носителей часто предусматривается режим, при котором изменением числовой апертуры фокусирующего объектива (изменяется заполнение зрачка микрообъектива при помощи дополнительной линзы) осуществляется переход от записи дисков-оригиналов CD к DVD. Системы записи дисков-оригиналов для Blue-ray-дисков требуют существенного повышения разрешающей способности для реализации возможностей формирования дорожек шириной 0,1 мкм и минимальной длиной питов 1,5 мкм. Запись информации на диски-оригиналы дисков Blue-ray может быть осуществлена электронным лучом на станциях электронно-лучевого мастеринга, которые, в принципе, позволяют записывать информацию на диски-оригиналы емкостью до 100 Гбайт [4–6]. Однако, стоимость записи информации на станциях электронно-лучевого мастеринга значительно выше, и, кроме того, не полностью решены вопросы защиты обслуживающего персонала от влияния ионизирующего излучения [4]. Существует принципиальная возможность повысить разрешающую способность станций лазерной записи дисков-оригиналов за счет использования лазеров, генерирующих в ультрафиолетовом диапазоне длин волн (применять лазеры, генерирующие на длине волны 257 нм), повышения разрешающей способности канала оптической записи (применять иммерсионные системы фокусировки лазерного излучения), применения многослойных фоторезистов, в которых осуществляется нелинейное преобразование интенсивности экспонирующего излучения. Комплексное использование этих методов может обеспечить запись информации как на интенсивно продвигаемые на рынок средств регистрации данных Blue-ray-диски, так и на следующие поколения оптических дисков. Создание высокоэффективных систем оптической записи дисков-оригиналов высокой плотности позволит решить задачу изготовления всего семейства Blue-ray-дисков (диски с однократной записью и перезаписыванием). В частности, использование фазовых фильтров (анодизационных и других) в сочетании с нелинейными фоторезистами позволяет на 15–20 % уменьшить размер записываемых на дисках-оригиналах элементов [20].

Иммерсионные системы для высокоплотной оптической записи информации

В системах оптической записи дисков-оригиналов применяются фокусирующие объективы с числовой апертурой $0,9 \div 0,95$. Увеличение разрешающей способности оптических систем записи может быть достигнуто за счет применения иммерсионных методов записи. Эти методы основаны на том, что разрешающая способность фокусирующей оптики пропорциональна показателю преломления среды между фокусирующим объективом и поверхностью носителя информации. Иммерсионная фотолитография считается одним из перспективных направлений в микроэлектронике [17]. Применение жидкостной иммерсии позволяет достичь увеличения разрешающей способности систем записи, по крайней мере, на 30 % с минимальными изменениями в их конструкции. В настоящее время предлагается использование водной иммерсии для повышения числовой апертуры фокусирующего объектива с 0,9 до 1,2 [1]. Разработанная специалистами фирмы Philips система жидкоиммерсионной оптической записи позволяет записывать сфокусиру-

ваным излучением длиной волны 257 нм на фоторезисте Novolac дорожки шириной 70 нм при скорости сканирования 5 м/с. Иммерсионная жидкость подается в промежуток между фокусирующим объективом и слоем фоторезиста. Такая система жидкостной иммерсионной записи требует тщательной обработки иммерсионной жидкости (воды) для предотвращения загрязнения фоторезиста.

Нам представляется, что большими возможностями по выбору иммерсионной жидкости, в том числе и с большим показателем преломления, а также по осуществлению процесса записи имеет схема записи, в которой иммерсионная жидкость подается в пространство между фокусирующим объективом и подложкой, а запись производится через слой иммерсионной жидкости и прозрачную подложку. Желательно для уменьшения отражений выбирать показатель преломления иммерсионной жидкости, совпадающий с показателем преломления подложки. Преимуществом такой схемы иммерсионной записи является отсутствие контакта слоя фоторезиста с иммерсионной жидкостью, что исключает вероятность его загрязнения, а также приводит к уменьшению влияния оптических неоднородностей (в первую очередь пузырьков воздуха) в слое движущейся иммерсионной жидкости на процесс записи информации.

Предлагается использовать для записи информации на диски-оригиналы твердотельные иммерсионные линзы. На рис. 1 представлен общий вид твердотельного иммерсионного объектива.

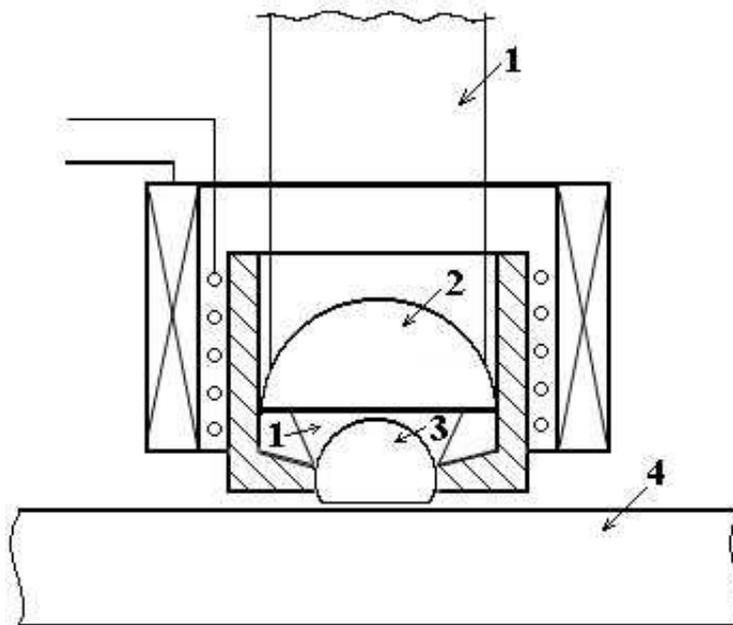


Рис. 1. Твердотельный иммерсионный фокусирующий объектив:
1 — луч лазера; 2 — линза объектива; 3 — иммерсионная линза; 4 — оптический диск.

Толщина иммерсионной линзы l в направлении оптической оси должна удовлетворять соотношению:

$$L = r(I + I/n),$$

где r — радиус сферы; n — показатель преломления материала линзы. При таких условиях эффективная апертура оптической системы двух линз NA_i вычисляется по формуле:

$$NA_i = n^2 NA,$$

где NA — апертура объектива без иммерсионной линзы. Для легко реализуемого случая $n = 1,8$, $NA_i = 0,5$ получим $NA = 1,6$, т.е. существенно больше единицы.

Особенностью объектива с числовой апертурой больше единицы является уменьшение прозрачности всей оптической системы по экспоненциальному закону при увеличении расстояния между объективом и оптическим диском. При использовании синего лазера расстояние между диском и объективом должно составлять около десятой доли длины волны, т.е. около 40 нм [4].

Показана [22] возможность создания твердотельных иммерсионных объективов с числовой апертурой 2,05, в которых иммерсионная линза изготовлена из монокристалла $Bi_4Ge_3O_{12}$ (показатель преломления на длине волны 405 нм равен 2,23).

Анализ возможностей ближнеполевых систем оптической записи информации

Применение дифракционноограниченной оптики в системах оптической записи информации накладывает серьезные ограничения на предельные значения плотности записи. Возможность фокусировки оптического излучения до значения $\lambda/2$ позволяет достичь плотности записи порядка 10^7 бит/мм². Выполнение фокусирующего элемента в виде конического световода, диаметр открытого конца которого меньше длины волны, или отверстия субмикронного размера в непрозрачном экране обеспечивает концентрацию на поверхности светочувствительного материала менее 10^{-3} % мощности подающего излучения, хотя при этом удается достичь разрешающей способности, составляющей $1/40$ длины волны излучения. Такая реализованная оптическая эффективность системы записи информации не позволяет использовать ближнеполевые системы оптической записи для регистрации информации с высокими плотностью и скоростью записи. Разработанные системы ближнеполевой записи предлагается использовать в устройствах сверхплотной магнитной записи, в которых оптическое излучение, сфокусированное в пятно субмикронного размера, вызывает локальное повышение температуры, необходимое для локального снижения коэрцитивной силы регистрирующей среды при переманчивании носителя в процессе записи [8, 9].

Системы магнитной записи с локальным нагревом могут обеспечить плотность записи более 1 Тбайт/дм² при сохранении высокой временной стабильности носителя информации [16]. Проводимые в настоящее время исследования направлены на повышение оптической эффективности ближнеполевых оптических зондов. На рис. 2 приведен один из вариантов конструкции ближнеполевого зонда, который изготавливают путем локального нагрева стеклянной трубки и растяжением нагретого участка до получения необходимого диаметра центрального отверстия (меньше длины волны фокусирующего излучения). Наружная поверх-

ность конического световода металлизирована. Некоторое увеличение эффективности такого ближнеполевого зонда достигается при размещении отражающего покрытия в виде полос вдоль поверхности конического световода [10, 11]. На зонд направляется лазерное излучение с поляризацией электрического поля, перпендикулярной металлическим полоскам. Лазерное излучение возбуждает ТЕМ-волну в области между полосками, которые представляют собой микрополосковую линию переменного профиля. Суживающиеся металлические полоски передают фактически всю энергию луча к вершине конуса и уменьшают поперечный размер лазерного луча до поперечных размеров вершины конуса. У вершины конуса часть энергии луча отражается от краев полосок и создает отраженный луч. Часть луча проходит через обрыв полосок и образует в области вершины конуса оптическое пятно с размерами, приблизительно равными размерам оборванной микрополосковой линии [10]. Общий вид такого зонда представлен на рис. 3.

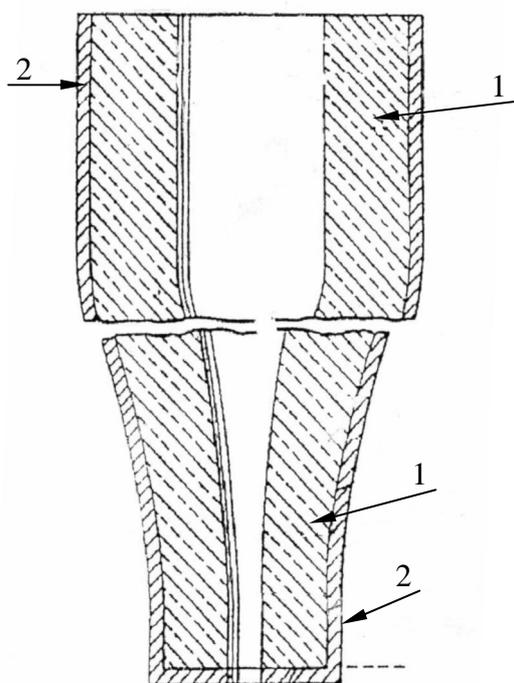


Рис. 2. Поперечное сечение зонда для ближнеполевого записи: 1 — стеклянная трубка; 2 — металлическое отражающее покрытие

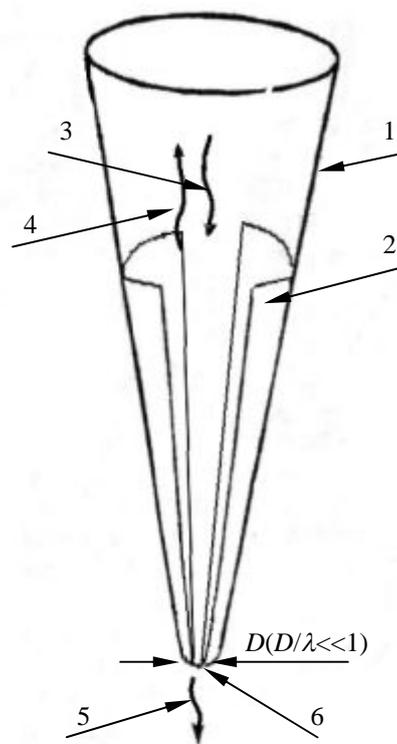


Рис. 3. Зонд для ближнеполевого записи с полосковыми отражающими элементами: 1 — конический световод; 2 — металлические полоски; 3 — падающая волна; 4 — отраженная волна; 5 — прошедшая волна; 6 — вершина конического световода

Интенсивно исследуется также прохождение света через круглые отверстия диаметром 100–200 нм (что составляет от 0,1 до 0,2 длины волны) и отверстия с прямоугольным сечением (75×225 нм) в тонких пленках (толщина несколько сот нанометров) золота и серебра. Установлено, что прохождение света через микро-

скопические отверстия существенно увеличивается при окружении их концентрическими круговыми канавками. Увеличение прохождения света через микроскопические отверстия связывают с возбуждением плазменных резонансов. Экспериментально установлено, что ориентация плоскости поляризации падающей электромагнитной волны на микроскопическое отверстие прямоугольного сечения существенно влияет на прохождение света: наибольшее пропускание наблюдается для случая, когда плоскость поляризации света перпендикулярна более длинной стороне прямоугольного отверстия [12]. Исследования и разработки, проведенные в последнее время в области ближнеполевых систем записи информации, создания наноразмерных светоизлучающих структур, в том числе и для лазеров типа VCSEL (vertical – cavity surface – emitting laser), позволяют надеяться на появление высокоэффективных оптических систем сверхплотной записи информации.

Специальные фоторезисты для высокоразрешающего мастеринга

Для уменьшения геометрических размеров регистрируемых на фоторезисте отпечатков разрабатываются светочувствительные материалы с нелинейными экспозиционными характеристиками. В связи с тем, что запись информации осуществляется сфокусированным лазерным лучом с гауссовым распределением интенсивности, использование нелинейных свойств фоторезиста позволяет на 20–50 % уменьшить размер записанных элементов [14].

В одной из последних разработок фирмы Sony предлагается использовать неорганические фоторезисты, в которых под действием сфокусированного излучения осуществляется локальный нагрев фоторезиста и переход материала в зоне записи в поликристаллическую фазу [13]. Переход материала неорганического фоторезиста в поликристаллическую фазу происходит только при температуре, выше фазового перехода. При реализации в процессе записи режима нагрева, близкого к адиабатическому, удастся уменьшить размер отпечатков, регистрируемых на диске-оригинале. Такой режим нагрева легче реализуется на кремниевых подложках (или на стеклянных подложках с подслоями из кремния). Селективное удаление неорганического фоторезиста в облученных местах осуществляется стандартными травителями для органических позитивных резистов (щелочные травители) [13]. Существенное отличие предложенного способа формирования рельефных изображений на дисках-оригиналах с использованием неорганических фоторезистов (способ получил название РТМ-мастеринг с использованием фазовых переходов) состоит в выборе не фотоструктурных превращений (экспозиционная характеристика таких фоторезистов близка к линейной) для записи рельефных изображений на неорганических фоторезистах [15], а инициируемого повышенной температурой перехода «стекло–поликристалл». Этот фазовый переход широко используется для записи информации на носителях CD-RW (DVD-RW).

Для уменьшения размеров информационных элементов, регистрируемых на диске-оригинале, предлагается использовать в качестве слоя фоторезиста двухслойные фоточувствительные материалы. Уменьшение размеров питов (на 30 %), формируемых на поверхности диска-оригинала, может быть достигнуто за счет травления слоя, в котором они создаются через специальную маску. Предполага-

ется на поверхность стекла наносить последовательно слои поливинилового спирта (толщина которого должна быть равна высоте выступов на штампе — около 50 нм для изготовителя Blue-ray-дисков) и позитивного фоторезиста (толщиной 150 нм) [18]. После записи информации на слое позитивного фоторезиста, его селективного травления через окна в слое фоторезиста, производится травление слоя поливинилового спирта, при этом слой фоторезиста служит смазкой.

По другой технологии на стеклянной подложке размещается слой позитивного фоторезиста, на который сверху наносится водорастворимый слой фотохромного материала. При записи информации происходит просветление фотохромного материала, а за счет нелинейности его экспозиционной характеристики облучение слоя фоторезиста производится лазерным лучом, имеющим меньший диаметр [14].

Некоторое уменьшение размеров питов, формируемых в слое позитивного фоторезиста, достигается за счет его специальной обработки. Обработка, осуществляемая поливом щелочным раствором, направлена на повышение контрастности фоточувствительного материала. В результате такой обработки на поверхности слоя фоторезиста формируется дополнительная пленка, затрудняющая растворение фоторезиста в необлученных местах [19]. Сообщалось о получении дорожек с шагом 0,28–0,4 мкм при записи информации ультрафиолетовым лазером [19].

Выводы

1. Оптические методы позволяют записывать информацию на диски-оригиналы, используемые в производстве всех типов компакт-дисков, включая Blue-ray-диски.

2. Комплексное использование иммерсионной записи, ультрафиолетовых лазеров в станциях лазерной записи, специальных фоторезистов с нелинейной экспозиционной характеристикой позволяет прогнозировать возможность использования оптических методов для записи информации на оптические диски новых поколений.

3. Повышение оптической эффективности ближнеполевых систем фокусировки лазерного излучения открывает возможности для существенного (в десятки раз) увеличения емкости дисков-оригиналов.

Благодарность

Авторы выражают признательность сотрудникам Института проблем регистрации информации НАН Украины и Института физики полупроводников НАН Украины за помощь в проведении экспериментов по записи и анализу формы рельефных микроструктур.

1. JVC Develops Blue-Ray Mastering // One to One. — 2004. — № 9. — P. 5.
2. Faux K. Consolidation Beaming in on Mastering Domination // One to One. — 2004. — № 8. — P. 18–22.
3. Snape C.A. Mastering for the Future at Xonen Technologies // One to One. — 2003. — № 1. — P. 44–48.

4. *Voshiali Kojima, Hiroaki Kitohara, Osamu Kasono, Masahiro Katsumura, Yasumitsu Wada.* Highdensity Recorging Using am Electron Beam Recorder // *Jpn. J. Appl. Phys.* — 1998. — Vol. 37. — P. 2137–2143.
5. *Imanishi Shindo, Takeda Minory.* Near-Field Recording with 266 nm Laser for Disc Mastering Process // *Jpn. J. Appl. Phys.* — 2000. — Vol. 42, N 2. — P. 1105–1009.
6. *Snape C.A.* Developing E-Beam Technology at Unaxis Nimbus // *One to One.* — 2001. — № 9. — P. 55–59.
7. *H.Van Santen, J.H.M.Neijsen.* Deep-UV Liquid Immersion Mastering of High Density Optical Discs // *Proc. SPIE.* — 2003. — Vol. 5040. — P. 1750–1754.
8. Пат. США № 6584062, МПК G 11 B 7/00. Naya Masayuki. Near-Field Optical Recording Apparatus Assistively Heating Recording Medium; Оpubл. 24.06.2003.
9. *Vaughan–Nichols S.J.* Hard Drive Technology Reackes a Turning Point // *Computer.* — 2003. — N 12. — P. 21–22.
10. Пат. 76835 Україна, МКІ G 02 B 26/10. Зонд близькопольового мікроскопа // Лапчук А.С., Крючин А.А.; Заявка № 2001106921; Заявл. 11.10.2001; Оpubл. 15.07.2004, Бюл. № 7.
11. Пат. 58634 Україна, МКІ G 02 B 21/06. Зонд мікроскопа ближнього поля для проведення поляризаційних вимірювань // Лапчук А.С., Крючин А.А.; Заявка № 2001117943; Заявл. 21.11.2001; Оpubл. 15.08.2003, Бюл. № 8.
12. *Hellemans A.* Nanoholes Permit Remarkable Light Transmission // *IEEE Spectrum.* — 2004. — № 6. — P. 13–14.
13. *Toshiyuki Kashiwagi.* PTM: an Alternative Solution to Mastering Blue-ray Disc // *One to One.* — 2004. — N 8. — P. 57–60.
14. Пат. 6127100 США. МКІ G 11 D 007/26. Method of Manufacturing a Stamper for Use in Optical Information Recording Medium; Заявл. 8.04.1999; Оpubл. 3.10.2000.
15. *Костюкевич С.А., Шепелявий П.Е., Москаленко Н.Л., Венгер Е.Ф., Свечников С.В., Петров В.В., Крючин А.А. Шанойло С.М.* Исследование процесса мастеринга компакт-дисков на неорганических фоторезистах // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2001.— Т. 3, № 4. — С. 5–11.
16. *Wang W.J., Hong M.H., Wu D.J. et al.* Ultrafast Laser Recording in Optical Near-Field High-Density Optical Storage // *Proc SPIE.* — 2003. — Vol. 5069. — P. 330–334.
17. *Christie B.* Immersion Lithography has Rapidly Moved from an Unknown to the Technology Most Lokery to be Used Through 2010 // *IEEE Spectrum.* — 2004. — N 5. — P. 22–25.
18. *Shimizu A.S., Endo H., Watanabe H. et al.* Exposure Method Using Photoresist Mask for High Density Optical Disk Mastering // *Jpn. J. appl. Phys.* — 2000. —Vol. 39, N 2B. — Part 1. — P. 806–807.
19. *Umezawa T., Sekiya M., Sugiyama I.* Improvements of Resolution and Surface Reughness Using Alkaline Treatment of Photoresist Surface in High Density Optical Disk Mastering // *J. Appl. Phys.* — 2003. — Vol. 42, N 4A. — Part 1. — P. 1618–1622.
20. *Paul L.M., H.Paul Urbach, Rpbert D. Morton.* Resolution Limit of Optical Disc Mastering // *Jpn. Appl. Phys.* — 1997. — Vol. 36, N 1B. — Part 1. — P. 539–548.
21. *Shimizu A.ZS.* Solid Immersion Lens // *Appl. Phys. Lett.* — 1996. — Vol. 68. — P. 141–143.
22. *Shinoda M., Saito K., Isimoto T. et al.* High Density Near Field Readout Over 100 GB Capacity Using Solid Immersion Lens with NA of 2.05 // *Proc. SPIE.* — 2003. — Vol. 5069. — P. 306–311.

Поступила в редакцию 10.12.2004