

Перспективные оптические носители данных, работающие на основе феномена стимулированного подавления эмиссии.

Системы оптического хранения данных (представленные преимущественно оптическими дисками и приводами для их считывания) появились в конце 70-х – начале 80-х гг и достигли пика популярности в конце 90-х – начале двухтысячных. Успех оптических дисков обеспечивался сочетанием ёмкости, удовлетворяющей текущим пользовательским потребностям, и сравнительно высокой надёжности. Более того, непрерывное развитие лазерных технологий и совершенствование оптических покрытий позволяло последовательно улучшать характеристики этих носителей, сохраняя их ценовую доступность. Так, в ряду CD-DVD-BD ёмкость диска увеличилась примерно в 200, а скорость считывания данных – в 400 раз.

Однако за последнее десятилетие ведущие производители оптических запоминающих устройств не показали ничего принципиально нового, и приходится признать, что эволюция в этой сфере на сегодняшний день практически остановилась. При этом требования потребителей к характеристикам съёмных носителей данных продолжают расти и давно превосходят возможности лучших лазерных дисков. Какова же причина угасания рынка оптических накопителей? Очевидно, они проиграли в конкурентной борьбе с флеш-памятью, которая сегодня обеспечивает и более высокие скорости, и большую ёмкость, и существенные преимущества в удобстве использования. Успех флеш-накопителей был, в свою очередь, во многом предопределён фундаментальными ограничениями оптических технологий. Ниже мы рассмотрим эти ограничения и попытаемся понять, возможно ли их обойти.

Ёмкость (дисковое пространство) оптического носителя, а также скорость операций чтения/записи при работе с ним определяется битовой плотностью. Она напрямую зависит от физического размера элементарной ячейки данных. Чем меньше ячейка, тем выше потенциальная битовая плотность. Чем выше битовая плотность, тем больше ёмкость и скорость чтения/записи. В оптических системах миниатюризация ячейки данных ограничена дифракцией света. Принцип дифракционного барьера был сформулирован немецким оптиком Эрнстом Аббе в конце 19 столетия. В упрощённом виде он может быть описан так: «Нельзя различить (разрешить) два точечных источника света, если расстояние между ними меньше некой критической величины». Эта «критическая величина» зависит от показателя преломления среды, нумерической апертуры объектива, используемого для фокусировки или детекции сигнала, и самое главное, от длины волны света. Последнее

обстоятельство объясняет, почему в оптических дисководах более новых поколений используются более коротковолновые лазеры (например, фиолетовый 405 нм лазер в BluRay). Накладывая ограничение на точность фокусировки лазера, дифракционный барьер не позволяет бесконечно уменьшать физический размер ячейки данных в оптических устройствах хранения информации. Достижимое оптической системой разрешение в идеальном случае составляет примерно половину длины волны используемого в ней света, однако «идеальный случай» подразумевает в первую очередь высококачественную оптику (объектив), которая была бы слишком дорога для установки в устройства массового потребления. Более того, даже лучшие из имеющихся объективов обеспечили бы прирост в разрешении менее 100% (например, ячейка данных на дисках BluRay имеет размер примерно 320 нм, а теоретический предел для фиолетовых лазеров, которые используются в таких дисководах, – около 200 нм).

Возможно ли преодолеть дифракционный барьер? Чтобы дать определённый ответ на этот вопрос, попробуем сделать обзор известных подходов к увеличению разрешения в различных оптических системах.

Во-первых, можно изменять относительный показатель преломления, используя невоздушную «прослойку» между поверхностью носителя и объективом. Так, в оптической микроскопии широко распространены объективы, работающие в жидких средах, специальном иммерсионном масле, воде или глицерине. Трудно, однако, представить практическое воплощение этого подхода в случае дисковых устройств. Кроме того, его эффективность не слишком велика (обычно прирост разрешения составляет 30-50%).

Во-вторых, перспективно применение т.н. метаматериалов для производства оптики нового поколения. «Суперлинзы», сделанные из метаматериалов, имеют отрицательный показатель преломления и потенциально могут помочь в преодолении дифракционного барьера¹. На сегодняшний день сообщается о трёхкратном превышении дифракционно ограниченного разрешения с помощью «суперлинз». Впрочем, эксперименты проводились в микроволновом диапазоне, который не имеет никакого отношения к оптическим накопителям. Ключевая проблема названного подхода в том, что разработка метаматериалов (не говоря уж об оптических системах на их основе) – дело довольно медленное. Даже лабораторные прототипы «суперлинз» появляются редко и в единичных экземплярах. Массовое производство такой оптики потребует, вероятно, миллиардных вложений и десятилетий исследований.

Третий подход связан с принципом ближнепольной сканирующей оптической микроскопии (NSOM/SNOM). Эта методика предполагает, что облучение образца производится не через объектив, а через отверстие нанометровых размеров (апертуру). Проходя сквозь «окно», существенно меньшее, чем длина волны, свет лазера формирует т.н. затухающее поле. Затухающие волны покрывают пространство всего в несколько нанометров за пределами апертуры, но на этом небольшом участке оптическое разрешение ограничено только собственно диаметром апертуры. Таким образом, если образец сканируется с нанометровой дистанции, можно добиться разрешения 2-20 нм². Примечательно, что принцип NSOM, разработанный ещё в 80-х гг прошлого века, не получил сколько-нибудь широкого распространения даже в дорогостоящем научном оборудовании, не говоря уж о бытовой электронике. Косвенно это свидетельствует о чрезвычайной сложности и дороговизне реализации этого подхода, мало совместимой с применением в реальной жизни.

Наконец, заметные успехи в субдифракционных технологиях были достигнуты на ниве флуоресцентной микроскопии. Речь, в частности, идёт о методе стимулированного подавления эмиссии (STED), разработанном в середине 90-х немецким учёным Штефаном Хеллом³ и отмеченном Нобелевской премией по химии 2014 года⁴. Принцип STED состоит в облучении образца сразу двумя лазерами. Основной лазер возбуждает флуоресценцию, а излучение дополнительного лазера «опоясывает» область фокусировки основного. Форма пятна дополнительного лазера может варьировать, чаще всего она тороидальная (напоминает бублик), а его роль в том, что он истощает (депопулирует) пул возбуждённых молекул флуорофора на периферии зоны фокусировки основного лазера, тем самым подавляя флуоресценцию в этой области. Таким образом урезается физический размер излучающего свет участка образца. Разрешающая способность в 20 нм уже стала *de facto* стандартом для субдифракционной микроскопии, а потенциально с помощью STED можно разрешать объекты размером до 1 нм. В отличие от NSOM, STED не требует таких технических ухищрений как поддержание нанометровой дистанции между объектом и источником света. Не нужны здесь и новейшие материалы, как в подходе с «суперлинзами». На текущий момент элементная база для STED производится серийно, а сама технология реализована в коммерчески доступном научном оборудовании, включая сравнительно компактные микроскопы. Существуют все предпосылки к её дальнейшему удешевлению и к миниатюризации устройств, её использующих. Вполне вероятно, феномен STED применим и в оптических системах хранения данных нового поколения.

Безусловно, трудно представить себе прямое внедрение STED в оптические накопители привычной конструкции. Для считывания данных «классические» лазерные дисководы

используют отражение/дифракцию света на специальном покрытии, тогда как STED применим к материалам, которые поглощают и излучают свет. Однако, квантовые точки и иные сравнительно малые флуорофоры, иммобилизованные на твёрдой подложке, теоретически могли бы заменить традиционные оптические покрытия лазерных дисков.

© 2017 Alexey Bogdanov & KIT solutions group. All rights reserved

Ссылки

- 1) https://www.eurekalert.org/pub_releases/2007-01/dl-mft010407.php
- 2) <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.336848>
- 3) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19844443>, прямая ссылка на [скачивание PDF](#)
- 4) https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2014/advanced-chemistryprize2014.pdf