

Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова  
Физический факультет  
Кафедра физики колебаний

# Применение наночастиц в качестве ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАМЯТИ.

Курсовая работа выполнена  
студентом 210 группы  
Архиповским И.А.  
Научный руководитель –  
Физик, к.ф.-м.н.  
А.В.Журавлев

Москва, 2009

**Запоминающее устройство** — носитель информации, предназначенный для записи и хранения оной. В основе работы запоминающего устройства может лежать любой физический эффект, обеспечивающий приведение системы к двум или более устойчивым состояниям.

В настоящее время по физическому принципу действия запоминающие устройства делятся на:

- перфорационные (с отверстиями или вырезами);
- с магнитной записью;
- оптические;
- магнитооптические;
- использующие накопление электростатического заряда в диэлектриках (конденсаторные запоминающие устройства (ЗУ), запоминающие электроннолучевые трубки);
- звуковые и ультразвуковые (линии задержки);
- использующие сверхпроводимость (криогенные элементы);
- другие.

Принципиальное преимущество оптической памяти заключается в том, что оптика делает возможным создание ЗУ большой емкости с плотно “упакованными” данными. Плотность представления информации в оптических ЗУ, по существу, ограничена только дифракционным пределом.

Преимуществом оптической памяти является также возможность параллельной обработки информации и быстрый доступ к массивам. Все это в сочетании с потенциально высокой надежностью и приемлемыми энергетическими характеристиками делает оптическую память одной из перспективных замен полупроводниковой и магнитной памяти.

Фазовые запоминающие устройства - наиболее вероятные кандидаты на решение проблем большого размера и высокой мощности потребления электронных запоминающих устройств. Запись данных происходит путем переключения между аморфной и кристаллической фазами, это во многом коррелирует с сегодняшними DVD и DVR технологиями. Вместе с тем, существуют полиморфные системы, в которых кристалл-кристаллические переходы могут предусматривать логические устройства с большими основаниями.

В статье [1] продемонстрирован принцип элемента оптической памяти с четырьмя состояниями и информацией закодированной в структурной фазе единственной 80 нанометровой наночастицы галлия с четырьмя логическими состояниями записанными при помощи оптических импульсов с энергией в несколько пико-джоулей. Этот элемент памяти сопоставим по размерам с битами в современных жестких дисках и гораздо меньше, чем предлагаемые ранее ЗУ использующие оптические резонаторы. Более того, энергия, необходимая для переключения наночастиц на порядок меньше, чем требуемая в DVD, DVR или HDD технологиях.

Фазовые переходы в наночастицах могут быть непрерывными и обратимыми по своей природе, вследствие динамического сосуществования различных структурных форм. Однако полиморфные наночастицы могут при определенных условиях быть заблокированными в определенных метастабильных состояниях, в которых они остаются при варьировании температуры. Ввиду того что различные кристаллические фазы одной наночастицы обладают различными оптическими сечениями поглощения и рассеяния, кодированием каждой отдельной оптической характеристики фиксированными значениями можно получить логический элемент. Это не обязательно должно использоваться только для бинарных систем, применяемых в подавляющем большинстве современных устройств, но также возможно для логических элементов с тремя-, четырьмя- или даже большими основаниями. Переходы между различными фазами или

эквивалентными логическими состояниями могут происходить путем изменения температуры среды. В случае оптических ЗУ, они могут быть инициированы путем внешнего возбуждения с помощью оптических импульсов. Идея реализации бинарной логики или с более высокими основаниями в оптических резонаторах была предложена и обстоятельно изучена в 1980-е годы. При этом оптические би- и мультстабильные состояния создавались путем применения оптической нелинейности совместно с обратной связью, фиксирующей устройство в стабильных состояниях. Тем не менее, минимальный пространственный размер всех этих устройств ограничен длиной оптической волны. Фазовые ЗУ, однако, хранят информацию в фазе материала и поэтому не подвержены этому ограничению. В этой связи, наночастицы для хранения данных особенно перспективны, поскольку они обеспечивают внутренние механизмы фазовой метастабильности, требуют очень небольшого количества энергии для записи в расчете на одно логическое состояние, что позволяет значительно увеличить плотность хранения информации.

## **МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ**

Единичные наночастицы с метастабильными состояниями получают путем осаждения с использованием сфокусированного пучка атомов галлия [1] (Рис. 1 (а)). В работе [1] была выращена наночастица галлия диаметром 80 нм на позолоченной вершине диаметром 30 нм сужающегося волокна (Рис. 1 (b)) находящегося при температуре 80 К. Метод осаждения из газовой фазы под воздействием светового излучения, галлий осаждался при давлении  $10^{-6}$  мбар со средней скоростью 3.0 нм в минуту в течение 30 минут, формируя наночастицу в центре апертуры наконечника волокна [Рис. 1 (c)].

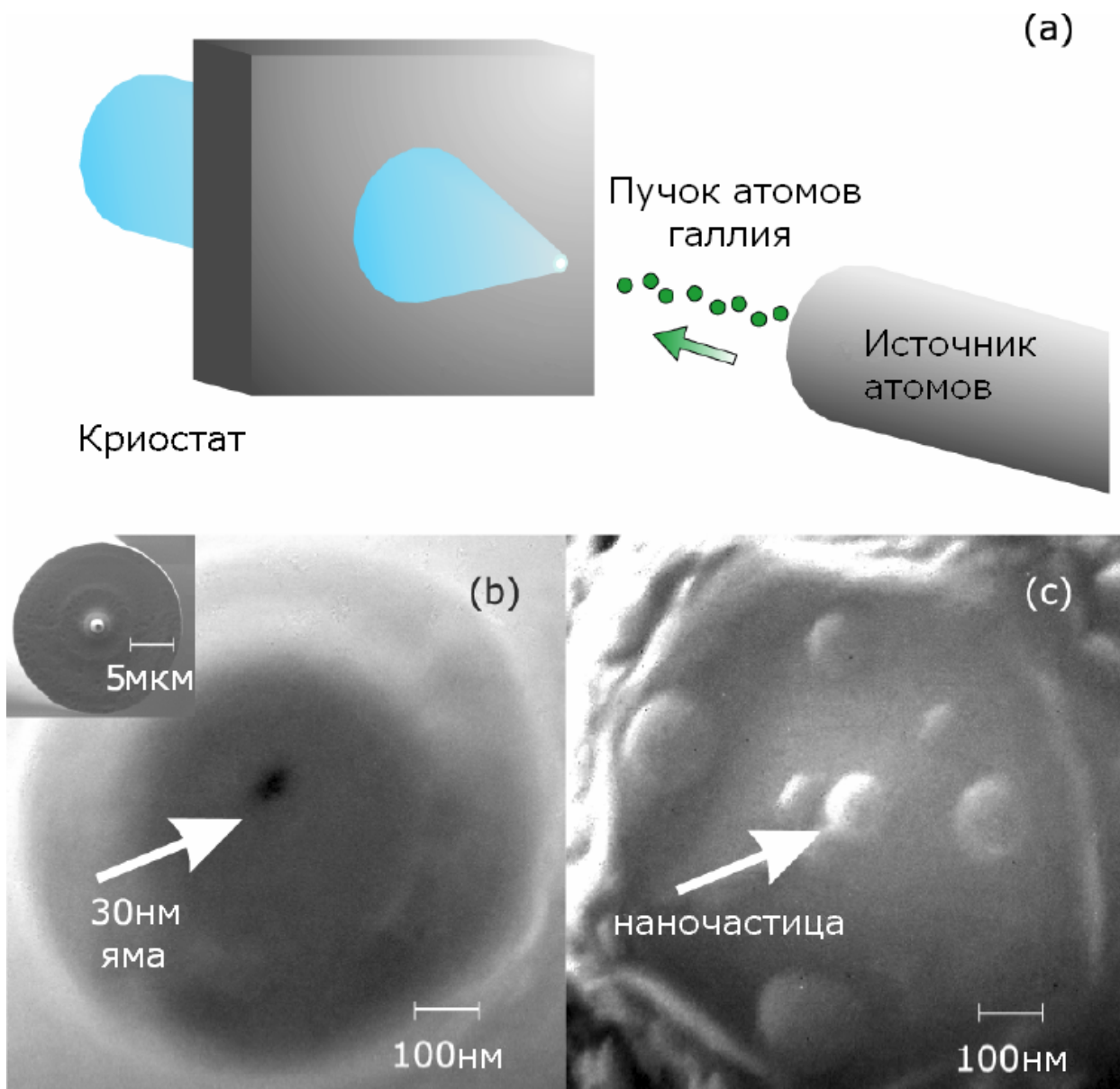


РИС. 1. (а) Схематическая картина процесса осаждения, формирующая наночастицу галлия на наконечнике волокна. Ниже представлены электронно-микроскопические фотографии, показывающие изображения наконечника волокна (b) до и (c) после создания наночастицы галлия. Размер наночастицы составляет 80 нм.

В работе [2] были экспериментально продемонстрированы функциональные возможности бистабильной памяти, которые могут быть достигнуты в наночастицах подверженных переходам между различными структурными фазами с различными диэлектрическими свойствами. Состояние наночастиц считывается при помощи пробного оптического луча малой интенсивности. Было показано, что единичный оптический импульс может безвозвратно переключать наночастицы из низкой отражающей фазы в высокую. Таким образом обеспечивается функция записи памяти. Между

тем стирание памяти осуществляется при помощи удаления пробного оптического луча или просто путем остужения пленки. Таким образом безрезонаторный оптический элемент памяти может быть создан на базе наночастицы, в которой происходят структурные преобразования.

Чтобы продемонстрировать возможности памяти, была использована пленка из наночастиц галлия осажденная на конце срезанного оптического волокна. Наночастицы были выращены до среднего диаметра 50 нм. Такой способ расположения пленки удобен для ее оптического зондирования и возбуждения. Конец волокна с пленкой наночастиц находился внутри вакуумной камеры с давлением  $10^{-6}$  мбар в охлаждаемом жидким азотом криостате, допускающем изменение температуры пленки в пределах от 80 до 300 К.

Были использованы два лазера в качестве источников света для снятия оптических характеристик пленки наночастиц. Первый – непрерывный диодный лазер, мощностью 1 мВт, работающий на длине волны 1310 нм, использовался, чтобы исследовать состояние наночастиц при помощи наблюдения отражательной способности пленки. Второй - импульсный диодный лазер, работающий на длине волны 1550 нм, по требованию генерирующий единичный импульс, использовался, чтобы оптически возбудить и переключить наночастицы.

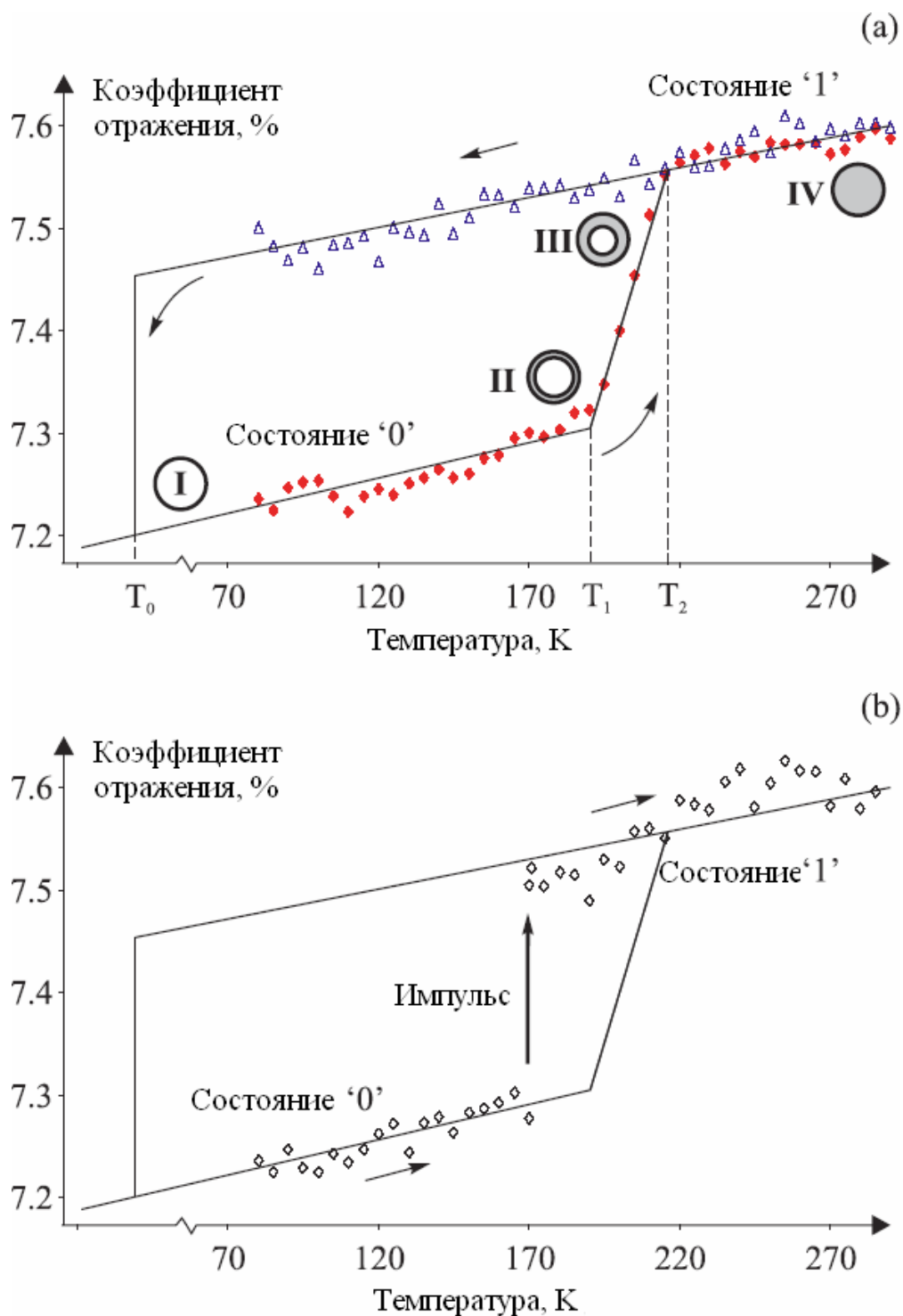


Рис. 2. (а) Динамическое сосуществование структурных форм в пленке наночастиц галлии на различных стадиях во время фазового перехода. Начинаясь из I в состоянии '0' с низкой отражательной способностью, пленка остается в этом состоянии памяти, пока температура не превышает  $T_2$  (верхняя граница области сосуществования фазы), после которой пленка переходит и остается в состоянии '1' с высокой отражательной способностью. Пленка возвращается к состоянию '0' с низкой отражательной способностью только при охлаждении до нижней температуры переключения  $T_0$ . Стрелки показывают цикл гистерезиса, получающегося при полном температурном сканировании от температуры ниже  $T_0$  до температуры выше  $T_2$  и обратно. (б) Демонстрация выполняемых функций 'записи памяти': переключение из состояния '0' с низкой отражательной способностью в состояние '1' с высокой отражательной способностью, используя единственный лазерный импульс.

В отсутствие импульсного оптического возбуждения отражательная способность пленки была зарегистрирована в качестве функции температуры в пределах от 80 до 300 К со средней скоростью повышения температуры 2 К в минуту, и показана на Рис. 2 (а) (сплошные ромбы). Потом была записана соответствующая кривая отражательной способности для температурного сканирования в обратном направлении (не закрашенные треугольники). Эти кривые иллюстрируют тепловой гистерезис оптической отражательной способности пленки из наночастиц галлия. При низкой начальной температуре  $T = 80$  К, пленка находится в состоянии с низкой отражательной способностью, которое обозначено в качестве логического состояния '0'. С увеличением температуры в области фазового перехода ( $T_1 < T < T_2$ ) отражательная способность быстро увеличивается. Когда температура увеличивается еще больше ( $T > T_2$ ), пленка переходит в состояние с высокой отражательной способностью, обозначенное в качестве логического состояния '1', в котором она остается, когда окружающая температура уменьшается до исходных 80 К. Чтобы переключить пленку назад в состояние '0' с низкой отражательной способностью, пробный лазер должен быть выключен, чтобы эффективная температура пленки уменьшилась до  $T_0$ . Когда пробный лазер снова включают, пленка наночастиц находится на исходном уровне '0'.

Чтобы продемонстрировать функциональные возможности ЗУ на основе пленки наночастиц галлия, необходимо уметь переключать его в состояние с высокой отражательной способностью при постоянной температуре. В данном исследовании это было достигнуто при помощи вручную включающегося импульсного лазера, работающего на длине волны 1550 нм, с образцом, находящимся при постоянной температуре, близкой к фазовому переходу,  $T_{set} = 170$  К. Чтобы переключить пленку из логического состояния '0' в состояние '1' использовался единичный оптический импульс с максимальной мощностью 13.1 мВт и продолжительностью импульса 1 мс.



После подвергания оптическому импульсу пленка оказывалась заблокирована в состоянии '1' с высокой отражательной способностью. Таким образом, наночастицы галлия могут быть переключены единичным оптическим импульсом из состояния '0' с низкой отражательной способностью в состояние '1' с высокой отражательной способностью при фиксированной температуре меньшей температуры нижнего фазового перехода  $T_1$ , обеспечивая памяти функцию записи информации (Рис. 2 (b)). Это состояние сохраняется до тех пор, пока пленка наночастиц не охладится до температуры меньшей  $T_0$ , при которой частицы возвратятся к логическому состоянию '0'. Такое охлаждение обеспечивает памяти функцию стирания.

Весь цикл переключения может альтернативно управляться оптически, при установке окружающей температуры ниже  $T_0$  и использовании нагревающего эффекта лазера исследования получить эффективный набор точек в пределах петли гистерезиса. В этом случае состояние '1' можно стереть просто выключая лазер исследования. Тогда циклы записи, чтения и стирания ЗУ наночастицы могут быть повторены снова и снова без регулировки окружающей температуры. Однако при этих условиях состояние '1' сохраняется только до тех пор, пока присутствует свет пробного лазера.

Разница между отражательными способностями двух логических состояний на первый взгляд кажется слишком малой для любого надежного применения. Однако, вместо регистрации абсолютной отражательной способности пленки, можно использовать более эффективную схему определения состояния ЗУ. Для этой схемы использовался импульсный диодный лазер, действующий с такой интенсивностью, чтобы энергия, подводимая за период, была недостаточна для получения полного фазового перехода в состояние с высокой отражательной способностью, и по частоте повторения, дающая достаточное время для восстановления системы между импульсами. С ЗУ в состояниях с низкой или высокой отражательной

способностью, изменения отражательной способности, вызванные этими слабыми импульсами считывания, могут быть измерены со знаком вызванного изменения, указывающего, является ли память в '0' или '1' логическом состоянии. В состоянии с низкой отражательной способностью разностное изменение, вызванное такими импульсами, положительно, в то время как с высокой отражательной способностью - отрицательно.

Этот принцип действия был экспериментально проверен, используя слабый импульсный лазер с максимальной мощностью 3 мВт, шириной импульса 100 миллисекунд, и частотой повторения 2.5 кГц (Рис. 3 (a)). Изменения разницы отражательной способности для состояний с низкой и высокой отражательной способностью '0', и '1' показаны на Рис. 3 (b) и 3 (c), соответственно. При извлечении знака вызванного изменения отражательной способности, появляется ясно выраженный и надежный метод чтения памяти, без воздействия на ее состояние. Определили, что отношение сигнала к шуму для этих измерений равнялось 49 и 7.8 для состояний с низкой и высокой отражательной способностью соответственно. Однако нужно подчеркнуть, что в отличие от оптически бистабильных элементов памяти, полагающихся на объемные резонаторы и оптическую обратную связь, которые в размере обладают более низким пределом примерно половины длины волны, функциональные возможности памяти, о которых здесь сообщается, происходит непосредственно из-за различных свойств отражения различных структурных фаз, не опираясь на какой-либо эффект интерференции как таковой.

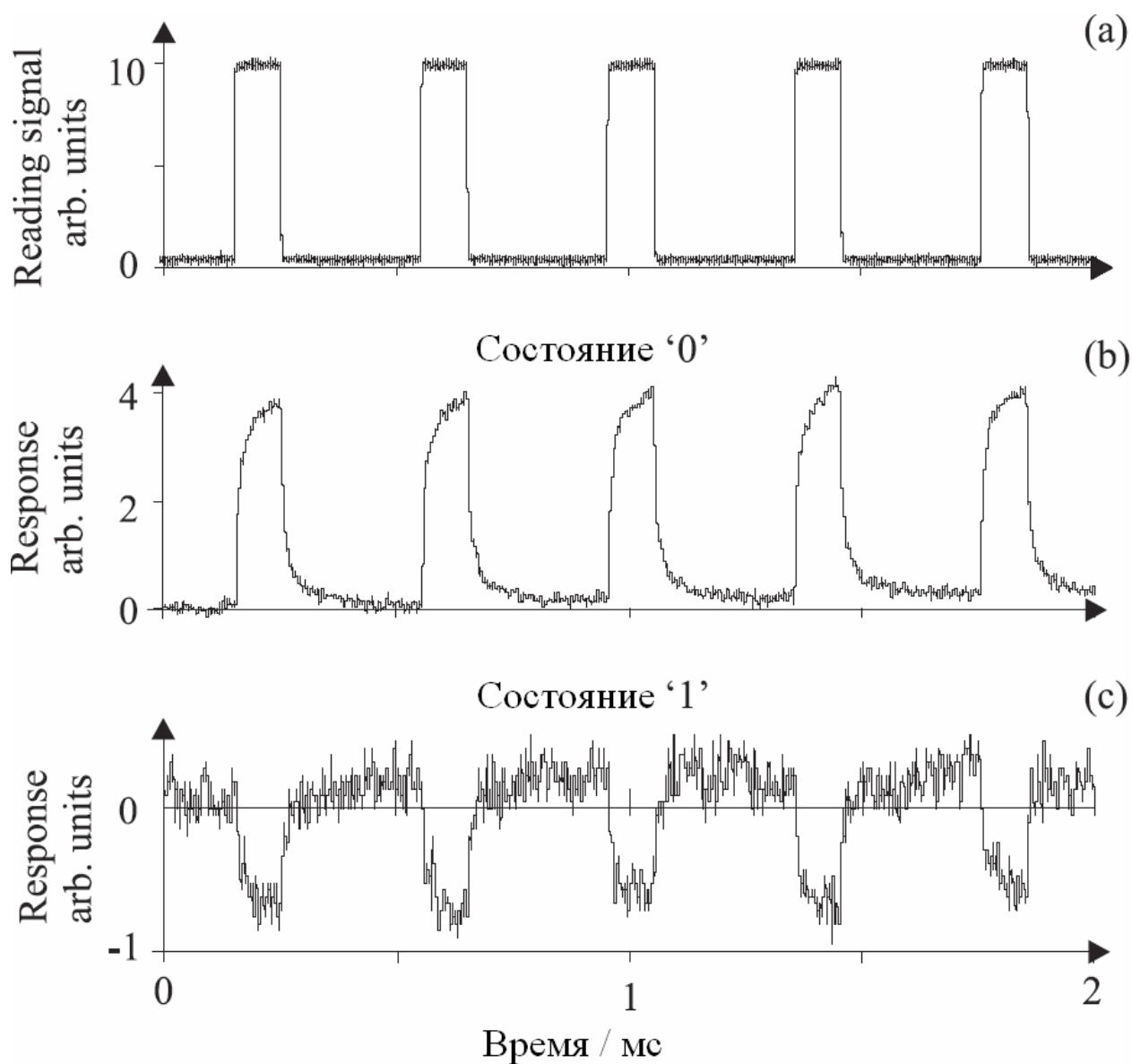


Рис. 3. Изменение коэффициента отражения волокна с наночастицами на конце, находящимися в различных логических состояниях, при воздействии считывающего импульса. Импульсы пробного лазера, показанные на рис. (а), возбуждают пленку наночастиц с энергией меньшей, чем необходимо для полного фазового перехода. Коэффициент отражения в состоянии '0' (с низкой отражательной способностью), увеличивается при воздействии пробного импульса, рис. (b), а в состоянии '1' – уменьшается, рис. (c). Рисунок иллюстрирует возможный метод считывания памяти из наночастиц.

Наночастицы галлия, претерпевающие фазовые переходы под действием лазерного излучения, обладают всеми свойствами, необходимыми для перезаписываемых оптических элементов памяти.

Хотя для первого доказательства этой концепции использовалась пленка наночастиц, потенциально каждая частица может действовать как единичный бит памяти. Беря полную энергию, поставляемую пленке галлия

записывающим импульсом и деля ее на предполагаемое число данных наночастиц в эффективной области волноводной моды волокна, получается максимум энергии, требуемой для переключения единичной наночастицы из состояния '0' в состояние '1', 400 фДж. Эта оценка ясно показывает потенциал для единичных наночастиц обеспечения функциональных возможностей памяти в будущих нанопотонных устройствах, работающих при очень низкой мощности.

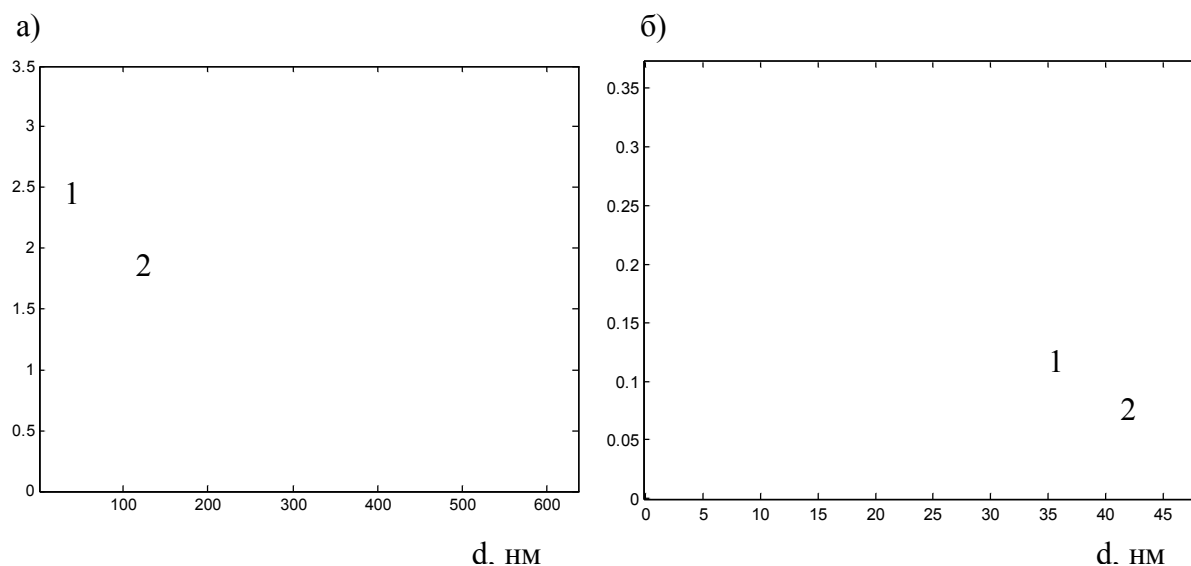


Рис. 4 Зависимость эффективности рассеяния  $Q_{sca}$  наночастиц галлия от их диаметра. Кривая 1 - зависимость для наночастицы с диэлектрической проницаемостью -  $3.5 + 1.6i$ . Кривая 2 - зависимость для наночастицы с диэлектрической проницаемостью -  $26.6 + 7.3i$ .

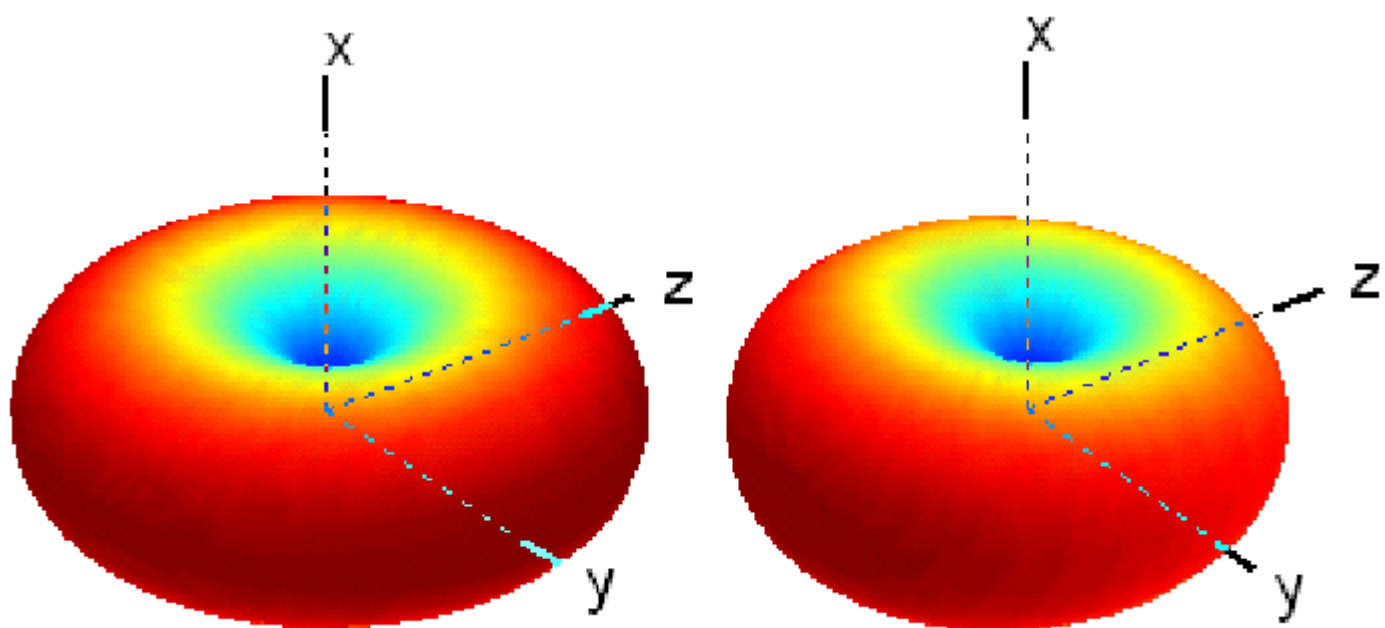


Рис. 5. Нормированные диаграммы направленности излучения  
1–галлий в состоянии '0' ( $\epsilon = -3.5 + 1.6i$ ,  $n = 0.4174 + 1.9168i$ )  
2–галлий в состоянии '1' ( $\epsilon = -26.6 + 7.3i$ ,  $n = 0.7013 + 5.2050i$ )

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 B.F. Soares, F. Jonsson, N. I. Zheludev.

All-Optical Phase-Change Memory in a Single Gallium Nanoparticle. 2007г.

2 B. F. Soares, M. V. Bashevoy, F. Jonsson, K. F. MacDonald, N. I. Zheludev.

Polymorphic nanoparticles as all-optical memory elements. 2006г.

3 K.F. MacDonald, B.F. Soares, M.V. Bashevoy, N.I. Zheludev

Controlling Light With Light Via Structural Transformations in Metallic Nanoparticles. 2006г.