

07

© 1991 г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*В. А. Антонов, Ю. А. Быковский, А. И. Ларкин, Н. М. Матвеева,  
А. В. Шеляков*

Предложено использовать тонкомерные материалы, проявляющие эффект памяти формы (ЭПФ), для управления оптическим излучением. Исследованы температурные, деформационные, временные и энергетические характеристики ЭПФ в сплавах системы TiNi—TiCu. Приведены примеры использования материалов с ЭПФ для создания фотозатвора, волоконно-оптического переключателя и высококонтрастного пространственно-временного модулятора света.

Известно большое количество материалов, используемых для разработки устройств управления оптическим излучением, пространственно-временных модуляторов света, фотозатворов, дефлекторов, коммутаторов. К их числу в первую очередь следует отнести жидкие кристаллы, электро- и акустооптические материалы, сегнетокерамику [1, 2]. Однако при конструировании реальных оптических процессов они не удовлетворяют в полной мере предъявляемым к ним требованиям, в частности по величине и равномерности оптического контраста, быстродействию, вносимым фазовым искажениям. Поэтому остается актуальным поиск новых материалов, предназначенных для управления оптическим излучением.

В качестве таких материалов предлагается использовать сплавы, проявляющие эффект памяти формы (ЭПФ), который заключается в восстановлении формы предварительно деформированного образца при нагреве выше некоторой критической температуры. В некоторых случаях возможно обратимое изменение формы образца в циклах нагрев—охлаждение. Известно применение подобных сплавов в машиностроении, энергетике, робототехнике, медицине [3, 4], где они используются в основном как силовые элементы. Учитывая уникальные возможности ЭПФ, представляет интерес исследование тонкомерных материалов с памятью формы для управления оптическим излучением с помощью лепестковых, мембранных систем за счет изменения профиля поверхности, изменения оптических свойств при механическом воздействии.

Для исследования были выбраны сплавы системы TiNi—TiCu с содержанием Ti 50 ат. %, полученные в виде лент толщиной 20—50 мкм. Использование такой композиции обусловлено тем, что полученные сплавы однофазны, имеют точный химический состав, приемлемый температурный интервал срабатывания, обладают ярко выраженным эффектом памяти формы [5]. Одним из необходимых параметров сплавов с ЭПФ при их использовании в качестве элементов с ЭПФ являются критические температуры фазового (мартенситного) перехода (ФП), деформационные, временные и энергетические характеристики. Для исследования характера и температурных интервалов ФП использовались методы микро- и рентгеноструктурного анализа, измерения электросопротивления.

Сплавы с содержанием меди до 25 ат. % получали в кристаллизованном состоянии со структурой В19 типа AuCd, а с большим содержанием меди — в аморфном. Кристаллизация последних при нагреве до 450 °С проходит с об-

разовании структуры В2 типа CsCl, при охлаждении до 20 °С происходит фазовое превращение В2—В19.

На рис. 1, а представлена температурная зависимость электросопротивления сплавов системы TiNi—TiCu. В сплавах с содержанием меди более 10 ат. % наблюдается возрастание сопротивления при охлаждении в интервале  $M_{\kappa}—M_{\pi}$  прямого ФП ( $M_{\pi}$ ,  $M_{\kappa}$  — температуры начала и конца прямого, а  $A_{\pi}$ ,  $A_{\kappa}$  — обратного (при нагреве) ФП). В сплаве с 10 ат. % меди петля гистерезиса невыразительна, а в сплаве с 8 ат. % происходит уменьшение сопротивления в интервале  $M_{\pi}—M_{\kappa}$ , т. е. наблюдается инверсия температурной зависимости электросопротивления.

Зависимость скачка электросопротивления сплавов в интервале ФП от их концентрации имеет максимум для сплава с 25 ат. % меди (рис. 1, б). Явление заметного изменения сопротивления исследуемых материалов при ФП

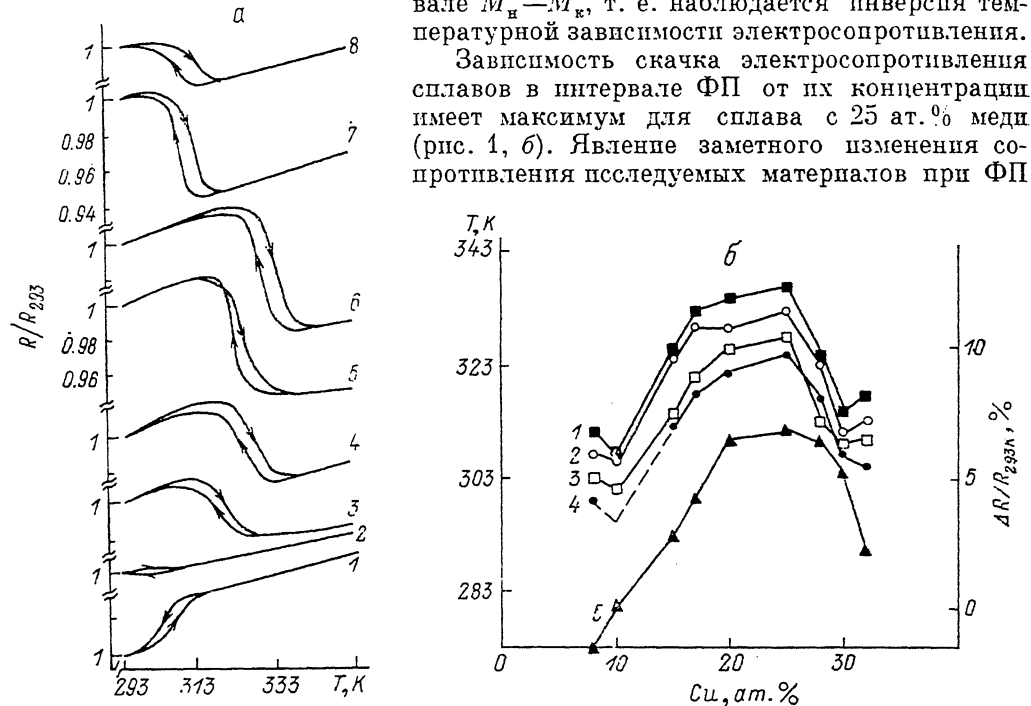


Рис. 1. Температурная зависимость электросопротивления (а) и концентрационная зависимость критических температур фазовых превращений и скачка электросопротивления в интервале фазовых превращений (б) сплавов системы TiNi—TiCu с содержанием Ti 50 ат. %: а: 1 — 8 ат. % Cu, 2 — 10, 3 — 15, 4 — 17, 5 — 20, 6 — 25, 7 — 28, 8 — 32; б: 1 —  $A_{\kappa}$ , 2 —  $A_{\pi}$ , 3 —  $M_{\pi}$ , 4 —  $M_{\kappa}$ , 5 —  $\Delta R/R_{293\text{K}}$ .

позволяет контролировать с его помощью степень восстановления формы элемента с ЭПФ, причем, как правило, с большей эффективностью, чем по температуре элемента. Проведенные исследования дают возможность оценить целесообразность такого контроля при практическом использовании конкретного сплава.

Полученные с помощью метода измерения электросопротивления критические температуры ФП в зависимости от состава сплавов приведены на рис. 1, б. Как видно, температурный интервал ФП и, следовательно, температурный диапазон срабатывания элементов с ЭПФ на основе исследуемых сплавов лежат в пределах от 20 до 70 °С.

В работе исследовалось влияние деформации изгибом при 20 °С на восстановление формы тонкой лентой из используемых материалов. Получено, что предельная восстанавливаемая деформация изгибом, при которой наблюдается полное восстановление, составляет 6—9 % в зависимости от содержания меди. Следует отметить высокую циклическую стойкость сплавов при полном восстановлении формы (более  $10^6$  циклов без каких-либо отклонений).

Исследование временных и энергетических характеристик элементов из сплавов с ЭПФ проводилось с помощью фотозатвора, схема которого представлена на рис. 2, а. На экране перпендикулярно его плоскости укреплена шторка, выполненная в виде отрезка ленты толщиной 30 мкм из материала с ЭПФ, которой задана память на прямолинейную форму. Шторка предварительно изгибается так, что она располагается параллельно плоскости экрана, полностью

перекрывающая щель в экране. При нагреве места изгиба штorkи выпрямляется, открывая щель. На рис. 2, а приведены осциллограммы интенсивности света, прошедшего через фотозатвор при нагреве штorkи одиночным импульсом оп-

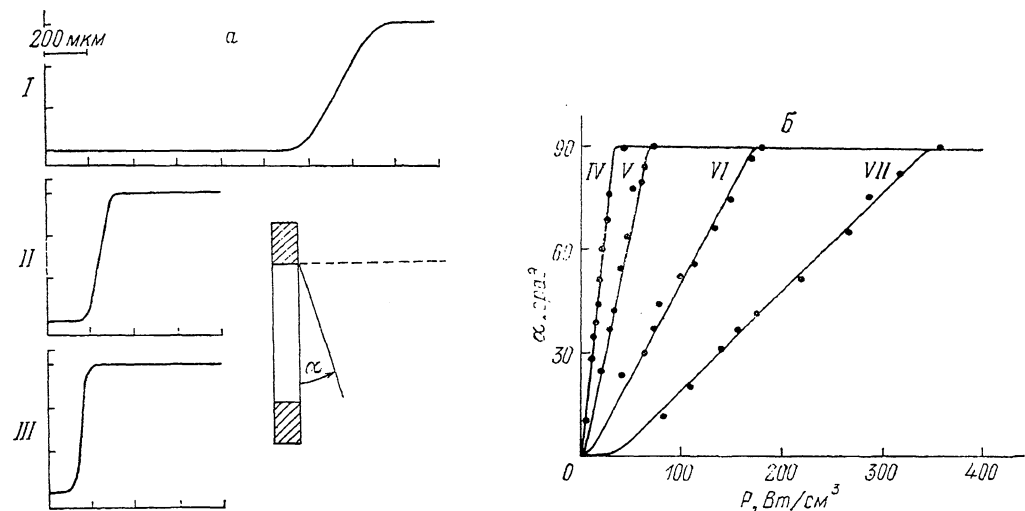


Рис. 2. Осциллограммы интенсивности света, прошедшего через фотозатвор со штorkой из сплава системы TiNi—TiCu при подаче одиночного управляющего импульса оптического излучения (а), и зависимость углового положения штorkи от удельной мощности, поглощаемой ее материалом (б).

I —  $\tau_{\text{имп}}=1.5$  мс, II — 200 мкс, III — 20 нс, IV — 7 мс, V — 3 мс, VI — 1 мс, VII — 0.5 мс.

тического излучения ( $\lambda=1.06$  мкм) одинаковой энергии, но разной длительности  $\tau_{\text{имп}}=1.5$  мс, 200 мкс, 15 нс. При  $\tau_{\text{имп}}=1.5$  мс время срабатывания фото-

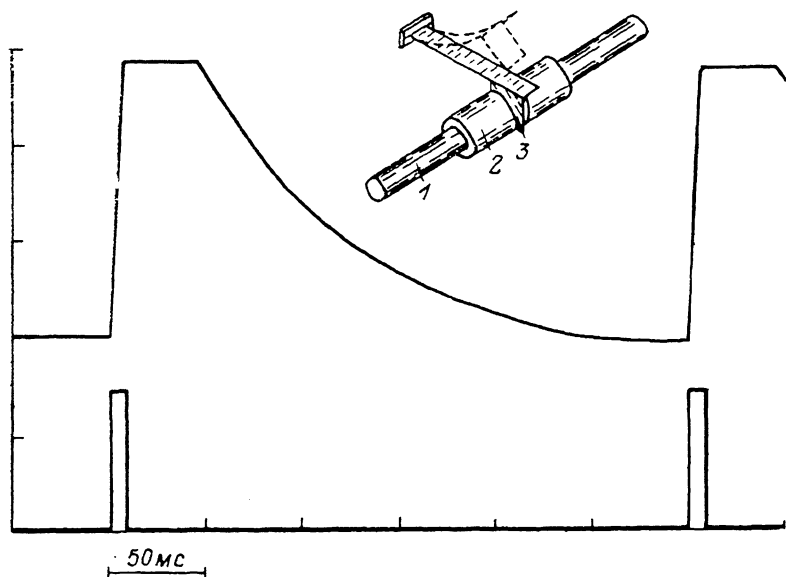


Рис. 3. Осциллограмма цикла работы волоконно-оптического переключателя.

1 — оптическое волокно, 2 — селфок, 3 — штorka из сплава с ЭПФ; нижний луч — осциллограмма управляющего электрического сигнала.

затвора  $\tau$  практически совпадает с  $\tau_{\text{имп}}$ , при этом за время действия импульса материал штorkи прогревается на всю толщину. В двух других случаях требуется некоторое время для прогрева материала штorkи на толщину, обеспечивающую возврат штorkи в выпрямленное положение за счет ЭПФ, поэтому  $\tau > \tau_{\text{имп}}$ . Измеренный контраст фотозатвора превышает 60 дб.

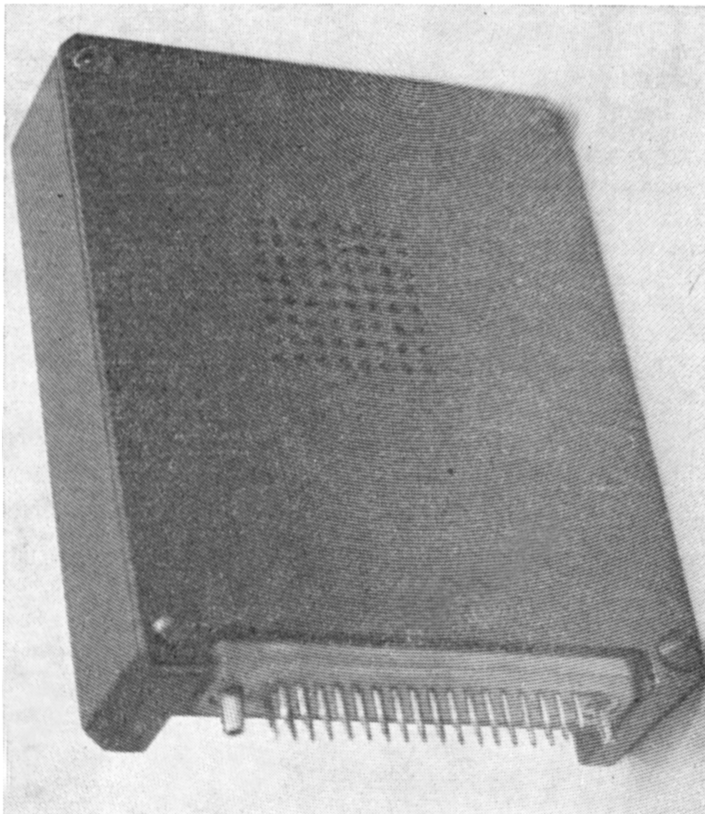
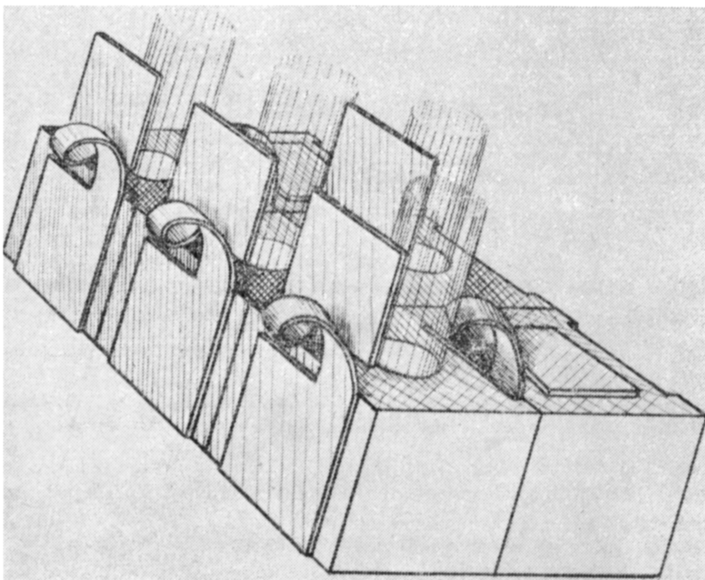


Рис. 4. Схема и внешний вид пространственно-временного модулятора света.

На рис. 2, б показана зависимость углового положения  $\alpha$  шторки от мощности управляющего сигнала, поглощаемого единицей объема ее материала при разных значениях  $\tau_{\text{нм}}$  (нагрев пропусканием электрического тока). Это обстоятельство может найти практическое применение, в частности для создания фотозатвора с управляемым пропусканием. Положение  $\alpha=90^\circ$  соответствует полному восстановлению формы шторки, как видно рис. 2, б, требуемая для этого

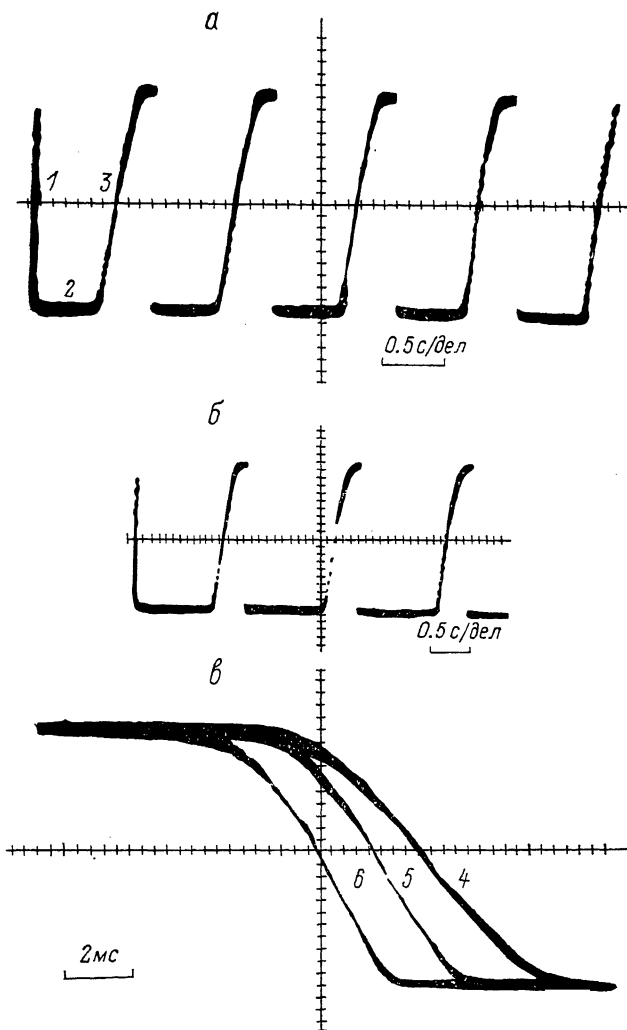


Рис. 5. Осциллограммы интенсивности света на выходе ячейки ПВМС при  $\tau_{\text{нм}}=2.8$  мс,  $V=10$  (а) и 15 В (б) и осциллограммы, характеризующие время реакции ПВМС при  $\tau_{\text{нм}}=2.2$  мс (в).

4 —  $V=24$ , 5 — 26, 6 — 29 В.

энергия составляет  $\sim 175$  Дж/см<sup>3</sup> [6]. Например, для области нагрева шторки размером  $0.003 \times 0.05 \times 0.1$  см полная энергия восстановления формы составит  $\sim 2.5$  мДж.

На рис. 3 представлена схема волоконно-оптического переключателя, в котором используется шторка с обратимой памятью формы, выполненная из сплава системы TiNi—TiCu. Обратимая память формы задается с помощью термомеханической обработки таким образом, что шторка в «холодном» состоянии перекрывает апертуру селфкоков, а при нагреве открывает ее, не препятствуя прохождению света из одного оптического волокна в другое. Осциллограмма одного цикла работы переключателя представлена на рис. 3. Следует отметить, что время нахождения шторки в «открытом» состоянии определяется управляющим сигналом нагрева.

Использование тонкомерных материалов с ЭПФ позволило разработать высококонтрастный пространственно-временной модулятор света (ПВМС) для голографических распознающих устройств [7], фрагмент схемы и внешний вид которого представлены на рис. 4. Управление интенсивностью излучения, прошедшего через каждую ячейку ПВМС, осуществляется шторкой из сплава системы TiNi—TiCu с 25 ат. % меди в виде отрезка ленты, одним концом закрепленной над отверстием в подложке. Каждой шторке задается обратная память формы на изгиб при помощи метода, предложенного в работе. Он заключается в многоэтапной термомеханической обработке шторки, в результате которой место изгиба шторки имеет вид одного витка спирали, а она сама «запоминает» две формы: «горячую» ( $T > 65^\circ\text{C}$ ) (свободный конец шторки параллелен плоскости подложки) и «холодную» ( $T < 46^\circ\text{C}$ ) (перпендикулярен последней). Управление устройством осуществляется мозаичным или матричным способом, при этом положение шторки и, следовательно, интенсивность света, проходящего через каждую отдельную ячейку, определяются амплитудой и длительностью управляющих прямоугольных импульсов электрического тока.

Полный цикл работы отдельной шторки можно разбить на три участка (рис. 5, а) и в соответствии с этим представить время полного цикла в виде суммы

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3,$$

где  $\tau_1$  — время реакции, за которое интенсивность проходящего через ячейку излучения изменяется от 1 до 0;  $\tau_2$  — время считывания, в течение которого ячейка закрыта;  $\tau_3$  — время релаксации, за которое интенсивность проходящего через ячейку излучения изменяется от 0 до 1.

Осциллограммы на рис. 5, а, б соответствуют одинаковой длительности управляющего импульса электрического тока ( $\tau_{\text{имп}} = 2.8$  мс) и разным амплитудам импульса ( $V = 10$  и  $15$  В соответственно). Поскольку время релаксации  $\tau_3$  практически неизменно и составляет  $\sim 400$  мс в нормальных условиях (без охлаждения, при принудительном охлаждении до комнатной температуры —  $\sim 200$  мс) то по существу энергия импульса определяет соотношение между  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , а также длительность цикла в целом. На рис. 5, в представлены осциллограммы, характеризующие изменение  $\tau_1$  при увеличении  $V$  от 24 до 29 В при неизменной  $\tau_{\text{имп}} = 2.2$  мс. Как видно из рис. 5, увеличение энергии импульса приводит к уменьшению времени реакции, к увеличению времени считывания и цикла. Существенное превышение времени релаксации над временем реакции позволяет реализовать матричный способ управления ПВМС.

Разработанный ПВМС на основе материалов с ЭПФ обладает оптическим контрастом более 60 дБ, широким спектральным диапазоном (0.1—10 мкм), не вносит фазовых искажений, имеет время реакции  $\sim 10$  мс.

### Выводы

В работе предложено использовать тонкомерные материалы с памятью формы для управления оптическим излучением. В качестве таких материалов исследованы сплавы системы TiNi—TiCu с содержанием Ti 50 ат. %. Определены температурные интервалы фазовых превращений в исследуемых сплавах, показано, что в зависимости от их состава критические температуры ФП лежат в диапазоне от 20 до 70 °С. Получена температурная зависимость электросопротивления сплавов, обнаружена ее инверсия в интервале ФП при варьировании содержания меди от 8 до 32 ат. % вблизи 10 ат. %. Полученные результаты могут использоваться для эффективного контроля режима работы элементов управления излучением с ЭПФ.

На примере лепесткового фотозатвора, волоконно-оптического переключателя и пространственно-временного модулятора света продемонстрирована возможность использования исследуемых материалов с ЭПФ для управления оптическим излучением с контрастом более 60 дБ, быстродействием  $\sim 200$  мкс, низкими фазовыми шумами, широким спектральным диапазоном (0.1—10 мкм).

Авторы приносят благодарность В. В. Васильеву, О. В. Костяной, К. Л. Кухаренко, А. Ю. Терехову за помощь в выполнении работы.

Список литературы

- [1] Передача и обработка информации голографическими методами / Под ред. С. Б. Гуревича. М.: Сов. радио, 1978. 304 с.
- [2] Васильев А. А., Касасент Д., Компанец И. Н., Парфенов А. В. Пространственные модуляторы света. М.: Радио и связь, 1987. 320 с.
- [3] Эффект памяти формы в сплавах. М.: Metallургия, 1979. 472 с.
- [4] Корнилов П. И., Белоусов О. К., Качур Е. В. Никелид титана и другие сплавы с эффектом «памяти». М.: Наука, 1977. 180 с.
- [5] Mercier O., Melton K. N. // Met. Trans. 1979. Vol. A10. N 3. P. 387—388.
- [6] Антонов В. А., Быковский Ю. А., Ларкин А. И. и др. Препринт МИФИ. № 063-87. М., 1987. 28 с.
- [7] Антонов В. А., Быковский Ю. А., Ларкин А. И., Шеляков А. В. А. С. 1397971 (СССР). Б. И. 1988. № 19.

Московский инженерно-физический  
институт

Поступило в Редакцию  
28 июня 1989 г.  
В окончательной редакции  
7 мая 1991 г.