

УДК 539.371, 538.911

**ДВУСЛОЙНЫЙ КОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛА С  
ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ, ПОЛУЧЕННЫЙ ПРИ ПОМОЩИ  
НАПРАВЛЕННОЙ АМОРФИЗАЦИИ ИОННЫМ ПУЧКОМ**

**В.С. Афонина<sup>1</sup>, В.В. Коледов<sup>1</sup>, В.Г. Шавров<sup>1</sup>, В.А. Дикан<sup>2</sup>, А.В. Иржак<sup>2,3</sup>, А.П. Каманцев<sup>1</sup>**

**1 - Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН**

**2 - Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»**

**3 - Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН**

Статья получена 15 января 2015 г.

**Аннотация.** Исследовано воздействие высокоэнергетичным фокусированным пучком ионов  $Ga^+$  на поверхность отожженных быстроохлажденных из расплава (БЗР) лент  $Ti_2NiCu$ . Получены аморфно-кристаллические композиты на основе материала с ЭПФ при помощи локального ионного облучения. Продемонстрировано, что аморфизованный слой может быть образован двумя видами воздействия - непосредственно бомбардировкой поверхности и при переосаждении распыленного материала. Созданы образцы композитных микроактюаторов методом модификации поверхности БЗР сплава высокоэнергетичным фокусированным пучком ионов. Продемонстрирована обратимая деформация микроактюаторов при нагреве и охлаждении, характерная для материалов с ЭПФ.

**Ключевые слова:** эффект памяти формы, двуслойный композит, аморфизация,  $Ti_2NiCu$ , микроактюатор, фокусированный ионный пучок.

**Abstract.** The interaction of a focused ion beam of  $Ga^+$  with the surface of the annealed rapidly quenched from the melt ribbons of the  $Ti_2NiCu$  alloys was investigated. The amorphous-crystalline composites and microactuators based on rapidly quenched shape memory alloy  $Ti_2NiCu$  are obtained by Focused Ion Beam (FIB) treatment and studied. It is demonstrated that the amorphized layer may be formed by two types of impact: direct bombardment of the surface and material

redeposition. Shape memory effect is demonstrated by reversible bending deformation during heating and cooling of the composites.

**Key words:** shape memory effect, bilayer composite, amorphization,  $Ti_2NiCu$ , microactuator, focused ion beam.

## **Введение**

Исследования воздействия фокусированным ионным пучком (ФИП) на поверхность твердых тел при локальном ионном травлении давно изучаются и применяется во многих технологических процессах, в том числе известен и процесс аморфизация кристаллического материала при облучении [1, 2]. Однако, этот эффект рассматривается, главным образом, как негативный, и работы, в основном, направлены на его уменьшение. В данной работе впервые предложено использование ФИП для намеренной аморфизации с целью создания функциональных аморфно-кристаллических композитов. В последнее время начали появляться работы, в которых рассматривается возможность намеренной аморфизации поверхности при облучении фокусированным ионным пучком [3]. Однако, использование такой методики для создания приборов, в том числе микромеханических, в общедоступных источниках авторам не известно. При этом новый эффект – достижение функциональных свойств достигается при помощи известных методик ФИП.

В последние годы методами ФИП создан новый класс микромеханических устройств на основе композитов сплавов с ЭПФ, рекордных по миниатюрности. Продемонстрирована возможность их применения в микросистемной технике и нанотехнологии для манипулирования реальными микрообъектами различной природы. Создание микромеханических устройств на основе материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) является актуальной задачей, начиная 90-х годов прошлого века [4]. При создании таких устройств используются материалы с ЭПФ, полученные при помощи осаждения на различные подложки. При этом качество осажденных слоев (состав, структура) значительно уступает аналогичному объемному материалу.

Ранее авторами для создания микромеханических устройств был продемонстрирован другой подход [5-12] - формирование актюаторов в объемном материале с уже заданной микро- или наноструктурой и заданным ЭПФ. Пример такого устройства приведен на Рис. 1.

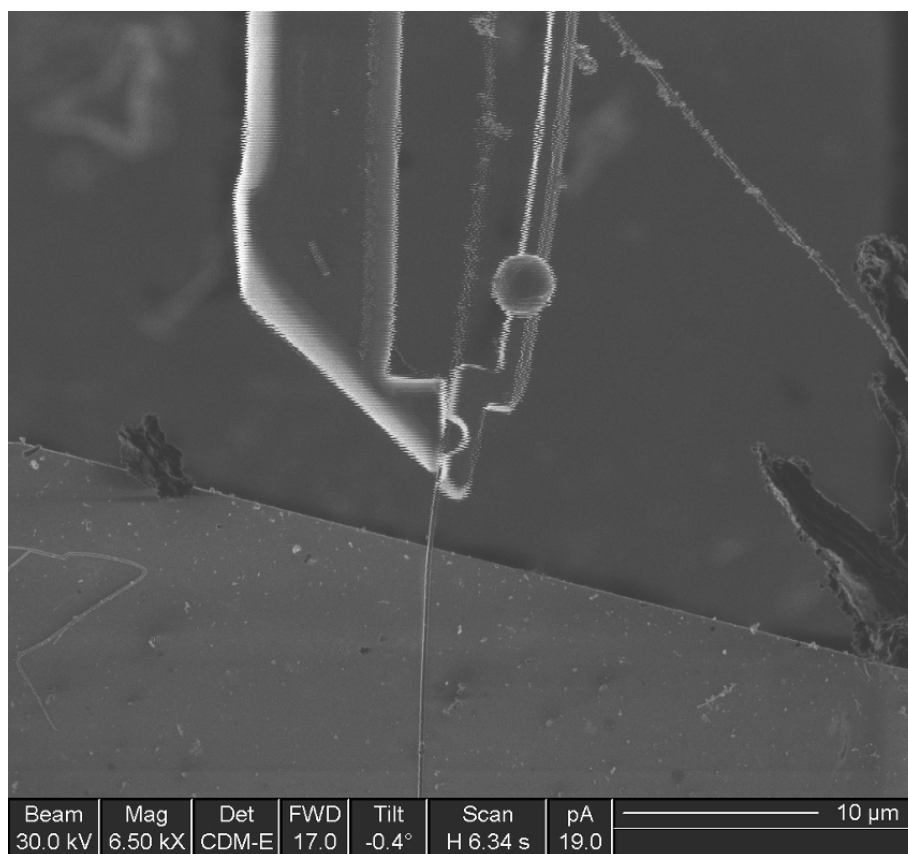


Рис. 1. Нанопинцет на основе композита с ЭПФ.

Цель данной работы – изучение процесса взаимодействия высокоэнергетичного фокусированного пучка ионов Ga<sup>+</sup> с поверхностью сплава Ti<sub>2</sub>NiCu с ЭПФ, создание и исследование двуслойных аморфно-кристаллических композитов на основе материалов с ЭПФ при помощи локального ионного облучения, а также создание и испытание элементов МЭМС и НЭМС на основе функциональных аморфно-кристаллических композитов с рекордно малыми размерами.

## 1. Методика эксперимента

Для намеренной аморфизации поверхности образца было предложено две геометрии эксперимента – при нормальном и касательном направлении падения пучка к аморфизируемой поверхности. Схема эксперимента приведена на Рис. 2.

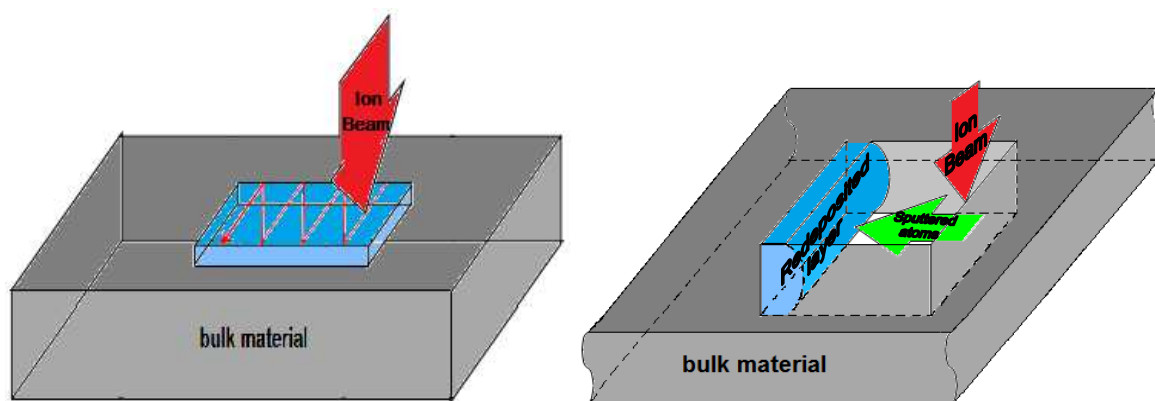


Рис. 2. Схема аморфизации поверхности при облучении в нормальном (а) и касательном (б) направлении.

При облучении в геометрии нормального падения пучка аморфизация происходит при бомбардировке поверхности высокоэнергетичными ионами за счет внедрения и перемешивания атомов приповерхностных слоев. Толщина такого аморфизированного при облучении ионами  $Ga^+$  с энергией 40 кэВ составляет 40 нм при однократном облучении. При сканировании поверхности ионным пучком по схеме, приведенной на рис.2 а, можно достичь толщины направленной аморфизации до 100 – 200 нм за счет локального травления и пересадки. Аморфизированные слои толщиной до 0,5 мкм можно получать при направленном пересадке распыленного материала, как показано на рис.2 б. В предложенной схеме растравливаемая поверхность находится вблизи поверхности, на которую происходит пересадка, а рост аморфного слоя направлен перпендикулярно пучку ионов.

Композиты, состоящие из аморфизованного при ФИП облучении слоя и кристаллической подложки были получены по обеим схемам: при нормальном

падении пучка (Рис. 3) и при касательном, вследствие переосаждения (Рис. 4). На Рис. 3 поверхность облучалась ионным пучком в нормальном к поверхности сплава направлении. Толщина аморфизованного слоя составляет не более 30 нм, однако неравномерное по площади облучение позволило увеличить это значение до 80 нм.

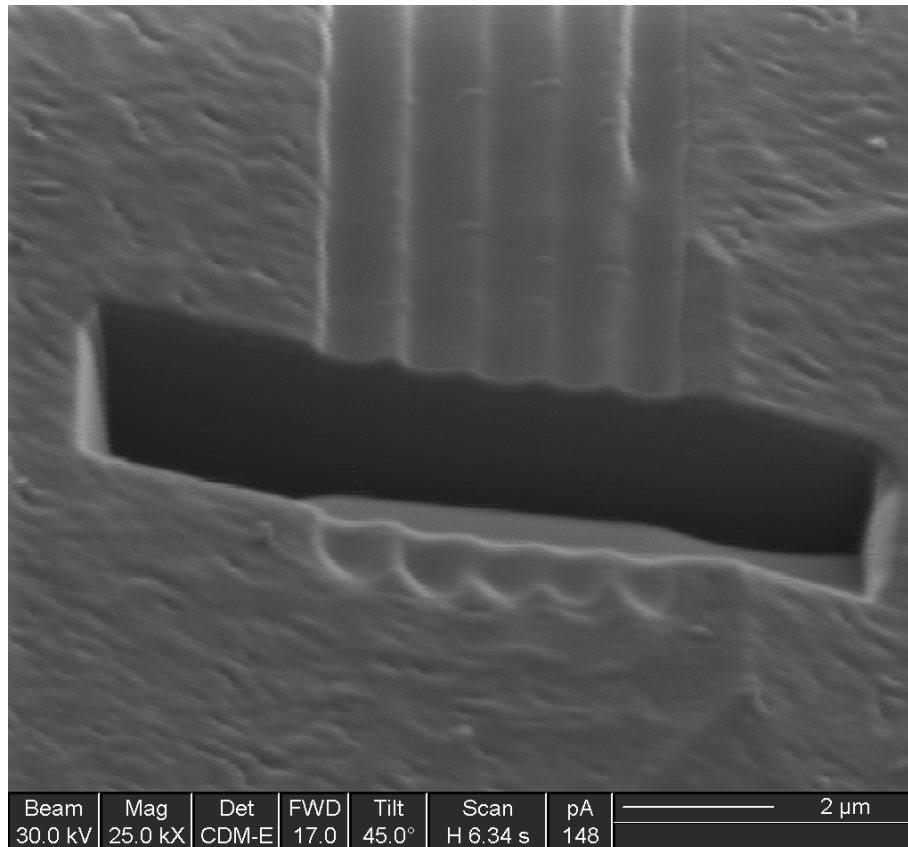


Рис. 3. Аморфизация поверхности сплава  $Ti_2NiCu$  в геометрии нормального падения пучка ионов к аморфизируемой поверхности.

На Рис. 4 поверхность облучалась ионным пучком в касательном к аморфизируемой поверхности сплава направлении. Синими стрелками указано направление падения пучка ионов. При облучении происходит распыление поверхности, находящейся левее линии облучения. Часть распыленного материала осаждается на находящуюся вблизи поверхность в направлении указанном красной стрелкой. Переосажденная область обведена красным контуром.

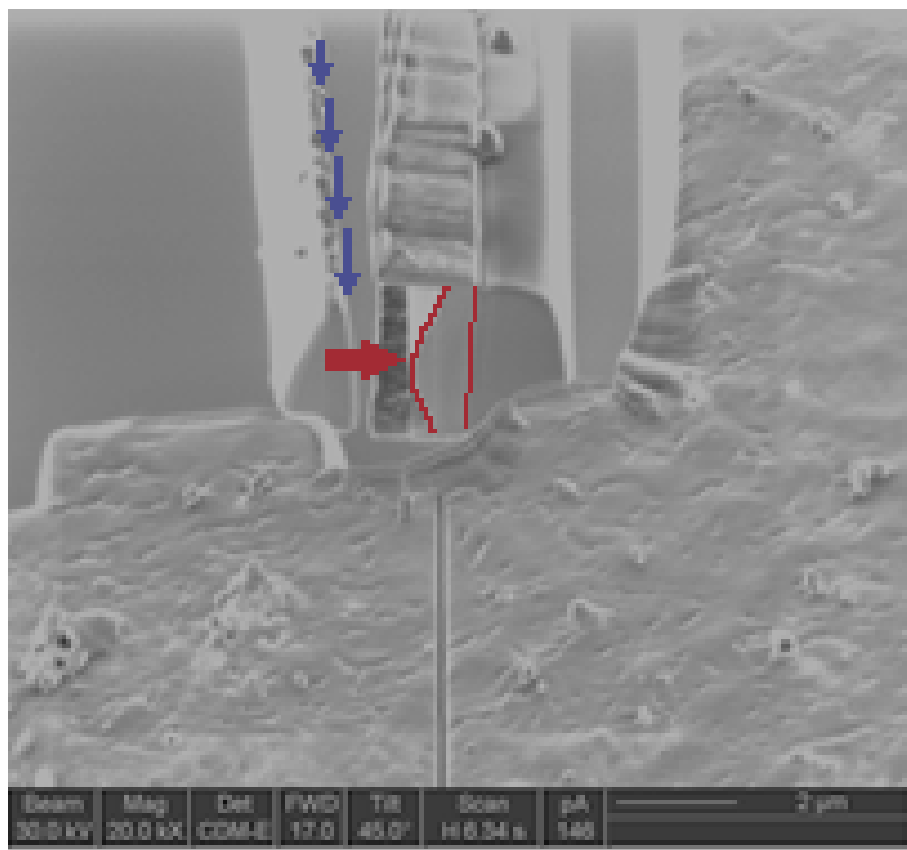


Рис. 4. Аморфизация поверхности сплава  $Ti_2NiCu$  в геометрии касательного падения пучка ионов к аморфизируемой поверхности при переосаждении.

На Рис. 5 представлен действующий прототип микропинцета, в котором исполнительный элемент выполнен из двуслойно-кристаллического композита. Испытания прототипа микропинцета проводились по методике [7-8]. Для термоактивации микроустройства использован полупроводниковый инжекционный полупроводниковый лазер, размещенный в вакуумной камере прибора ФИП FEI FIB Strata 201. При комнатной температуре микропинцет имеет прямолинейную форму (см. Рис. 5 а). При включении лазера, излучение разогревает иглу наноманипулятора Omniprobe, на которую укреплен микропинцет. Наблюдается многократная обратимая термоуправляемая изгибная деформация микропинцета (см. Рис. 5).

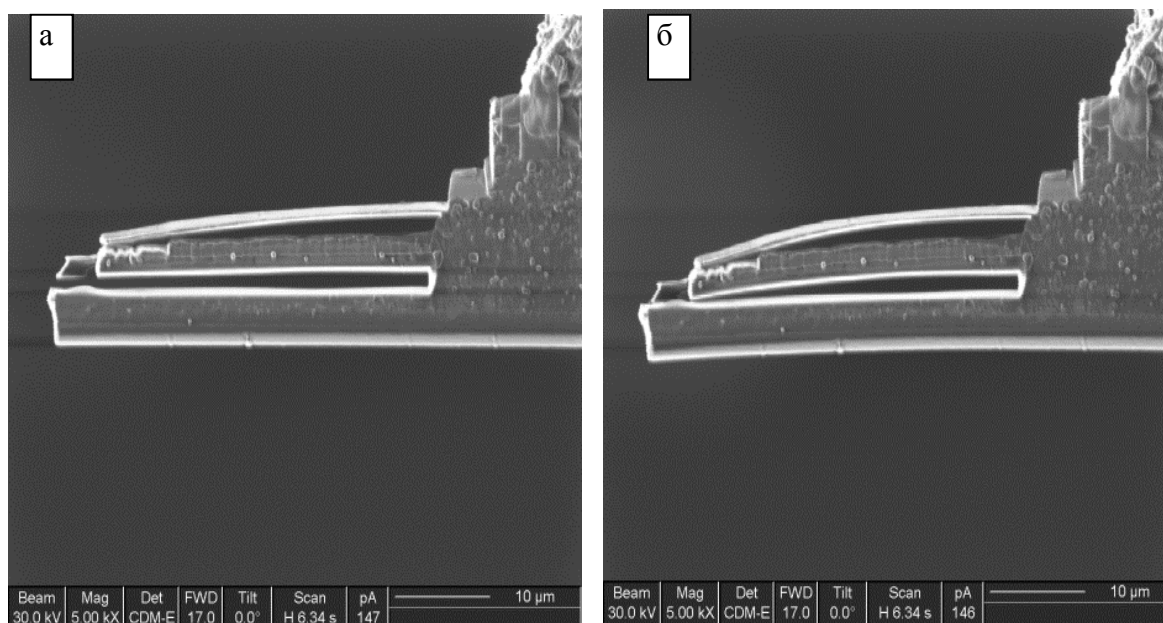


Рис. 5. Прототип микропинцета на основе аморфно-кристаллического композита из сплава  $Ti_2NiCu$ , обработанного . а – холодное состояние; б – нагретое состояние

## Выводы

1) При экспериментальном изучении процесса взаимодействия фокусированного пучка ионов  $Ga_+$  с поверхностью БЗР сплава  $Ti_2NiCu$  с ЭПФ наблюдается изменение поверхностного слоя сплава по структуре и составу. Толщина этого слоя составляет 30 - 80 нм при нормальном падении галлиевого пучка для выбранных режимов облучения. При скользящем угле падения пучка толщина измененного слоя достигает 0,5 мкм.

2) Показано, что создание композитных аморфно-кристаллических структур при помощи локального ионного облучения возможно. Максимальная толщина аморфизованного слоя наблюдается при нормальном к поверхности угле падения пучка ионов.

3). Аморфные слои, полученные при переосаждении сплава могут достигать значительных толщин – 0,5 мкм и более. Толщину такого слоя можно контролировать с точностью до 15 нм, задавая время переосаждения, силу ионного тока и ускоряющее напряжение.

4) Созданы методом ФИП и протестированы при активации нагревом композитные слоистые аморфно-кристаллические микроактюаторы в размерах 25x2x4 мкм. Управляемая многократная относительная деформация функционального материала превышает 1,2 %.

Исследование выполнено в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН при поддержке гранта РФФИ (проект №14-07-31179).

### **Литература**

1. S. Rajsiri, B.W. Kempshall, S.M. Schwarz, L.A. Giannuzzi // FIB Damage in Silicon: Amorphization or Redeposition? *Microsc. Microanal.* 2002. V.8. (Suppl. 2). P. 50.
2. F.A. Stevie et al // Application of focused ion beam lift-out specimen preparation to TEM, SEM, STEM, AES and SIMS analysis. *Surf. Interface Anal.* 2001. V. 31. P. 345.
3. A. Joshi-Imre, S. Bauerdick // Direct-Write Ion Beam Lithography. *Journal of Nanotechnology.* 2014. 170415 (26).
4. W.L. Benard, H.Kahn, A.H. Heuer, M.A. Huff // Thin-film shape-memory alloy actuated micropumps. *Journ. Microelectromechanical Systems.* 1998. V.7. № 2. P.245.
5. D.Zakharov, G.Lebedev, V.Koledov, P.Lega, D.Kuchin, A.Irzhak, V.Afonina, E.Perov, A.Shelyakov, V.Pushin, V Shavrov // An enhanced composite scheme of shape memory actuator for smart systems. *Physics Procedia.* 2010. V.10. P. 58.
6. V.Afonina, D.Zakharov, G.Lebedev, A.Irzhak, A.Mashirov, V.Kalashnikov, V.Koledov, A.Shelyakov, D.Podgorny, N.Tabachkova, V.Shavrov // Submicron-sized actuators based on enhanced shape memory composite material fabricated by FIB-CVD. *Smart Materials and Structures.* 2012. V. 21. 052001.
7. A. Irzhak, V. Koledov, D. Zakharov, G. Lebedev, A. Mashirov, V. Afonina, K. Akatyeva, V. Kalashnikov, N. Sitnikov, N. Tabachkova, A. Shelyakov, V Shavrov // Development of laminated nanocomposites on the bases of magnetic and non-



magnetic shape memory alloys: Towards new tools for nanotechnology. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. V. 586 (SUPPL. 1). P. S464.

8. D. Zakharov, G. Lebedev, A. Irzhak, V. Afonina, A. Mashirov, V. Kalashnikov, V. Koledov, A. Shelyakov, D. Podgorny, N. Tabachkova, V. Shavrov. Submicron-sized actuators based on enhanced shape memory composite material fabricated by FIB-CVD. *Smart Materials and Structures*. 2012. V. 21. № 5. P. 052001.

9. A.V.Shelyakov, N.N. Sitnikov, V.V. Koledov, D.S. Kuchin, A.I. Irzhak, N.Yu. Tabachkova // Melt-spun thin ribbons of shape memory TiNiCu alloy for micromechanical applications. *International Journal of Smart and Nano Materials*. 2011. V. 2. P. 68.

10. A.V. Shelyakov, N.N. Sitnikov, A.P. Menushenkov, V.V. Koledov, A.I. Irzhak // Nanostructured thin ribbons of a shape memory TiNiCu alloy. *Thin Solid Films*. 2011. V. 519. № 15. P. 5314.

11. A.V. Irzhak, D.I. Zakharov, V.S. Kalashnikov, V.V. Koledov, D.S. Kuchin, G.A. Lebedev, P.V. Lega, E.P. Perov, N.A. Pikhtin, V.G. Pushin, I.S. Tarasov, V.V. Khovailo, V.G. Shavrov, A.V. Shelyakov // Actuators based on composite material with shape-memory effect. *Journal of Communications Technology and Electronics* 2010. V. 55. P. 818.

12. A.V. Irzhak, V.S. Kalashnikov, V.V. Koledov, D.S. Kuchin, G.A. Lebedev, P.V. Lega, N.A. Pikhtin, I.S. Tarasov, V.G. Shavrov, A.V. Shelyakov // Giant reversible deformations in a shape-memory composite material. *Technical Physics Letters*. 2010. V. 36. № 4. 2010.