

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ КОМПОЗИТНЫЙ НАНОАКТЮАТОР НА ОСНОВЕ СПЛАВА С ЭПФ Ti_2NiCu

¹Иржак А.В., ²Коледов В.В., ²Кучин Д.С., ²Лега П.В., ²Орлов А.П., ³Шеляков А.В.

¹ НИТУ «МИСус», г. Москва, Россия, E-mail: airzhak@gmail.com

² ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва, Россия, E-mail: rexby@list.ru

³ НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия, E-mail: alex-shel@mail.ru

Для совершения механической работы на микро и наноуровне могут использоваться устройства, в основе функционирования которых лежат различные физические эффекты. Перечислим некоторые из этих эффектов с указанием порядка величины обратимой относительной деформации: магнитострикция (10^{-3}), пьезоэффект (10^{-2}), эффект памяти формы (ЭПФ) (10^{-1}). Таким образом, не трудно видеть, что сплавы с ЭПФ проявляют рекордные обратимые деформации. Так как эффект памяти формы реализуется при нагреве материала, то для работы устройств с памятью формы в циклическом режиме необходимо организовать периодический нагрев и отвод тепла. Управление устройством за счет нагрева и охлаждения может показаться нетехнологичным решением, т.к. тепловые процессы довольно инертны. Однако, при уменьшении размеров устройства на порядок характерные времена тепловых процессов снижаются на два порядка (т.е. квадратично). Это открывает перспективу создания быстродействующих миниатюрных устройств на основе сплавов с ЭПФ с рекордными характеристиками: быстродействием, обратимой деформацией, наработкой на отказ.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по изучению быстродействия композитного актюатора на основе сплава Ti_2NiCu с ЭПФ [1]. Нижняя консоль актюатора представляет собой композит, состоящий из слоя с ЭПФ и упругого слоя. При нагревании нижняя консоль изгибается и касается верхней части пинцета, т.е. происходит срабатывание актюатора. Нагревание осуществлялось джоулевым теплом при пропускании тока через пинцет. Для реализации предложенной схемы нагрева нанопинцет был припаян к вольфрамовой игле, установленной на микроманипулятор Kleindiek. Другая вольфрамовая игла, установленная на второй такой же манипулятор, подводилась к пинцету, после чего достигалось касание иглой нижней части пинцета (рис.1,а). Суммарное электросопротивление пинцета, подсоединенных к нему игл и подводных проводов варьировалось в пределах от 20 Ом до 100 Ом в зависимости от качества контакта пинцета с нижней иглой. При протекании тока 4–11 мА в электронный микроскоп Crossbeam Neon 40 EsB наблюдалось смыкание губок пинцета, а при выключении тока – размыкание (рис.1,а и 1,б).

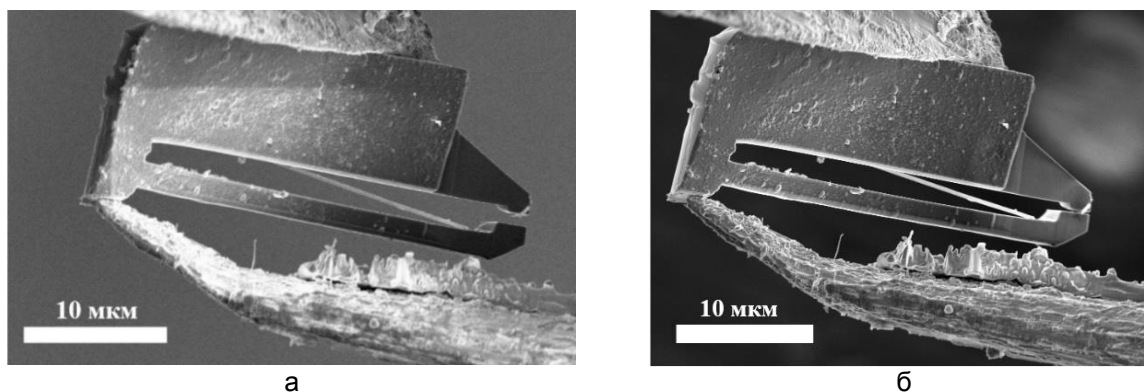


Рисунок 1 – Композитный нанопинцет в открытом (а) и закрытом (б) состоянии

Область развертки электронного луча была сужена до того, чтобы захватывать только губки пинцета (выделена зеленым прямоугольником на рис.2). При этом срабатывание пинцета визуально было заметно при уменьшении длительности импульса до 5 мс (рис.2,а). Дальнейшая оценка срабатывания пинцета по его изображению в электронный микроскоп при длительности импульсов тока менее 5 мс

не представлялась возможной, т.к. время сканирования электронным лучом одного кадра изображения существенно превышало длительность импульса тока.

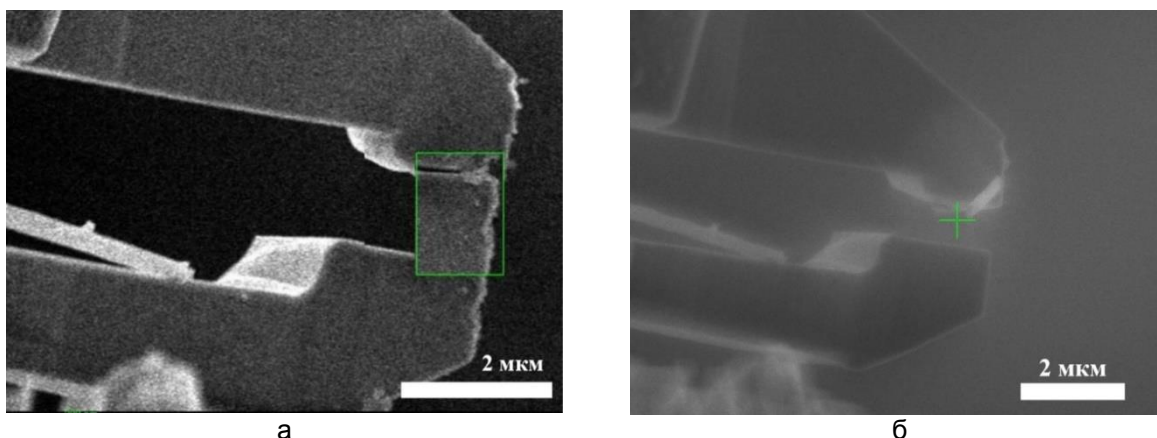


Рисунок 2 – Композитный нанопинцет. (а) – зеленый прямоугольник – область наблюдения в электронный микроскоп. Показан момент смыкания губок пинцета при подаче импульса тока длительностью 5 мс; (б) – зеленый крест – точка фокусировки электронного луча

Для дальнейшей оценки срабатывания нанопинцета электронный луч был сфокусирован в область размером порядка единиц нанометров, изображенную крестом на рисунке 2,б. Величина силы тока в электронном луче составила 1 нА. Луч попадал на предметный столик, установленный в камере микроскопа. Ток со столика протекал на «землю» через резистор 100 кОм, напряжение с которого усиливалось и поступало на вход цифрового осциллографа, работающего с частотой дискретизации 500 Мвыб./с. При подаче импульса тока происходил нагрев пинцета. Губки пинцета смыкались и перекрывали электронный луч. Сигнал от электронного пучка в этот момент снижался до нуля. Была получена серия графиков при подаче как одиночных импульсов тока, так и серии импульсов. Длительности импульсов составляла от 200 мс до 100 мкс, что соответствует частоте от 5 Гц до 10 кГц. Осциллограмма сигнала на частоте 1 кГц показана на рисунке 3,а.

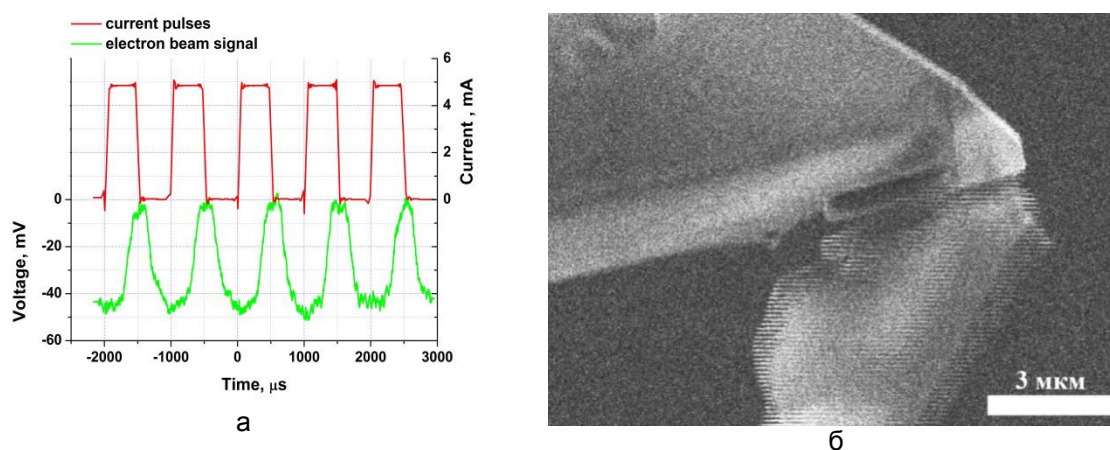


Рисунок 3 – (а) – Временная зависимость управляющего тока частоты 1 кГц (сверху) и отклик нанопинцета (внизу); (б) – изображение нанопинцета в электронный микроскоп при подаче управляющего сигнала с частотой 1 кГц.

На частоте 1 кГц срабатывание пинцета визуально наблюдалось в виде размытого изображения нижней консоли пинцета в электронный микроскоп (рис.3,б). Обнаружение срабатывания пинцета, определенное по прерыванию электронного луча, на частотах выше 1 кГц оказалось затруднительным, из-за электромагнитных наводок на канал электронного луча от переднего и заднего фронта импульса тока управления (на рис.3,а показан обработанный сигнал после вычитания помехи). Однако, размытие нижней консоли визуально наблюдалось при увеличении частоты

управляющих импульсов вплоть до 7 кГц, что значительно превосходит рабочие частоты известных устройств с памятью формы [2].

При работе на частотах порядка единиц килогерц срабатывание пинцета фиксировалось в течение нескольких минут. Таким образом, безотказная работа устройства составила 10^5 – 10^6 циклов, что не уступает известным аналогам [3].

Также были получены автоколебания консоли пинцета. Для этого одна из вольфрамовых игл была перенесена от основания пинцета к концу композитной консоли (рис.4,а). При подаче на иглы постоянного напряжения в цепи нанопинцета протекал ток, что приводило к нагреву и срабатыванию (частичному) пинцета. В момент срабатывания контакт губки с иглой разрывался, ток прекращался и пинцет остывал. После остывания нижняя губка вновь касалась иглы и весь процесс повторялся вновь. Таким образом, имели место автоколебания нижней губки пинцета. При этом на осциллограммах были видны импульсы тока через пинцет с частотами от единиц килогерц до более чем ста килогерц (рис.4,б).

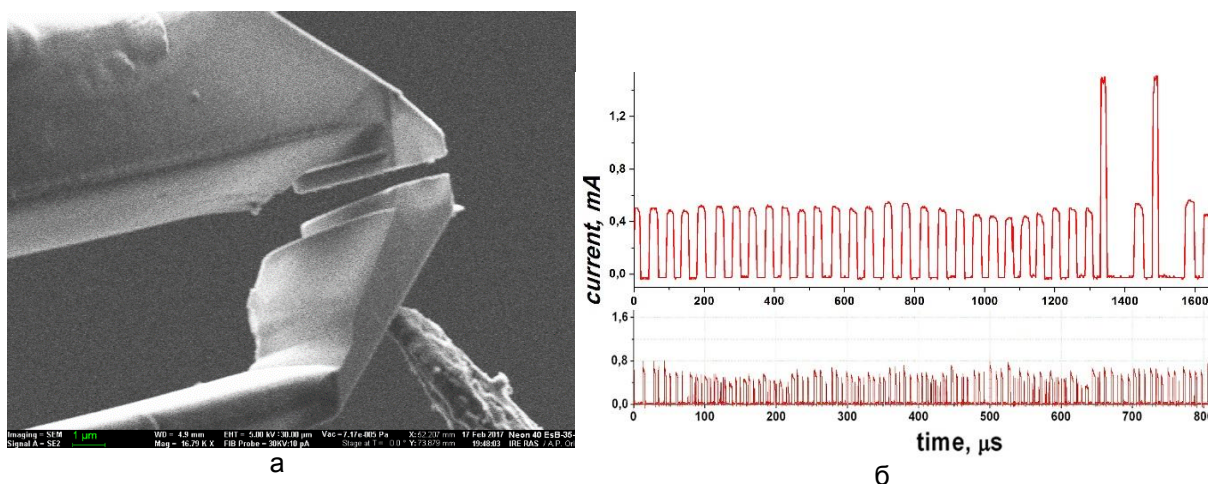


Рисунок 4 – (а) – Нанопинцет в контакте с иглой в схеме для наблюдения автоколебаний; (б) – временные зависимости тока в цепи нанопинцета при приложении постоянного напряжения. Частоты сигналов 20 кГц (сверху) и 125 кГц (внизу)

В работе продемонстрировано рекордное по быстродействию устройство с памятью формы. По мнению авторов, такие устройства могут найти применение в технологии микроэлектромеханических систем для создания исполнительных элементов и роботизированных устройств, в lab-on-a-chip технологии, в биологии, для исследования биологических (ДНК, сенсилы насекомых и др.) и небиологических (углеродные нанотрубки, графеновые слои, вис커еры) микро- и нанообъектов.

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант № 17-19-01748.

Список литературы:

1. Mazaev P. V. et al. // J. of Comm. Techn. and Electron. – 2016. – Т. 61, №. 6. – С. 630-638.
2. Song S. H. et al. // Scientific reports. – 2016. – Т. 6.
3. Chluba C. et al. // Science. – 2015. – Т. 348, №. 6238. – С. 1004-1007.