

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.2.8>

УДК: 536.212.2, 53.06, 537.9

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАНОМЕХАНИЧЕСКИМИ УСТРОЙСТВАМИ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

**А.В. Прокунин^{1,2}, В.В. Коледов², Д.Д. Кузнецов²
А.В. Иржак³, А.П. Орлов², П.В. Лега²**

¹ Московский физико-технический институт
1417019, Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер., 9

² ИРЭ им. Котельникова РАН, 125009, Москва, Моховая, 11, корп.7

³ Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН
142432, Московская обл., Черноголовка, Академика Осипьяна, 6

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2022 г.

Аннотация. Недавний прогресс в разработке наномеханических инструментов с эффектом памяти формы (ЭПФ) привел к успешной реализации новых систем для 3D-наноманипуляции и наноинтеграции нанообъектов снизу вверх, таких как УНТ, нанопроволоки и т.д. ЭПФ вызывается контролируемым нагревом активного слоя наноинструмента. Однако нагрев приводит к тепловому дрейфу и ошибкам в позиционировании наноинструмента. В статье представлены результаты численного моделирования и экспериментальные данные по тепловому расширению системы управления наномеханическими устройствами с ЭПФ в зависимости от конфигурации геометрии законцовки иглы. Показано, что система управления наномеханическими устройствами с оптимизированным профилем законцовки, демонстрирует как повышенную точность позиционирования, так и меньшее потребление электроэнергии, требуемой для нагрева наноинструмента.

Ключевые слова: эффект памяти формы, нанопинцет, система управления, микроигла.

Финансирование: Функциональные наноматериалы были разработаны и изучены при поддержке гранта РФФ № 17-19-01748. Эксперимент по наноманипулированию проведен при поддержке гранта РФФИ № 18-57-70004.

Автор для переписки: Прокунин Алексей Витальевич,
prokunin.av@phystech.edu

Abstract. Recent progress in design of nanomechanical tools with shape memory effect (SME) resulted in successful realization of the new systems for 3D nanomanipulation and bottom-up nanointegration of the nanoobjects like CNT, nanowires etc. SME demands controlled heating of the active layer of the shape memory nanotool. The heating can lead to thermal drift and errors in positioning of the nanotool. The paper presents the results of numerical modeling and experimental data on the thermal expansion of a heating element, including the tungsten microneedle depending on the configuration of its tip geometry. It is proved that the control system for nanomechanical devices including the microneedle with optimized profile demonstrates both improved precision of positioning and smaller electric energy consumption.

Key words: shape memory effect, nanotweezers, control system, microneedle.

Financing: functional nanomaterials were developed and studied under support of RSF – grant №17-19-01748. The experiment on nanomanipulation is done with samples and procedures under support of RFBR – grant №18-57-70004.

Corresponding author: Prokunin Aleksei Vitalevich, prokunin.av@phystech.edu

Введение

С развитием науки и техники возрастает необходимость не только визуально наблюдать изучаемые объекты на микро- и наноразмерных масштабах, но и непосредственно манипулировать ими [1]. Наиболее сложная задача – манипулировать объектами на наноуровне. Для реализации этой задачи предложены наномеханические устройства на основе сплавов с ЭПФ – нанопинцеты [2].

ЭПФ в сплавах Ti_2NiCu вызывается нагревом выше температуры фазового перехода мартенсит-аустенит (около $65\text{ }^{\circ}C$) [3]. Существует острая проблема разработки системы, на которой будут установлены эти устройства. При использовании металлических игл в качестве проводника тепла и несущей конструкции, на которой размещены нанотрубки, неизбежно возникновение теплового расширения (удлинения) всей конструкции, что в свою очередь усложняет процесс манипуляции [4,5]. Для решения этой задачи было предложено рассчитать оптимальную геометрию кончика иглы и выбрать металл с минимальным коэффициентом теплового расширения.

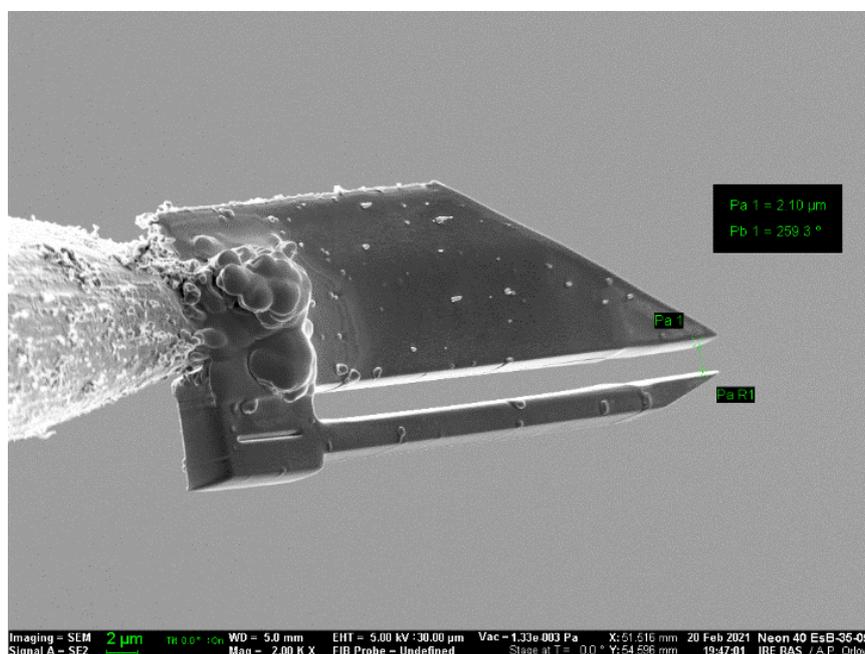


Рис. 1. Нанопинцет расположенный на кончике вольфрамовой иглы

1. Материалы и методы

В качестве теплопроводника и несущей конструкции была выбрана вольфрамовая проволока с диаметром поперечного сечения 0.5 мм . Вольфрам обладает относительно небольшим коэффициентом термического расширения, высокой прочностью и жесткостью. Подготавливаются отрезки проволоки длиной 5 см . Затем, методом электрохимического травления в растворе KOH , отрезок проволоки затачивается до иглы длиной 4.5 см , с диаметром кончика 1 микрон и длиной законцовки 5 мм . В процессе электрохимического травления,

регулируя силу тока и время обработки, достигается различное значение диаметра поперечного сечения (d) и длины (l) законцовки иглы.

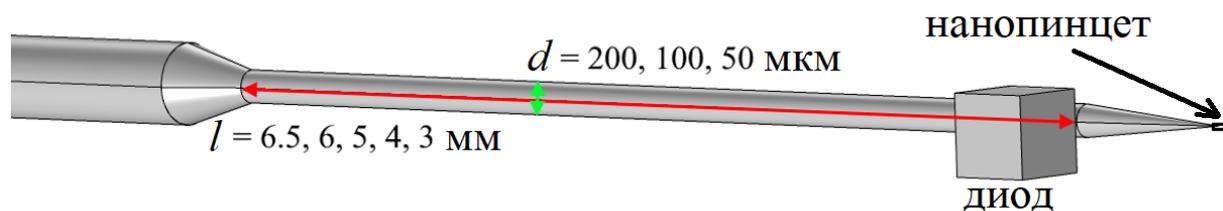


Рис. 2. Модель системы управления нанопинцетом

На первом этапе для определения оптимального профиля законцовки иглы и параметра, наиболее сильно влияющего на тепловой дрейф, было выполнено численное моделирование теплового расширения вольфрамовой иглы с толщиной (d) и длиной (l) кончика (рис. 2), $d = 200, 100, 50$ мкм и $l = 6.5, 6, 5, 4, 3$ мм.

Для экспериментальной проверки результатов численного моделирования были изготовлены иглы со значениями $d = 100$ и 50 мкм. В качестве нагревателя в системе управления нанопинцетом использовался кремниевый диод размером $0,6 \times 0,6 \times 0,3$ мм. Диод был прикреплен к игле теплопроводящим клеем на расстоянии 1-1,5 мм от кончика (рис. 3). Два контакта диода были соединены вместе (+) и припаяны к игле, третий контакт (-) припаян к проводу, прикрепленному к игле (рис. 4).



Рис. 3. Изображение системы управления нанопинцетом в СЭМ

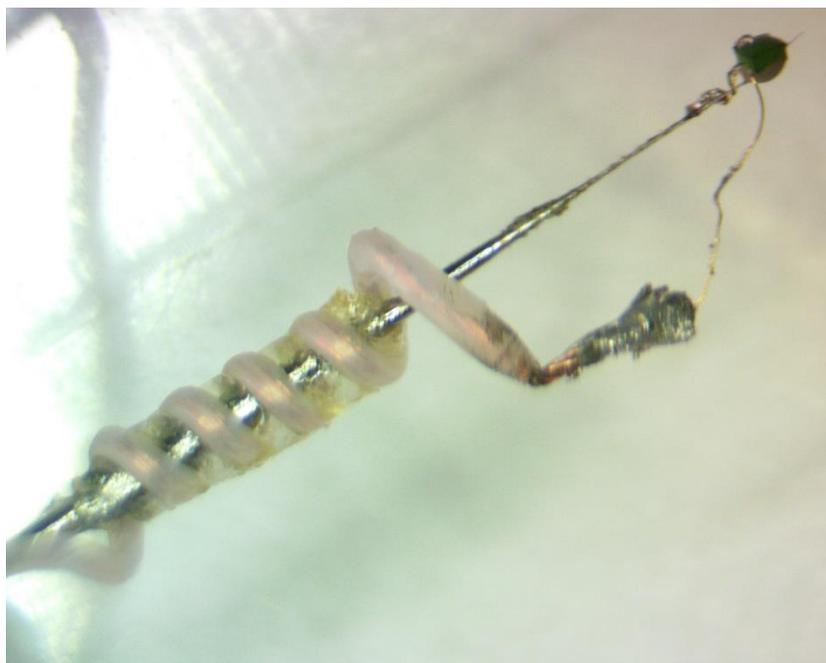


Рис. 4. Изображение системы управления нанопинцетом в оптическом микроскопе

Для управления нагревом диода было разработано устройство, позволяющее регулировать величину постоянного тока, поступающего в диод, с точностью до 0,1 мА (рис. 5).

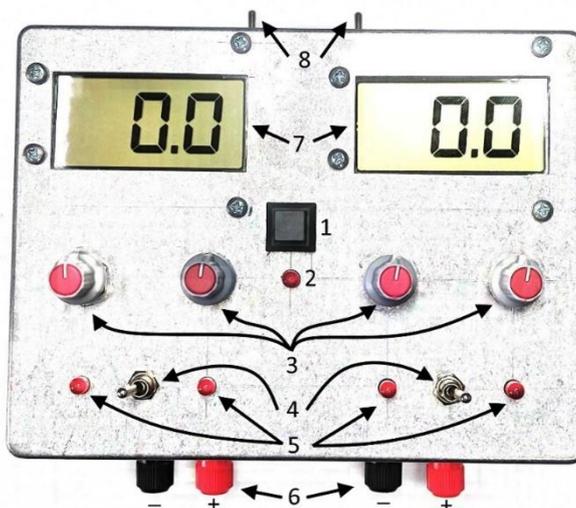


Рис. 5. Устройство управления нагревом

Используя четыре независимых прецизионных потенциометра (3), по два на один выходной канал (6), можно установить необходимый выходной ток для достижения определенной температуры диода. Переключение между потенциометрами осуществляется трехпозиционными тумблерами (вкл-выкл-вкл) (4). Светодиоды (5) показывают выбранный канал и потенциометр. На

главной панели управления устройства также есть кнопка (1), которая отвечает за включение и выключение устройства и подачу тока на каждый из двух каналов от одного и того же источника питания, поэтому они имеют небольшую зависимость выходного тока при одновременном использовании обоих каналов. Индикатор (2) показывает, что устройство включено или выключено. Выходной ток отображается цифровыми амперметрами (7), сконфигурированными для измерений в диапазоне от 0 до 75 мА с точностью до 0,1 мА. Диапазон измерения амперметра можно изменить, выбрав необходимый шунт (резистор). Каждый из амперметров имеет свой собственный источник питания, включение и выключение осуществляется двумя независимыми тумблерами (вкл-выкл) (8).

Таким образом, с помощью одного потенциометра выставляется такое значение тока, которое нагревает диод до температуры начала мартенситного фазового превращения - нанопинцет открыт, с помощью второго потенциометра – до температуры конца аустенитного фазового перехода – нанопинцет закрыт. Переключаясь между двумя потенциометрами, осуществляется открытие и закрытие нанопинцета и термическое расширение определяется в температурном диапазоне этих состояний.

2. Результаты и обсуждения

Результаты численного моделирования термического расширения вольфрамовой иглы в зависимости от длины (l) и толщины (d) ее кончика показывают, что величина термического расширения слабо зависит от длины кончика (рис. 6, 7, 8).

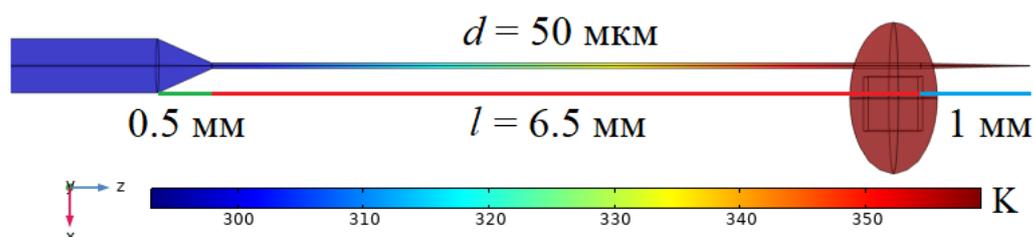


Рис. 6. Численное моделирование распределения температуры в кончике вольфрамовой иглы

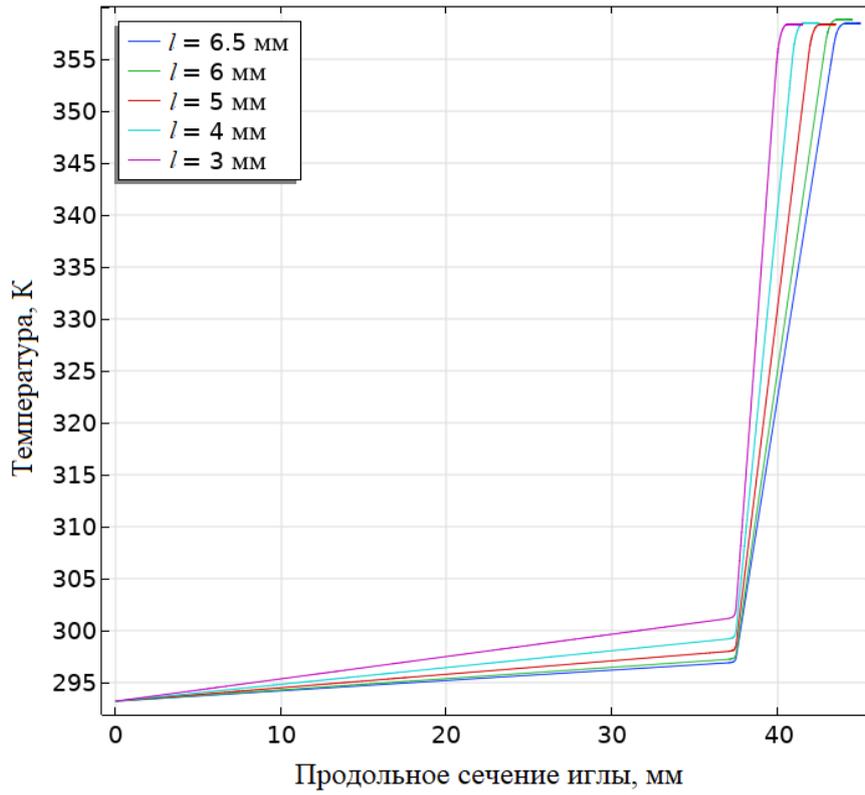


Рис. 7. Численное моделирование распределения температуры по всей длине вольфрамовой иглы

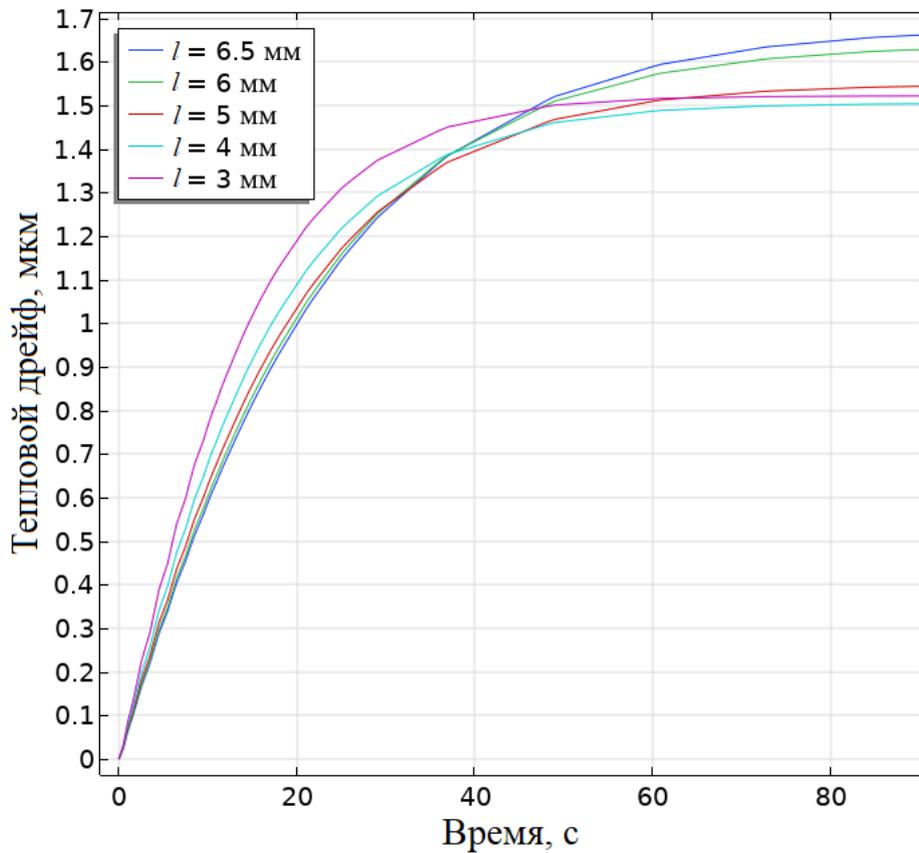


Fig. 8. Численное моделирование теплового дрейфа вольфрамовой иглы в зависимости от длины кончика

Однако, наблюдается сильная зависимость теплового дрейфа от толщины кончика. Это вызвано тем, что чем толще кончик, тем дальше распространяется тепло по всему объему иглы.

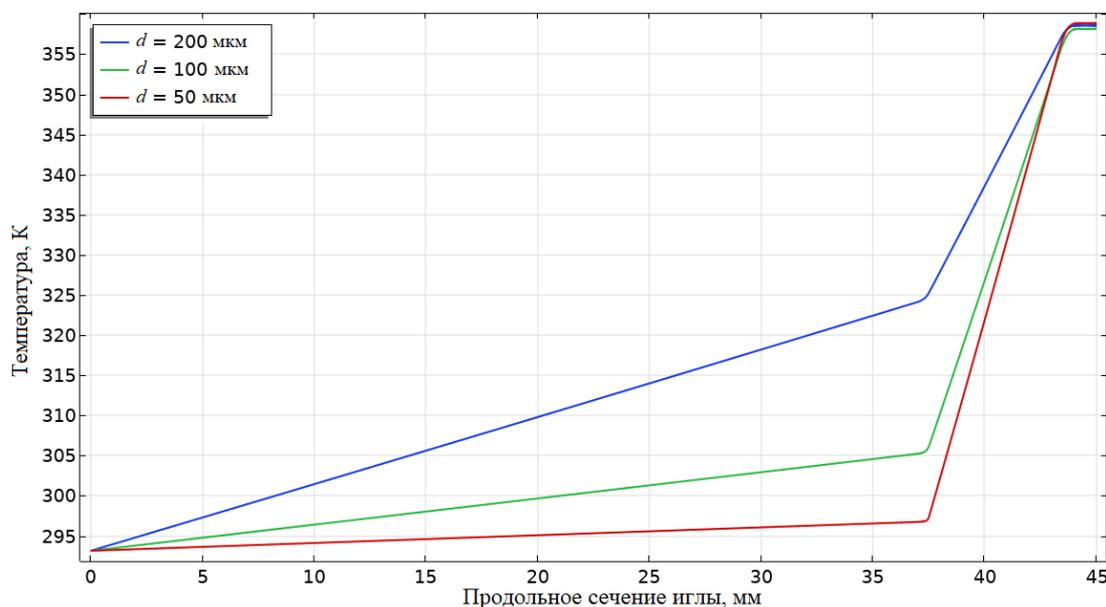


Рис. 9. Численное моделирование распределения температуры по всей длине вольфрамовой иглы

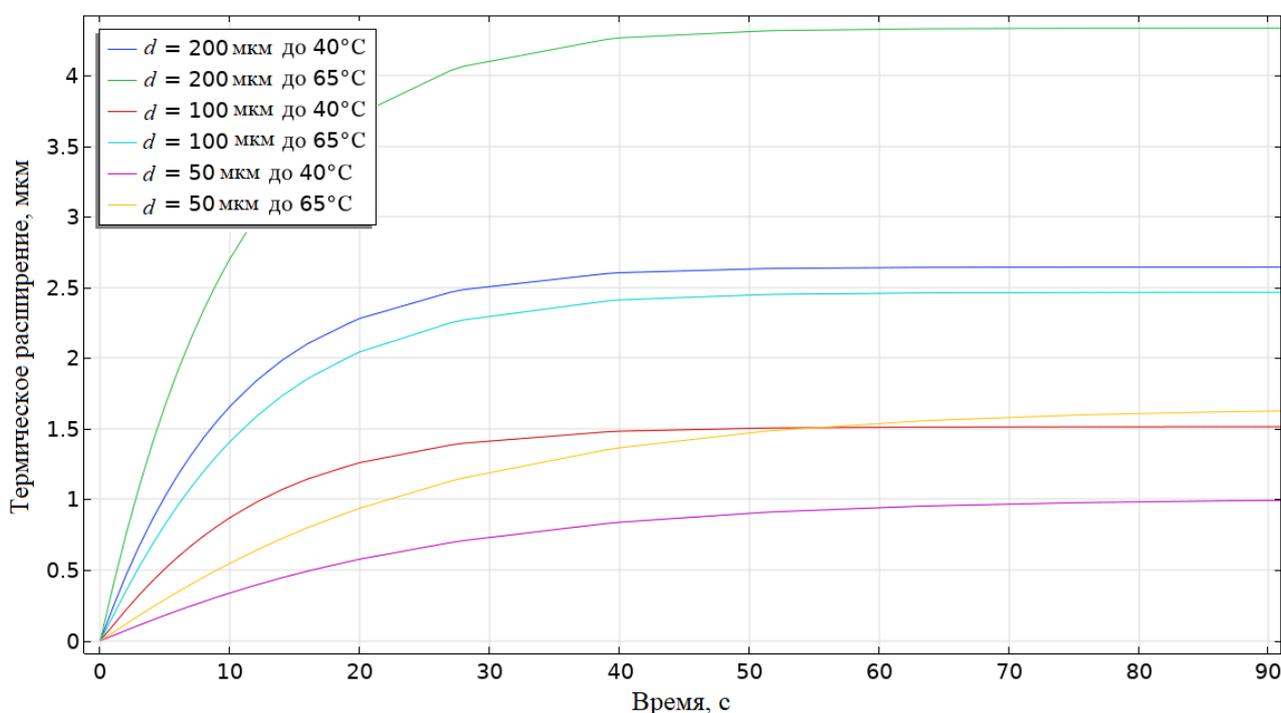


Рис. 10. Численное моделирование теплового дрейфа вольфрамовой иглы в зависимости от толщины кончика

На рис. 10 приведен график численного моделирования теплового дрейфа вольфрамовой иглы в зависимости от толщины кончика при условии, что во всем

объеме проволоки установилось стационарное распределение температуры, причем в основании иглы температура равна комнатной (20 °С), а на ее кончике температура открытия (40 °С) и закрытия нанопинцета (65 °С). Итоговый тепловой дрейф вычисляется как разница между открытым и закрытым состоянием нанопинцета (рис. 12).

Для проверки результатов моделирования был проведен эксперимент на иглах с толщиной кончика $d = 100$ и 50 мкм, а также на игле с простым коническим кончиком. Результаты экспериментов приведены на рис. 11.

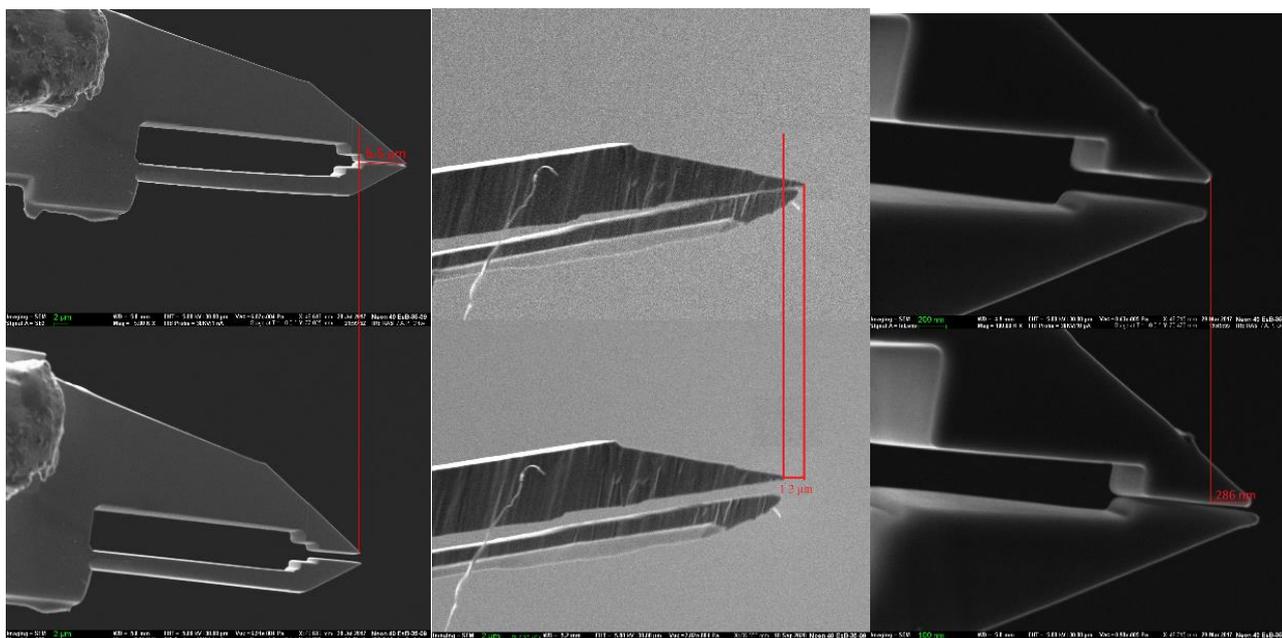


Рис. 11. Экспериментальные данные теплового дрейфа вольфрамовых игл с коническим кончиком, с толщиной кончика $d = 100$ и 50 мкм, слева направо соответственно

Экспериментальные данные теплового дрейфа находятся в хорошем согласии с результатами моделирования. Очевидно, что существует прямая зависимость теплового дрейфа от толщины (d) кончика вольфрамовой иглы (рис.12).

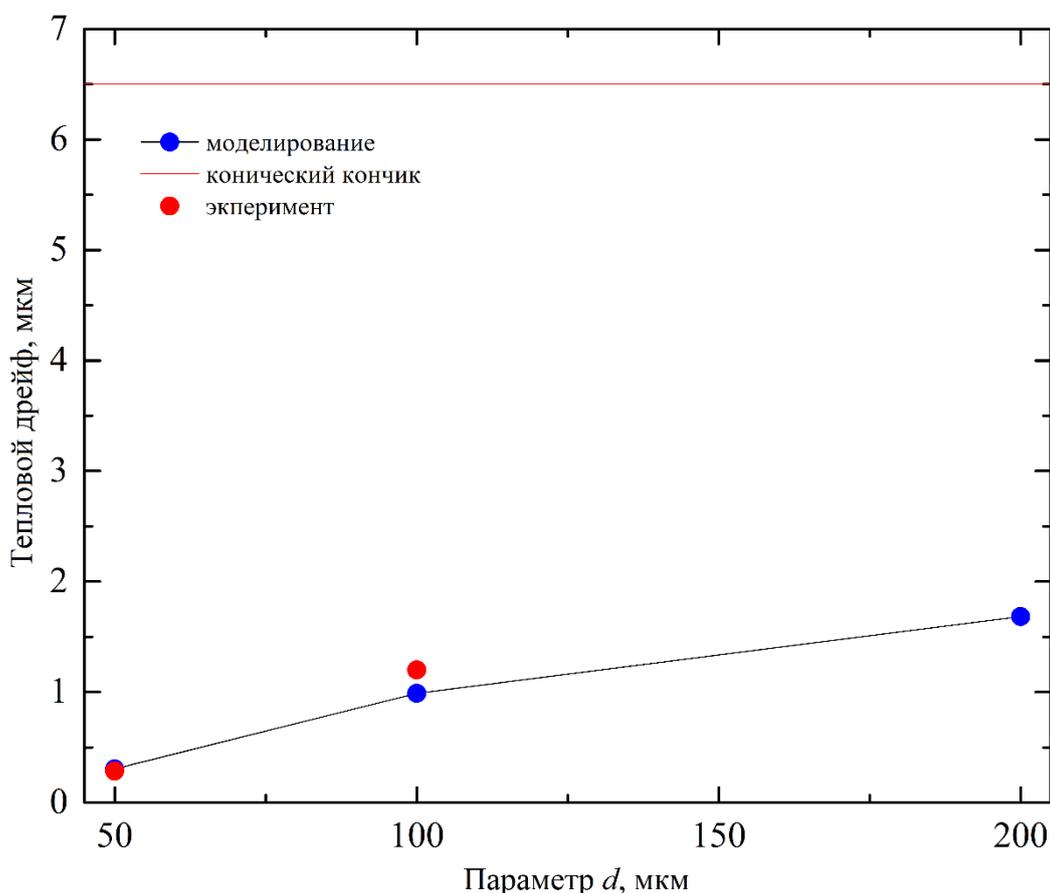


Рис. 12. Численное моделирование теплового дрейфа вольфрамовой иглы в зависимости от толщины кончика

Заключение

Используя методы численного моделирования вычислен оптимальный профиль кончика вольфрамовой иглы. Показано, что тепловой дрейф вольфрамовой иглы, вызванный ее термическим расширением, уменьшается с уменьшением толщины ее кончика. Данные моделирования подтверждены экспериментально. Оптимизированная система управления нагревом нанопинцета продемонстрировала не только повышенную точность манипулирования, но и сниженное потребление тока.

Автор для переписки: Прокунин Алексей Витальевич, prokunin.av@phystech.edu

Финансирование: Функциональные наноматериалы были разработаны и изучены при поддержке гранта РФФ № 17-19-01748. Эксперимент по наноманипулированию проведен при поддержке гранта РФФИ № 18-57-70004.

Литература

1. Von Gratowski S., Koledov V., Shavrov V., Petrenko S., Irzhak A., Shelyakov A., Jede R. Advanced system for nanofabrication and nanomanipulation based on shape memory alloy. *Frontiers in Materials Processing, Applications, Research and Technology*. 2018. P.135-154. http://doi.org/10.1007/978-981-10-4819-7_13
2. Lega P., Kuchin D., Koledov V. et al. Simulation of control system for shape memory nanotweezers. *Materials Science Forum*. 2016. V.845. P.142-145. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.845.142>
3. Zhikharev A., Irzhak A., Lega P., et. al. New system for manipulation of nanoobjects based on composite Ti₂NiCu/Pt nanotweezers with shape memory effect. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. V.741. P.012206. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/741/1/012206>
4. Lega P., Koledov V., Kuchin D., et al. Simulation of the control process applied to the micromechanical device with the shape memory effect. *Journal of communications technology and electronics*. 2015. V.60(10). P.1124-1133. <http://dx.doi.org/10.1134/S1064226915100083>
5. Zhikharev A., Beresin M., Lega P., et al. Thermally Controlled Nanoobjects Manipulation System Based on Composite Ti₂NiCu/Pt Nanotweezers. *6th IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (IEEE 3M-NANO)*. 2016. P.101-104. <https://doi.org/10.1109/3M-NANO.2016.7824943>

Для цитирования:

Прокунин А.В., Коледов В.В., Кузнецов Д.Д., Иржак А.В., Орлов А.П., Лега П.В. Оптимизация системы управления наномеханическими устройствами с эффектом памяти формы. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.2.8>