

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.6.1>

УДК: 536.212.2, 53.06, 537.9

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ РАБОТЫ КОМПОЗИТНОГО НАНОАКТЮАТОРА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ С МИНИМАЛЬНЫМ ТЕРМИЧЕСКИМ ДРЕЙФОМ

С.Р. Романов<sup>1</sup>, Н.Ю. Катаев<sup>1</sup>, П.В. Лега<sup>2</sup>, А.П. Орлов<sup>2</sup>, А.И. Карцев<sup>3</sup>,  
А.В. Прокунин<sup>2</sup>, В.В. Коледов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, с.1

<sup>2</sup> ИРЭ им. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7

<sup>3</sup> Вычислительный центр ДВО РАН, 680000, Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, д. 65

Статья поступила в редакцию 24 мая 2022 г.

**Аннотация.** Исследованы кинетические свойства и высокоскоростные процессы при фазовых превращениях и связанных с ними эффектах гигантских деформаций в микро- и нанобразцах функциональных наноматериалов в переменных электрическом и тепловом полях. Теоретически изучены процессы управляемой деформации (активации) и распространения тепла при малых размерах образцов, в которых возможно проявление таких явлений, как термоупругий мартенситный фазовый переход и связанный с ним эффект памяти формы (ЭПФ). Построена численная модель быстрого действия композитного актюатора и определена зависимость максимальной частоты активации в зависимости от линейных размеров.

**Ключевые слова:** нанотрубки, эффект памяти формы, мартенситное превращение,  $Ti_2NiCu$ , наноманипуляция.

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-19-00783.

**Автор для переписки:** Романов Сергей Романович, [romanov\\_sr@bk.ru](mailto:romanov_sr@bk.ru)

## Введение

Недавний прогресс в разработке наномеханических инструментов с ЭПФ привел к успешной реализации новых систем для трехмерного манипулирования нанообъектами, таких как УНТ, нанопровода, нановискеры и т.д [1, 2]. ЭПФ вызывается контролируемым нагревом активного слоя наноинструмента [3]. Однако, нагрев приводит к тепловому дрейфу и ошибкам в позиционировании наноинструмента. Поэтому, необходимо создавать новые конструкции для управления наномеханическими устройствами с ЭПФ.

Изучение кинетики фазового термоупругого мартенситного перехода и времен механического отклика в термоуправляемых микро- и наноактюаторах на основе сплава  $Ti_2NiCu$  с ЭПФ представляет важную фундаментальную и практическую задачу, не решенную до сих пор. Скорость протекания мартенситного перехода в интерметалидах, как известно, ограничена, как инерцией тепловых процессов, так и характерными временами термоактивации мартенситного ФП 1-го рода и скоростью движения границ мартенситных доменов [4]. Очевидно, что уменьшение характерного размера микроактюатора с ЭПФ может позволить уменьшить характерные тепловые времена и приблизиться к физическому пределу скорости активации.

Однако на практике эксперименты с актюаторами, описанные в мировой литературе пока далеки от физического предела быстродействия. Например, исследователи в [5] изучали быстродействие биметаллического композитного кантилевера, на основе сплава с ЭПФ  $NiTi$ . Длина экспериментального образца равнялась 30 мкм. Авторы разработали систему для термического управления срабатывания устройства посредством джоулевого нагрева. Входное напряжение срабатывания составило порядка 0,5 В. В ходе эксперимента исследователям удалось добиться циклической работы кантилевера путем подачи на его контакты кратковременных электрических импульсов, что позволило определить практический верхний предел работы устройства – 2 кГц. На более высоких частотах кончик кантилевера не достигал максимального отклонения, что говорит о наступлении режима, когда тепло не может быть отведено от

устройства достаточно быстро, чтобы обеспечить полное охлаждение. В [6] авторами был предложен интеллектуальный мягкий композитный актюатор, способный быстро изгибаться с большими деформациями под воздействием джоулева нагрева. Он представляет собой конструкцию, состоящую из мягкой матрицы, нескольких встроенных проволок из материала с ЭПФ и анизотропной многослойной армирующей структуры. Подобная конструкция из нескольких тонких проволок с ЭПФ позволила исследователям добиться быстрого охлаждения актюатора, что является критически важным для его циклической работы. Скорость срабатывания устройства соответствует его собственной частоте, а резонансное усиление актюатора увеличивает амплитуду срабатывания актюатора так, что возникают большие деформации. Актюатору требуется несколько циклов срабатывания, чтобы достичь и затем поддерживать максимальную деформацию наконечника. Данное устройство способно к большим деформациям при частоте активации до 35 Гц. Авторы обнаружили, что для более высоких скоростей срабатывания длина исполнительного механизма должна быть укорочена, чтобы увеличить собственную частоту исполнительного механизма до соответствия частоте срабатывания. В [7] описана разработка высокоскоростного микромасштабного актюатора, имеющего ромбовидные каркасные структуры диаметром 25 мкм. Подобная конструкция способствует быстрому реагированию на изменение температуры из-за своего малого объема, а также допускает большой диапазон удлинения благодаря пружинному поведению при деформации растяжения. Для приведения в действие и контроля устройства была использована лазерная система управления. Движение актюатора, разработанного в данном исследовании, является линейным, а явление быстрого нагрева и охлаждения, вызванное эффектом масштаба, позволяет приводить его в действие с высокой частотой, до 1600 Гц.

В данной статье представлены результаты численного моделирования быстродействия композитного наноактюатора на основе сплава  $Ti_2NiCu$  с ЭПФ.

## 1. Построение численной модели

В ходе численного моделирования были решены задачи джоулева нагрева системы актюатора с токоподводящими иглами и высокоскоростного процесса активации композита с ЭПФ. Подобные физические процессы описываются целым рядом различных дифференциальных уравнений в частных производных, дополненных начальными и граничными условиями. Их решение реализовано посредством метода конечных элементов.

Актюатор представляет из себя устройство, состоящее из двух консолей: верхней (большой) и нижней (малой) (рис. 1). Их длина равна 1 мкм, но вдобавок к этому будем ее варьировать от 5 до 30 мкм с шагом 5 мкм в процессе моделирования, при этом пропорционально изменяя все остальные размеры актюатора. Верхняя консоль целиком состоит из материала с ЭПФ  $Ti_2NiCu$ , а нижняя представляет собой биметаллический композит из  $Ti_2NiCu$  и слоя упругого металла – платины. Торцы вольфрамовых игл в модели имеют постоянную комнатную температуру 20 °С. Диаметр верхней иглы 0,5 мм у основания и 4 мкм в месте соединения с актюатором, а нижней – 0,5 мм и 2 мкм соответственно. В месте спайки верхней иглы с актюатором добавлена «заплата» из платины. А для имитации окисла на кончике нижней иглы в месте ее соприкосновения с актюатором была введена тонкая прослойка из оксида вольфрама (IV).

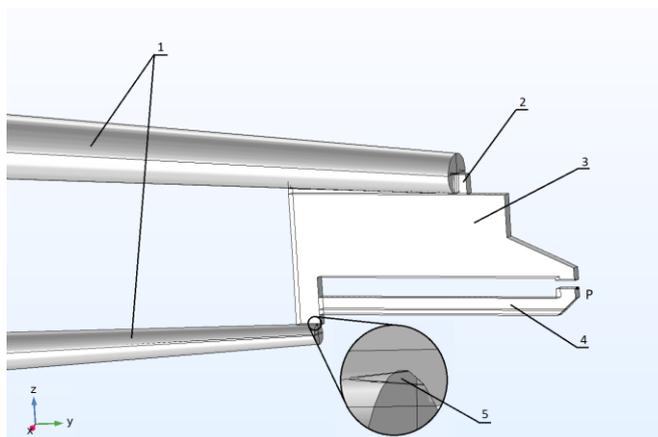


Рис. 1. Геометрия системы нанопинцета: 1 – иглы, 2 – «заплата», 3 – верхняя консоль, 4 – нижняя консоль, 5 – прослойка, P – точка на кончике нижней консоли

Периодическое срабатывание актюатора происходит благодаря протекающему через конструкцию импульсному току с заданной частотой  $\nu$ , а его сила  $I_{max}$  подбирается таким образом, чтобы температура в точке Р (рис. 1) во время включения тока успевала стать выше, чем температура конца аустенитного превращения  $A_s$ . А также очень важно, чтобы при данных параметрах  $\nu$  и  $I_{max}$  во время паузы (временной промежуток между импульсами тока) температура в той же точке успевала опускаться ниже, чем температура конца мартенситного превращения  $M_f$ . Число импульсов тока  $N$  выбираем достаточным для того, чтобы можно было наблюдать установившуюся постоянную температуру остывания нижней консоли во время паузы после каждого импульса.

## 2. Результаты и обсуждения

По результатам расчетов были визуализированы процессы джоулева нагрева и смыкания-размыкания консолей нанопинцета (рис. 2). Как можно заметить, наибольший нагрев достигается в месте контакта нижней вольфрамовой иглы и нижней консоли микроактюатора. Это объясняется тем, что проводник имеет в этом месте наименьшую площадь поперечного сечения и, следовательно, наибольшее электросопротивление.

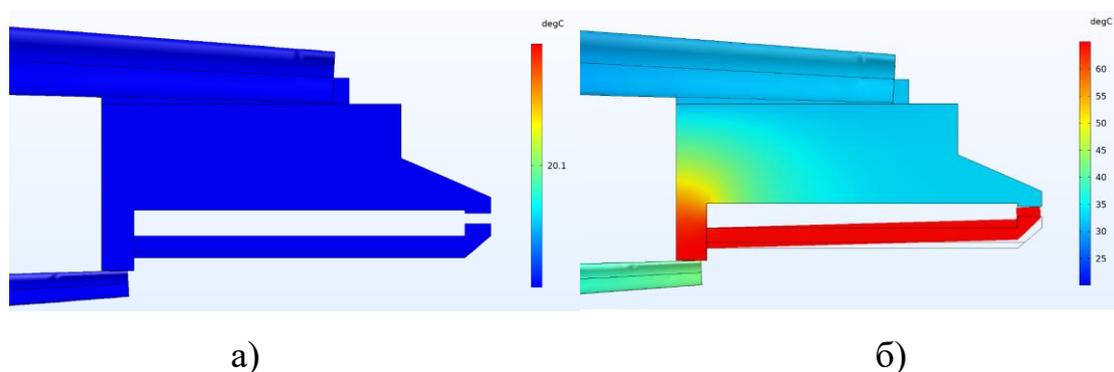


Рис. 2. Моделирование распределения температуры в нанопинцете в (а) открытом (мартенситном) и (б) закрытом (аустенитном) состоянии

Были построены графики силы управляющего тока, объемной доли мартенсита в окрестности точки Р, температуры в точке Р и смещения точки Р

вдоль Oz в зависимости от времени для различных длин нижней консоли l. Графики для длины нижней консоли  $l=30$  мкм представлены на рис. 3. Оценка быстродействия устройства по временным колебаниям физических характеристик в точке P является наиболее оптимальной, так как в ней температурные и фазово-структурные изменения происходят позже, чем во всей остальной конструкции нижней консоли ввиду ее наибольшего расстояния до очага нагрева и верхней иглы, отводящей тепло.

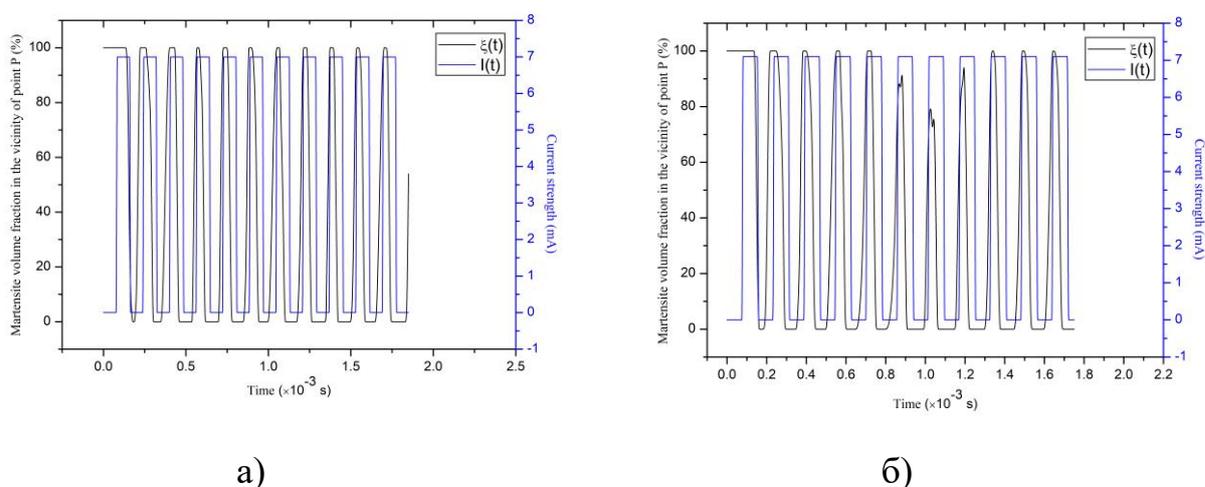


Рис. 3. Зависимость объемной доли мартенсита в окрестности точки P и силы управляющего тока от времени при  $\nu_1 = 6.2 \text{ kHz}$ ,  $I_{max}^1 = 7 \text{ mA}$ ,  $N = 11$  (а),  $\nu_2 = 6.4 \text{ kHz}$ ,  $I_{max}^2 = 7.1 \text{ mA}$ ,  $N = 11$  (б)

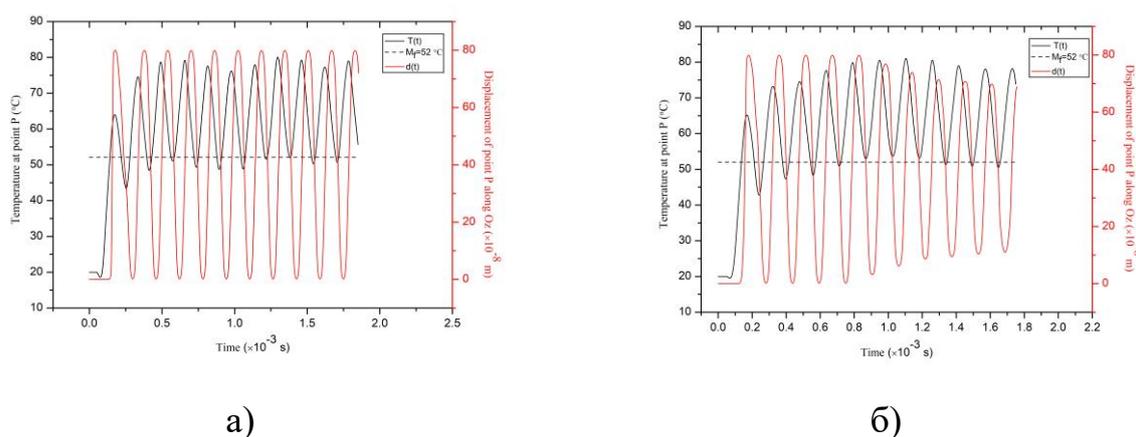


Рис. 4. Зависимость смещения точки P и температуры в ней от времени при  $\nu_1 = 6.2 \text{ kHz}$ ,  $I_{max}^1 = 7 \text{ mA}$ ,  $N = 11$  (а),  $\nu_2 = 6.4 \text{ kHz}$ ,  $I_{max}^2 = 7.1 \text{ mA}$ ,  $N = 11$  (б)

Сила управляющего тока  $I_{max}^1$  и его частота  $\nu_1$  поддерживают необходимый температурный режим в нижней консоли, который обеспечивает полные периодические фазовые переходы в слое с ЭПФ (рис. 3а). Благодаря этому нижняя консоль способна бесконечно долго колебаться с максимальной амплитудой, позволяющей губкам пинцета смыкаться (рис. 4а). При этом частота срабатывания актюатора равна частоте управляющего тока системы. С увеличением частоты управляющего тока до  $\nu_2$  и его силы до  $I_{max}^2$  устранившаяся постоянная температура остывания нижней консоли в точке Р оказывается выше температуры конца мартенситного превращения  $M_f$ . Из-за этого на определенном цикле работы слой с ЭПФ не успевает полностью перейти в мартенситную фазу (рис. 3б). В результате нижняя консоль не возвращается в изначальное положение, что влечет за собой затухание ее колебаний и последующее прекращение работы устройства (рис. 4б). Соответственно, можно утверждать, что максимальная частота срабатывания актюатора для данных длин нижней консоли 1 является  $\nu_1 = \nu_{max}$  с точностью до 1 кГц. Таким образом, относительная точность вычислений составляет более 95%. Максимальная частота срабатывания актюатора уменьшается с увеличением длины нижней консоли (табл. 1).

Таблица 1. Максимальная частота срабатывания актюатора  $\nu_{max}$  для различных длин  $l$  нижней консоли.

$\nu_{max}$ , кГц	$l$ , мкм
10	72±1
15	31±1
20	17,0±0,5
25	10,0±0,25
30	6,2±0,2

Это связано с тем, что на более массивную конструкцию требуется больше времени на нагрев и охлаждение до необходимых температур. Определим

характер ее убывания, расположив на координатной плоскости расчетные данные (рис. 5а).

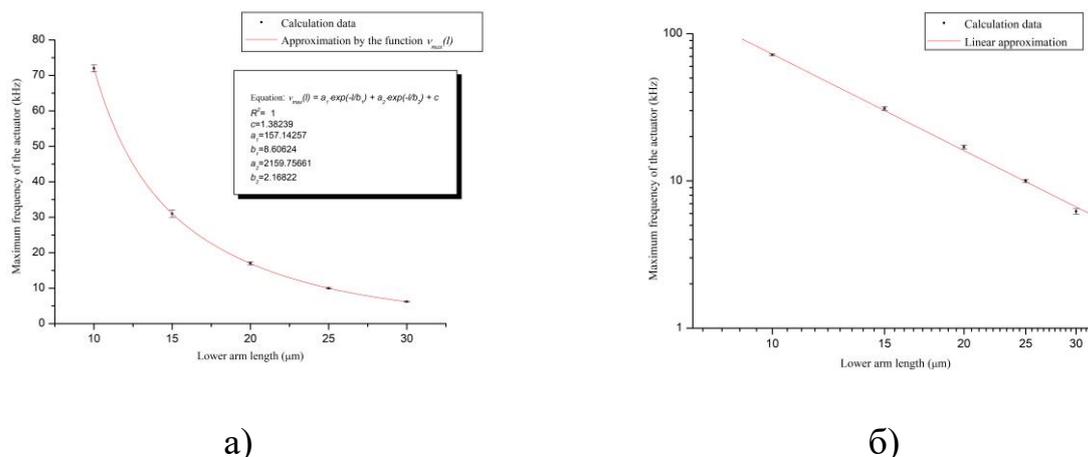


Рис. 5. Расчетные данные зависимости максимально возможной частоты управляющего тока от длины нижней консоли и их аппроксимация функцией  $v_{max}$  (а). Линейная аппроксимация расчетных данных на координатной плоскости в логарифмическом масштабе (б).

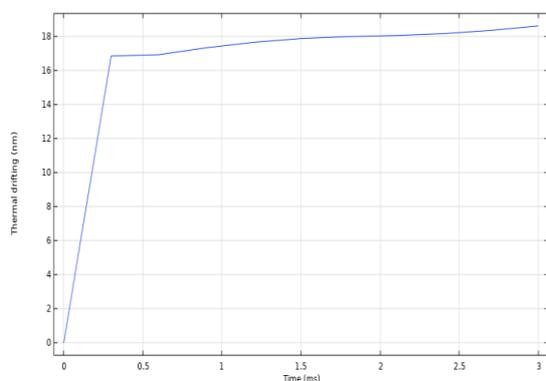
Проведенная аппроксимация расчетных данных функцией  $v_{max}$  говорит нам об экспоненциальном характере убывания максимальной частоты срабатывания актюатора при увеличении длины нижней консоли по формуле:

$$v_{max}(l) = 157,14 \cdot \exp\left(-\frac{l}{8,6}\right) + 2159,76 \cdot \exp\left(-\frac{l}{2,17}\right) + 1,38$$

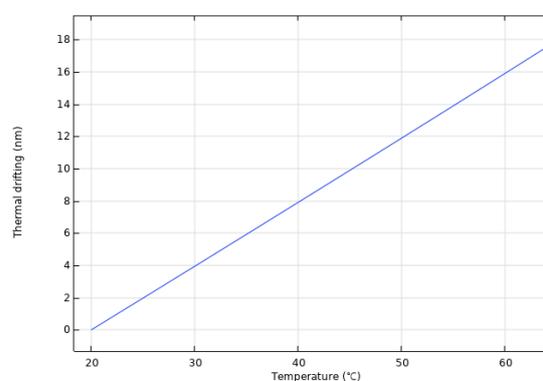
Достоверность полученных расчетных данных подтверждает их линейная аппроксимация на координатной плоскости в логарифмическом масштабе (рис. 5б).

Для данной конструкции был смоделирован тепловой дрейф. Пропускание тока 5 мА в течение 3 мс по нашей системе нанопинцета сопротивлением 30 Ом приводит к смещению кончика нижней консоли нанопинцета на 17-18 нм вдоль горизонтальной оси Y (рис. 6а). Пропускание тока приводит к нагреву нанопинцета до температуры срабатывания. Нижняя консоль нагревается до температуры  $T=65^{\circ}\text{C}$ , при которой тепловой дрейф принимает максимальное значение (рис. 6б).

При пропускании тока тепловой дрейф достигает своего максимума уже через 0,3 мс и дальше не увеличивается (рис. 6а). С температурой дрейф увеличивается линейно (рис. 6б).



а)



б)

Рис. 6. Расчетные данные зависимости смещения кончика нижней консоли нанопинцета при пропускании тока от времени (а), от температуры (б)

## Заключение

В работе продемонстрировано моделирование рекордного по быстродействию, а также с минимальным тепловым дрейфом устройства с ЭПФ. По мнению авторов, такие устройства могут найти применение в технологии микромеханических систем для создания исполнительных элементов и роботизированных устройств, в lab-on-chip технологии, в биологии, для исследования биологических и небиологических микро- и нанообъектов, для создания новых наноинструментов, таких как нано-пилы, нано-дрели и т.д.

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-19-00783.

## Литература

1. Orlov A.P., Frolov A.V., Lega P.V., Kartsev A., Zybtssev S.G., Pokrovskii V.Ya., Koledov V.V. Shape memory effect nanotools for nano-creation: examples of nanowire-based devices with charge density waves. *Nanotechnology*. 2021. V.32. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac2190>
2. Lega P., Koledov V., Orlov A., Kuchin D., Frolov A., Shavrov V., Martynova A., Irzhak A., Shelyakov A., Sampath V., Khovaylo V., Ari-Gur P. Composite Materials Based on Shape-Memory Ti2NiCu Alloy for Frontier Micro- and Nanomechanical Applications. *Advanced Engineering Materials*. 2017. V.19. <https://doi.org/10.1002/adem.201700154>
3. Fu Y.Q. et al. Microactuators of free-standing TiNiCu films. *Smart Mater. Struct.* 2007. V.16. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/6/070>
4. Kashchenko M.P. and Chashchina V.G. Dynamic model of supersonic martensitic crystal growth. *Phys.-Usp.* 2011. V.54. P.331. <https://doi.org/10.3367/UFNe.0181.201104a.0345>
5. Knick C.R. et al. High frequency, low power, electrically actuated shape memory alloy MEMS bimorph thermal actuators. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2019. V.7. №29. <https://doi.org/10.1088/1361-6439/ab1633>
6. Song S.H. et al. 35 Hz shape memory alloy actuator with bending-twisting mode. *Scientific reports*. 2016. V.1. №6. P.1-13. <https://doi.org/10.1038/srep21118>
7. Lee H.T. Shape memory alloy (sma)-based microscale actuators with 60% deformation rate and 1.6 kHz actuation speed. *Small*. 2018. V.23. №14. <https://doi.org/10.1002/smll.201801023>

### Для цитирования:

Романов С.Р., Катаев Н.Ю., Лега П.В., Орлов А.П., Карцев А.И., Прокунин А.В., Коледов В.В. Моделирование высокоскоростной работы композитного наноактюатора на основе эффекта памяти формы с минимальным термическим дрейфом. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2022. №6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.6.1>