

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.7.11>

УДК: 539.2, 534.1, 621.792

## ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОМАНИПУЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОПИНЦЕТА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПОДВЕШЕННЫХ МИКРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ ВИСКЕРОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.Р. Романов<sup>1</sup>, В.В. Коледов<sup>1</sup>, М.В. Никитин<sup>1</sup>, А.П. Орлов<sup>1</sup>, В.Я. Покровский<sup>1</sup>,  
А.В. Шеляков<sup>2</sup>, Д.А. Хачатрян<sup>2</sup>, А.В. Клецов<sup>2</sup>, А.К. Погорелов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп.7

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
115409, Москва, Каширское шоссе, 31

Статья поступила в редакцию 18 июня 2026 г.

**Аннотация.** Разработана технология манипулирования нитевидными монокристаллами (вискерами) квазиодномерных полупроводников с волной зарядовой плотности (КОП с ВЗП) для создания подвешенных образцов. Создан управляемый током микропинцет на основе композитных лент с эффектом памяти формы (ЭПФ). Разработана методика захвата и фиксации вискеров с помощью микроманипулятора и вольфрамовой иглы, а также метод формирования контактов с использованием переносимой микропинцетом «маски» и последующего напыления металла. На изготовленном подвешенном образце методом гетеродинамирования обнаружены и исследованы резонансные моды высокочастотных электромеханических колебаний вискера TaS<sub>3</sub>.

**Ключевые слова:** микроманипулирование, микропинцет, квазиодномерные полупроводники, эффект памяти формы, волна зарядовой плотности, электромеханические колебания.

**Финансирование:** Работа выполнена за счет средств Госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

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

## Введение

Среди новых функциональных материалов для микросистемной техники и микроэлектроники большое внимание привлекают КОП с ВЗП. В этих материалах продемонстрирована наивысшая среди всех твердотельных материалов чувствительность деформаций кристаллической решетки к внешнему электрическому полю, которую можно охарактеризовать пьезомодулем, достигающим  $10^{-6}$  м/В [1].

Ключевой научно-технической задачей при изучении КОП с ВЗП остается разработка надежной технологии подвешивания образцов – в частности, вискером субмикронной толщины – для исследования высокочастотных электромеханических колебаний. Существующие методы микроманипулирования, основанные на электростатических или магнитных принципах, обладают рядом ограничений: они недостаточно универсальны и требуют специальной подготовки образцов [2-4]. Это существенно затрудняет работу с микроструктурами различной природы, включая квазиодномерные проводники.

В качестве модельного материала для экспериментов выбран  $\text{TaS}_3$  – типичный представитель КОП с ВЗП, характеризующийся температурой пайерлсовского перехода 220 К [5]. Его отличительная черта – сильная механическая связь между волной зарядовой плотности и кристаллической решеткой. Благодаря этому вискеры  $\text{TaS}_3$  могут эффективно использоваться в качестве актюаторов и приемников механических колебаний, например, с применением метода гетеродинамирования [6].

В данной работе предложен комплексный подход к созданию подвешенных микроструктур из вискером  $\text{TaS}_3$ , включающий разработку управляемого микропинцета на основе ЭПФ, формирование операций захвата и размещения образцов, а также метод защиты подвешенной части вискера

при напылении металла. Использование данной технологии позволило сформировать рабочий образец, пригодный для изучения резонансных электромеханических явлений, ранее обнаруженных в материале TaS<sub>3</sub> и других квазиодномерных проводниках с ВЗП [7]. Это открывает перспективы для изучения динамических свойств таких материалов и разработки новых микроэлектромеханических сенсоров на их основе.

Кроме того, несмотря на богатую теоретическую и экспериментальную базу исследований КОП с ВЗП, значительная часть наблюдаемых в них динамических эффектов до сих пор остается недостаточно изученной вследствие ограничений в технологических возможностях подготовки образцов. В частности, реализация свободного провиса вискера необходима для изучения собственных колебательных мод и их взаимодействия с электронными степенями свободы [8]. Следовательно, развитие методов прецизионной микросборки не только решает прикладную задачу создания тестовых структур, но и является инструментом фундаментального исследования электромеханических свойств КОП с ВЗП.

## 1. Разработка микропинцета с ЭПФ

Для захвата и переноса микрообъектов был создан микропинцет на основе ЭПФ. Его функциональная часть представляет собой аморфно-кристаллические биметаллические композитные ленты из сплава Ti<sub>2</sub>NiCu с ЭПФ [9], расположенные последовательно на термоэлектрическом микромодуле Пельтье с размерами 0,8 × 1,6 × 1,6 мм. Микромодуль прикреплен к теплоотводящей пластине теплопроводящим клеем (рис. 1а). В пластине предусмотрено отверстие для крепления на манипуляторе.

Управление микропинцетом осуществляется пропусканием постоянного тока через микромодуль Пельтье. При этом были предварительно определены величины тока  $I_n$  и  $I_k$ , соответствующие началу и концу смыкания губок микропинцета. Рабочий цикл включает следующие этапы:

- 1) Охлаждение: Подача тока  $I_1 = 100$  мА для снижения температуры ниже температуры конца мартенситного превращения  $M_f$ .

- 2) Предварительный нагрев: Смена полярности и подача тока  $I_2 < I_n$ .
- 3) Захват объекта: Увеличение тока до  $I_3 \geq I_k$ , что приводит к смыканию губок и удержанию микрообъекта.
- 4) Освобождение объекта: Повторная смена полярности и подача тока  $I_1$  для размыкания губок.

Затем цикл работы микропинцета при необходимости повторяется.

Были измерены рабочие характеристики микропинцета в процессе нагрева и охлаждения. Для определения оптимальных значений тока  $I_n$  и  $I_k$  прецизионно изменялась величина подаваемого тока и фиксировалась величина зазора микропинцета при заданном значении тока. На рисунке 1б представлены фрагменты видеосъемки рабочего цикла микропинцета, для которого оптимальные значения тока  $I_n$  и  $I_k$  составляют 60 мА и 120 мА, соответственно. При этом измеренное максимальное усилие сжатия губок микропинцета составляет 6 мН.

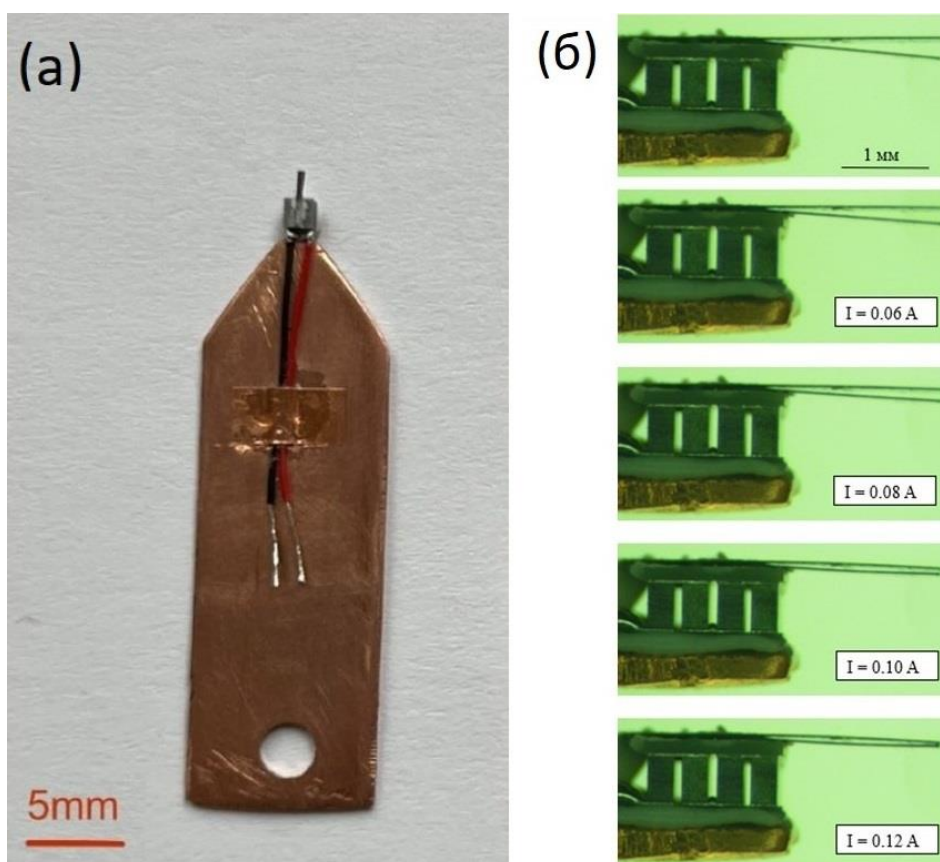


Рис. 1. (а) Внешний вид микропинцета с теплоотводящей медной пластиной.  
(б) Рабочий цикл микропинцета при нагреве микромодулем Пельтье с разной величиной тока питания.

## 2. Создание микроэлектромеханической структуры на основе вискера TaS<sub>3</sub>

Создана лабораторная установка, предназначенная для механического манипулирования микрообъектами (рис. 2). В ее состав входят: микроскоп, трехмерный пьезомикроманипулятор, который может быть оснащен микропинцетом с ЭПФ или вольфрамовой иглой с диаметром острия 1-5 мкм, а также микропаяльник.

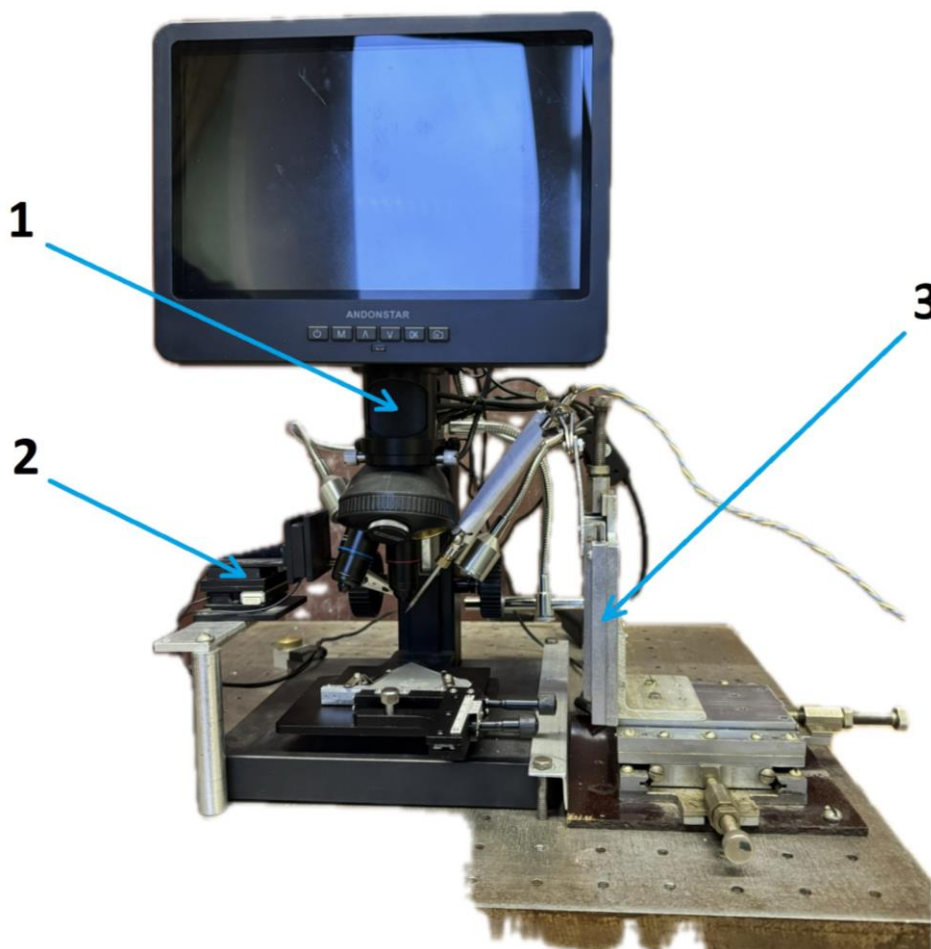


Рис. 2. Общий вид установки для манипулирования микрообъектами.

1 – оптический микроскоп, 2 – пьезомикроманипулятор,  
3 – микрометрические столики с держателем для микропаяльника.

На базе разработанной установки создана методика, обеспечивающая захват и перенос вискеро́в. На рисунке 3 показаны стадии размещения вискера TaS<sub>3</sub> на подложке, представляющей собой два кремниевых фрагмента с промежутком между ними, с использованием микроманипулятора. В качестве рабочего инструмента в микроманипуляторе применяется вольфрамовая игла.

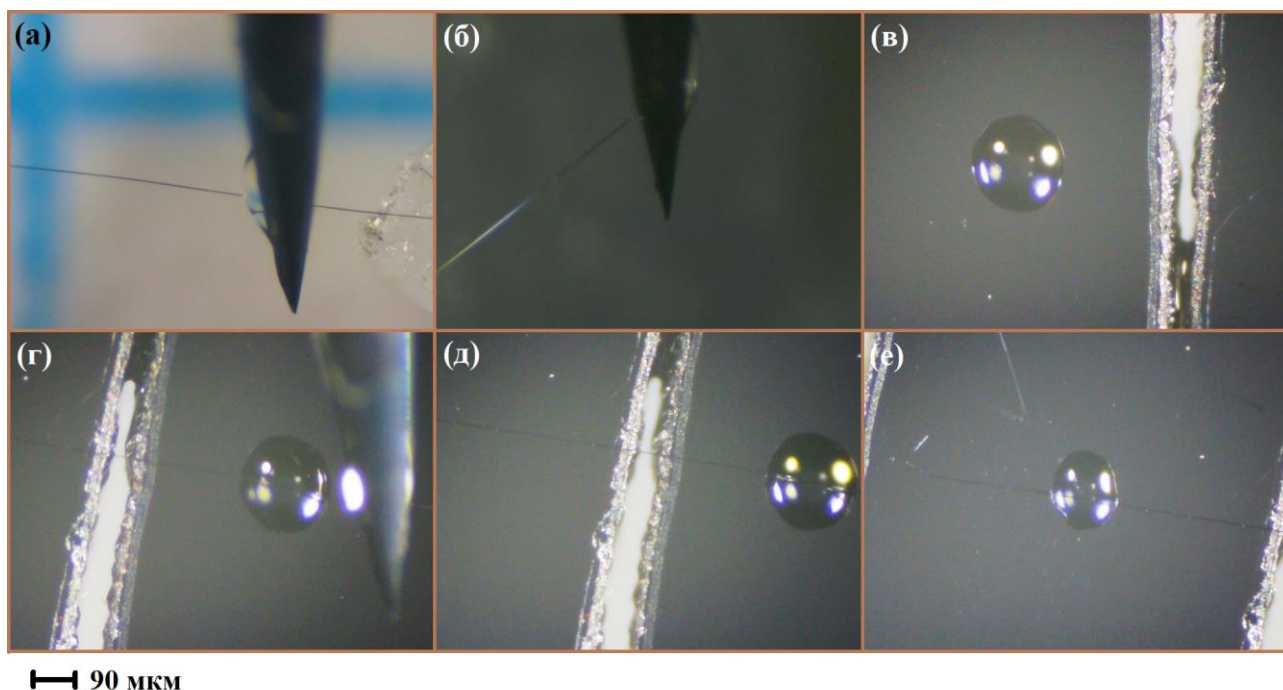


Рис. 3. Перемещение вискера  $\text{TaS}_3$  на подложку.

Иглой, на кончике которой находится капля эпоксидного клея, захватывают отдельный вискер (рис. 3а). Когда клей затвердеет, его вытаскивают из «ваты» (рис. 3б). Затем другой иглой наносят каплю клея на один из краев подложки (рис. 3в). Затем к этой капле клея подносят вискер, который был закреплен на игле (рис. 3г). Когда клей на подложке затвердеет, иглу отрывают, а вискер остается на подложке (рис. 3д). Далее свободный конец вискера приклеивают с помощью второй капли клея (рис. 3е).

Чтобы создать два электрических контакта к приклеенному вискеру, на подложку напыляется металл. При этом важно защитить от напыления ту часть вискера, которая нависает над зазором между кремниевыми фрагментами. Для этого используется специальная «маска» – широкий и плоский кристалл, который приклеивается к подложке так, чтобы он накрывал образец. Перемещение «маски» на подложку выполняется с использованием микропинцета с ЭПФ. На рисунке 4 представлен полный цикл этого процесса.

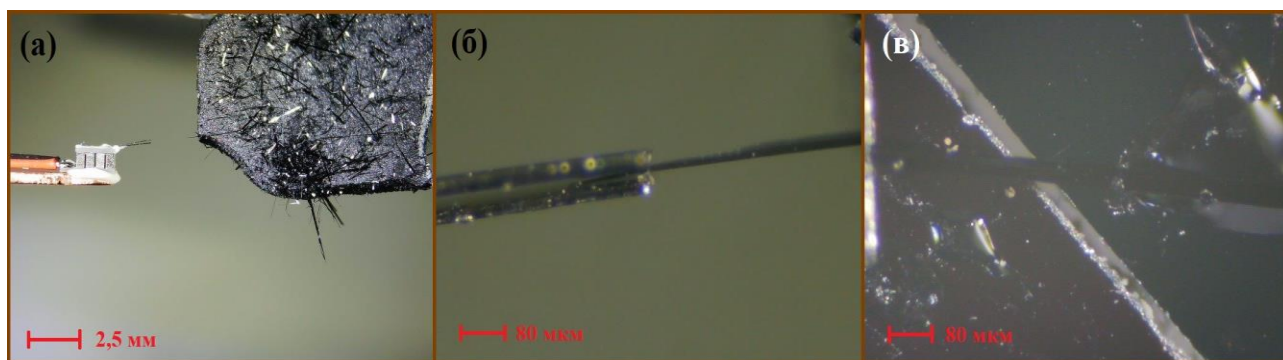


Рис. 4. (а) Подведение микропинцета к отдельному кристаллу, (б) захват кристалла, (в) позиционирование кристалла над подвешенной частью вискера и опускание на подложку свободным концом в каплю эпоксидного клея.

Напыление контактов выполняется одним из двух способов – лазерной абляцией либо термическим. После завершения процесса и удаления «маски» получают образец, готовый для измерений электронного транспорта (рис. 5).

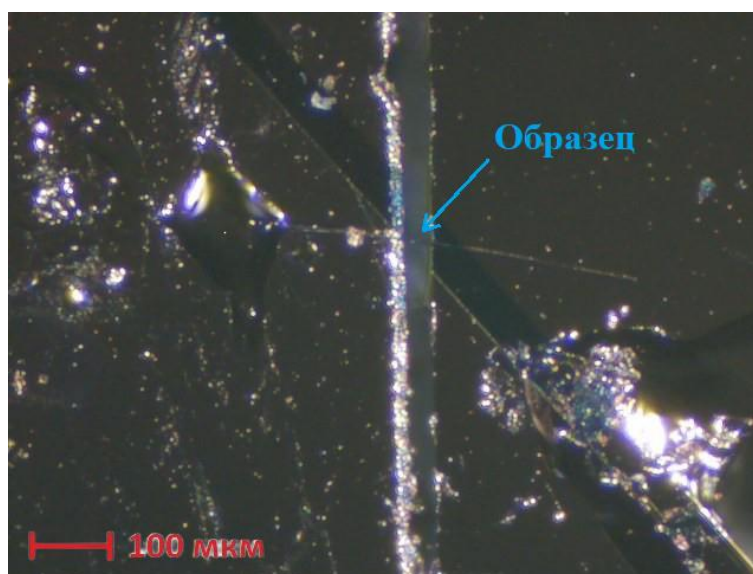


Рис. 5. Готовый образец в виде подвешенного вискера  $\text{TaS}_3$  с медными контактами, нанесенными при помощи термического напыления.

### 3. Изучение электромеханических эффектов в вискерах $\text{TaS}_3$

Готовый образец длиной 38 мкм и шириной  $\sim 1,5$  мкм поместили в криовставку в сосуд Дьюара и охладили ниже температуры пайерсловского перехода 220 К, при которой в  $\text{TaS}_3$  образуется ВЗП. Далее была проведена серия измерений зависимостей напряжения смещения от частоты пропускаемого через образец переменного тока в диапазоне температур от 78 К до 220 К

с применением методики гетеродинирования [6]. Данный метод позволяет регистрировать резонансные колебания образца благодаря резкому возрастанию амплитуды модуляции его проводимости. Важно отметить, что для возбуждения механических колебаний вискером  $\text{TaS}_3$  не требуется применение внешних приводов (например, затвора), так как сам образец деформируется при приложении электрического поля. На полученных кривых моды механических колебаний вискера проявляются в виде пиков или зигзагов (рис. 6а). После обработки данных для двух мод были построены температурные зависимости их частот (рис. 6б).

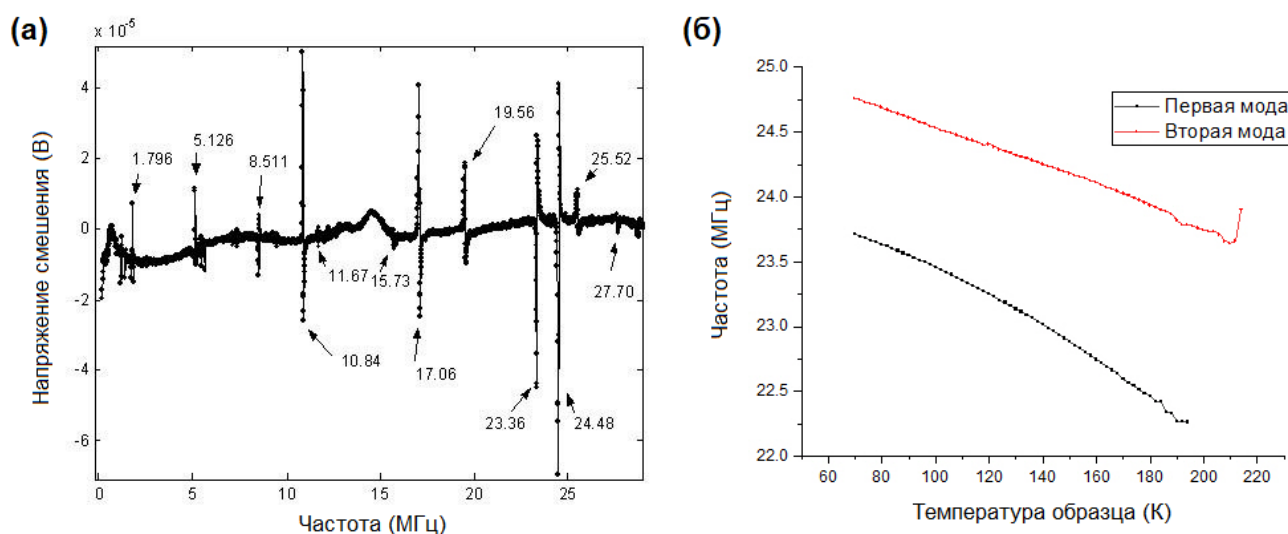


Рис. 6. (а) Резонансные пики, наблюдаемые при пропускании переменного тока через образец при температуре 126 К. (б) Температурные зависимости частот двух мод, демонстрирующих самые интенсивные всплески.

Измерения показали, что частота двух выбранных мод колебаний изменяется на 6 % на 100 К, что на порядок больше, чем можно было бы ожидать из-за удлинения образца в результате теплового расширения. Следовательно, данный результат указывает на сильную температурную зависимость модулей упругости в  $\text{TaS}_3$ , что требует дальнейших исследований.

Преимущества данного метода изучения колебаний перед классическими методами возбуждения и детектирования механических колебаний в подвешенных нитях заключается в самовозбуждении и самодетектировании колебаний вискером  $\text{TaS}_3$ . Благодаря упругой связи между ВЗП и кристаллической решеткой образца  $\text{TaS}_3$  могут деформироваться в электрическом поле и обладают

высокой тензочувствительностью [1]. Таким образом сам вискер является готовым микроэлектромеханическим устройством. При уменьшении длины вискера до 1 мкм можно ожидать возбуждения механических колебаний на частотах порядка 1 ГГц.

Таким образом, изготовление микромеханических устройств на основе нитевидных кристаллов  $TaS_3$  показывает перспективность применения квазиодномерных проводников с волной зарядовой плотности для создания функциональных НЭМС-структур. Подвешенные вискеры  $TaS_3$  могут использоваться в качестве сверхчувствительных нановесов для регистрации малых масс – вплоть до отдельных молекул – за счет изменения их резонансных характеристик при адсорбции/десорбции молекул. Также сильная связь между механическими деформациями и ВЗП открывает возможности для создания электромеханических преобразователей и детекторов ГГц диапазона.

## Заключение

В работе получены следующие основные результаты:

- 1) Изготовлен микропинцет на основе аморфно-кристаллической ленты  $Ti_2NiCu$  со следующими параметрами: ширина зазора между губками 85 мкм, ток срабатывания 120 мА, время срабатывания  $\sim 1$  с.
- 2) Предложен метод изготовления подвешенных микроструктур из вискеро́в.
- 3) Измерены колебательные моды на амплитудно-частотной характеристике образца КОП  $TaS_3$  с ВЗП длиной 38 мкм и шириной  $\sim 1,5$  мкм.

**Финансирование:** Работа выполнена за счет средств Госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

## Литература

1. Покровский В. Я., Зыбцев С. Г., Никитин М. В. и др. Высокочастотные, квантовые и электромеханические эффекты в квазиодномерных кристаллах с волной зарядовой плотности // Успехи физических наук. – 2013. – Т. 183. – №. 1. – С. 33–54.

2. Bellino M. G., Calvo E. J., Gordillo G. J. Nanowire manipulation on surfaces through electrostatic self-assembly and magnetic interactions // *Physica status solidi (RRL)* – Rapid Research Letters. – 2009. – Т. 3. – №. 1. – С. 1–3.
3. Llerena Zambrano B. et al. Magnetic manipulation of nanowires for engineered stretchable electronics // *ACS Nano*. – 2021. – Т. 16. – №. 1. – С. 837–846.
4. Fan D. L. et al. Electric tweezers // *Nano Today*. – 2011. – Т. 6. – №. 4. – С. 339–354.
5. Никитин А. В., Фролов А. В., Орлов А. П. и др. Воздействие одноосного растяжения на нелинейную проводимость и структурная перестройка волны зарядовой плотности в TaS<sub>3</sub> ниже азотной температуры // *Радиотехника и электроника*. – 2020. – Т. 65. – №. 10. – С. 1001–1007.
6. Pokrovskii V. Y., Nikitin M. V., Zybtev S. G. Self-detection of mechanical oscillations of charge-density wave conductors // *Physica B: Condensed Matter*. – 2015. – Т. 460. – С. 39–44.
7. Thorne R. E., Lyons W. G., Lyding J. W., Tucker J. R. Charge-density-wave transport in quasi-one-dimensional conductors. I. Current oscillations // *Physical Review B*. – 1987. – Т. 35. – №. 12. – С. 6348.
8. Pokrovskii V. Y., Zybtev S. G., Gorlova I. G. Torsional strain of TaS<sub>3</sub> whiskers on the charge-density wave depinning // *Physical Review Letters*. – 2007. – Т. 98. – №. 20. – С. 206404.
9. Иржак А. В., Захаров Д. И., Калашников В. С. и др. Актюаторы на основе композитного материала с эффектом памяти формы // *Радиотехника и электроника*. – 2010. – Т. 55. – №. 7. – С. 874–886.

#### Для цитирования:

Романов С.Р., Коледов В.В., Никитин М.В., Орлов А.П., Покровский В.Я., Шеляков А.В., Хачатрян Д.А., Клецов А.В., Погорелов А.К. Лабораторная технология микроманипулирования с использованием микропинцета с эффектом памяти формы для создания подвешенных микроструктур на основе вискозисов функциональных материалов. // *Журнал радиоэлектроники*. – 2026. – №. 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.7.11>