



# Кремниевые спиновые кубиты для универсальных квантовых вычислений

Крупенин В.А.

Физический факультет, Центр квантовых технологий МГУ,  
ФТИАН им. К.А. Валиева РАН,  
ИФП им. Ржанова СО РАН



## Цель проекта

Разработка квантовых вычислительных платформ дырочных спиновых кубитов на основе управляемых затвором квантовых точек в Si

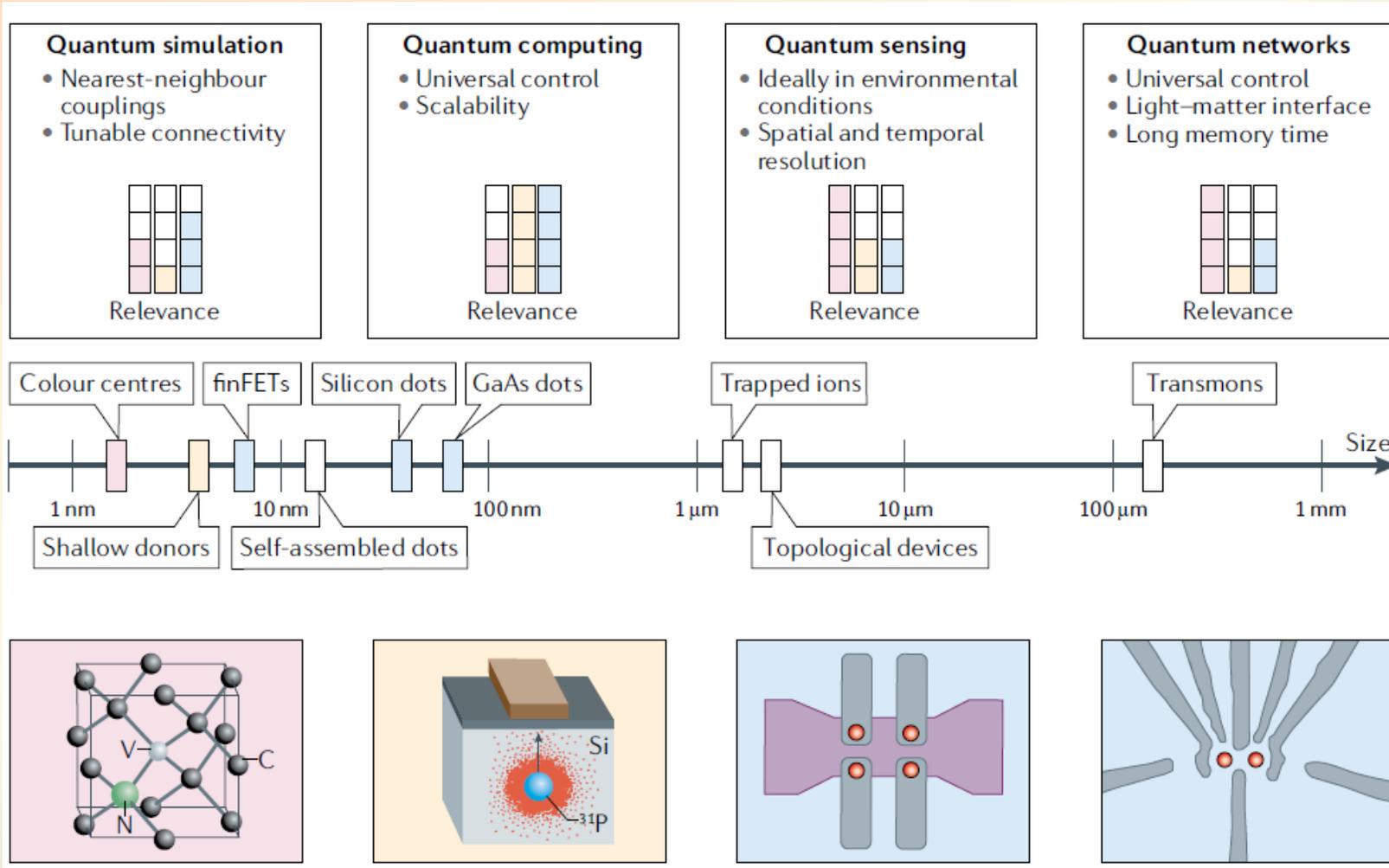
## Решаемые задачи

- Разработка технологических подходов к созданию кремниевых спиновых кубитов
- Оптимизация методов инициализации, управления и считывания кубитов
- Поиск способов улучшения квантовых характеристик создаваемых систем
- Теоретическое исследование и моделирование разрабатываемых спиновых кубитов



# Твердотельные кубиты

Y. Nakamura, Y. Pashkin, J. Tsai, [Nature](#) 398, 786 (1999) - первый твердотельный кубит

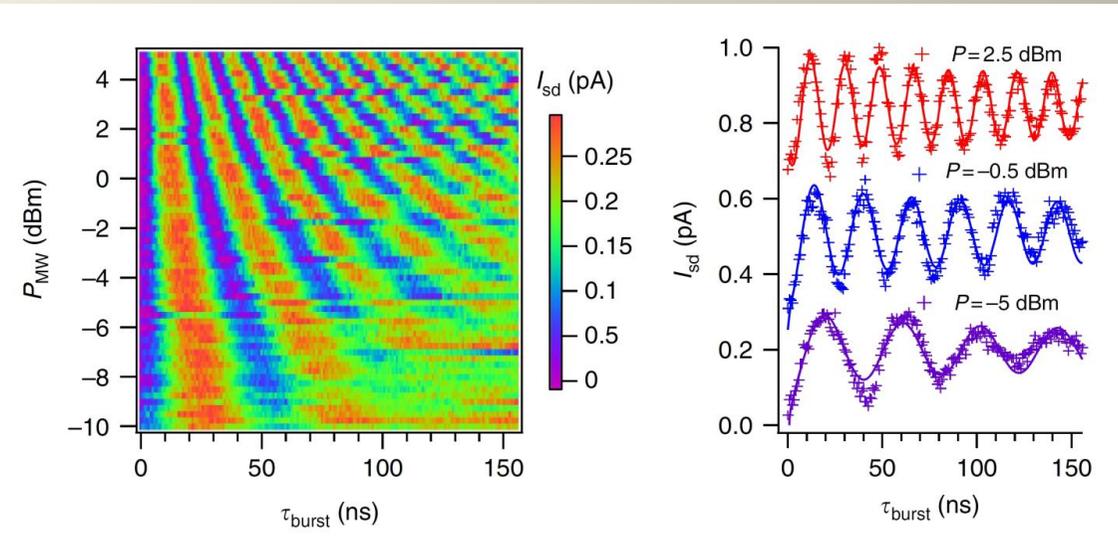
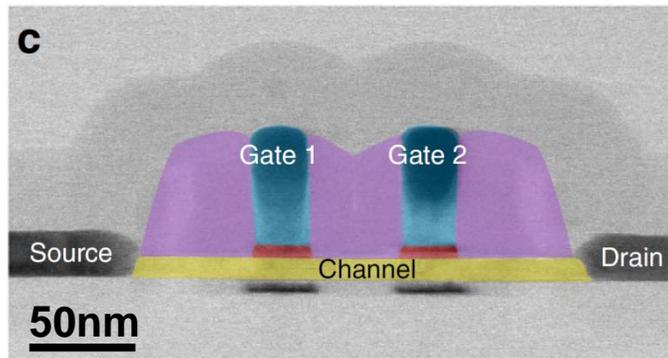
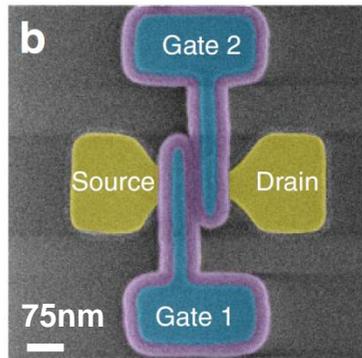
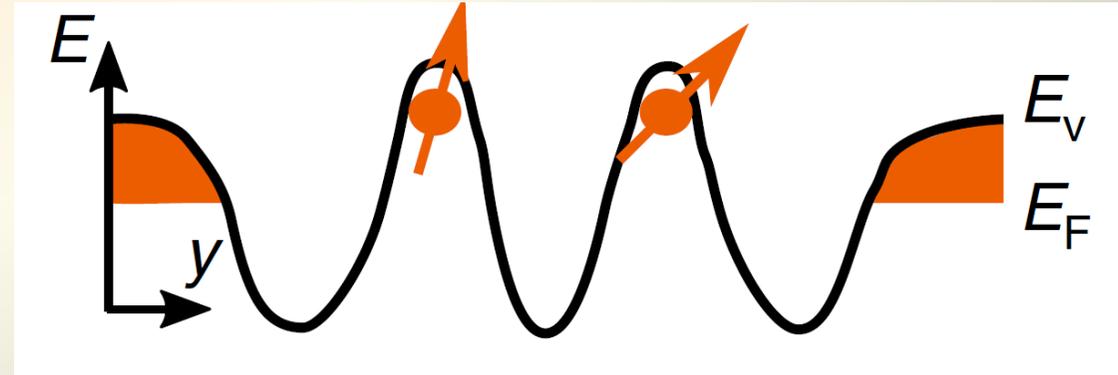
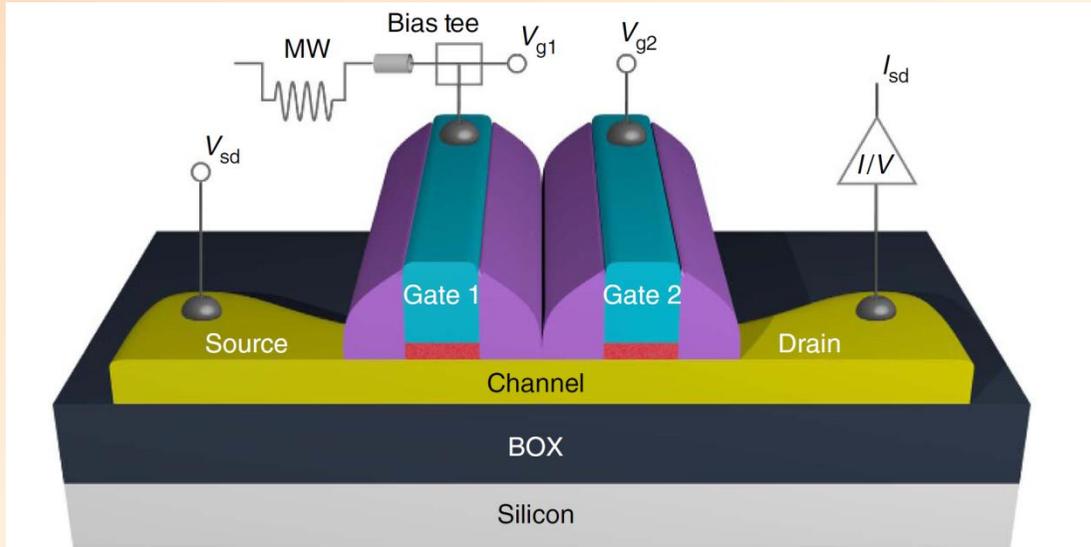


**Silicon dots**  
 99.9% - single-qubit gate fidelity  
 99.5% - two-qubit gate fidelity

A. Chatterjee, P. Stevenson ... F. Kuemmeth, [Nature Reviews/Physics](#) 3, 157–177 (2021)



# Кремниевые спиновые дырочные кубиты



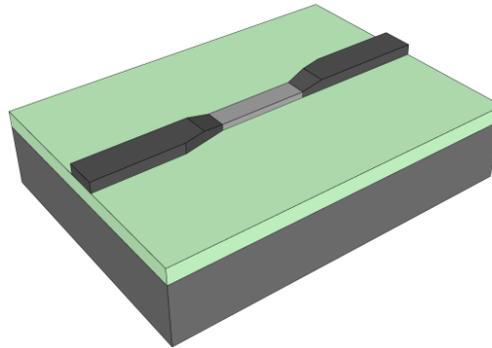
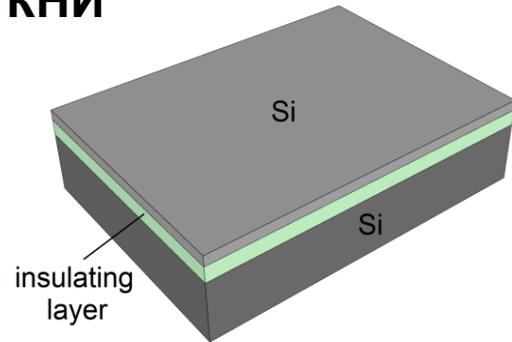
A. Crippa ... De Franceschi, [Nature Communication](#) 7:13575, 1-6 (2016), 10:2776, 1-6 (2019)



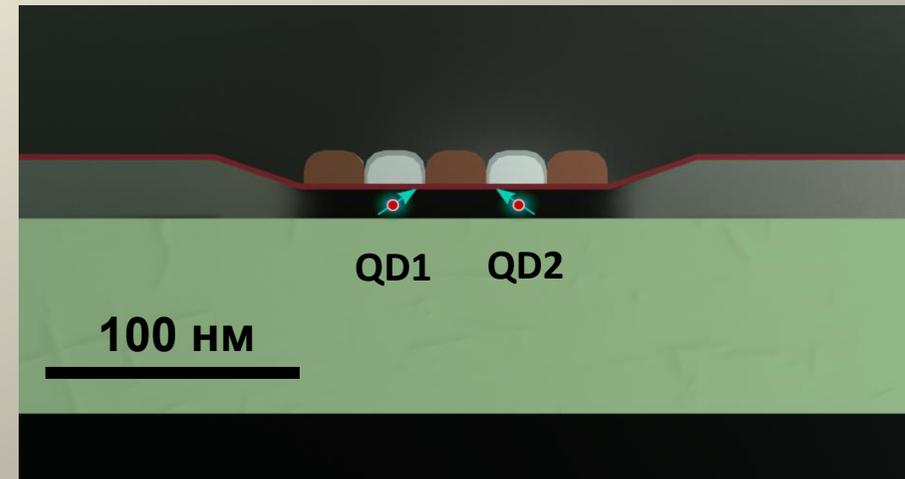
# Изготовление кубита



КНИ



100 нм



QD1, QD2 – квантовые точки



## Ключевые преимущества предлагаемых спиновых дырочных Si-кубитов

1. Методы изготовления кубитовых структур совместимы со стандартными процессами КМОП.
2. Каждый кубит может быть адресован через общий затвор.
3. Считывание состояния кубита может быть выполнено через общий затвор.
4. Сильное спин-орбитальное взаимодействие позволяет управлять состояниями квантовых точек чисто электрическими сигналами.



## Парк оборудования



- чистые помещения
- электронная литография
- вакуумное напылительное оборудование
- высокотемпературный быстрый отжиг (до 1800°С);
- реактивное ионное травление
- сканирующие зондовые микроскопы
- рефрижераторы (10 мК – 300 К, 8 Тл)
- атомно-слоевое осаждение
- кластерная плазменная обработка
- ионная имплантация
- прецизионная измерительная техника
- изготовление специализированных пластин КНИ



## Список рейтинговых публикаций коллектива



- A. Guthrie, S. Kafanov, M.T. Noble, Yu.A. Pashkin, G.R. Pickett, V. Tsepelin, A.A. Dorofeev, V.A. Krupenin, D.E. Presnov, ***Nature Communications***, 12(1), 2645 (2021).
- D. Braukmann, V.P. Popov, E.R. Glaser, T.A. Kennedy, M. Bayer, J. Debus, ***Phys. Rev. B***, 97, 125426 (2018).
- S.A. Dagesyan, V.V. Shorokhov, D.E. Presnov, E.S. Soldatov, A.S. Trifonov, V.A. Krupenin, ***Nanotechnology***, 28, 225304 (2017).
- V.V. Shorokhov, D.E. Presnov, S.V. Amitonov, Yu.A. Pashkin, V.A. Krupenin, ***Nanoscale***, 9, 613 (2017).
- L. Fedichkin, M. Shapiro, M.I. Dykman, ***Phys. Rev. A***, 80(1), 012114 (2009).
- Z.C. Dong, X.L. Guo, A.S. Trifonov, P.S. Dorozhkin, K. Miki, K. Kimura, S. Yokoyama, S. Mashiko, ***Phys. Rev Lett.***, 92, 086801 (2004).
- L. Fedichkin, A. Fedorov, ***Phys. Rev. A***, 69(3), 032311 (2004).
- X.L. Guo, Z.C. Dong, A.S. Trifonov, S. Mashiko, T. Okamoto, ***Phys. Rev. B***, 68, 113403 (2003).
- S.A. Gurvitz, L. Fedichkin, D. Mozyrsky, G.P. Berman, ***Phys. Rev. Lett.***, 91(6), 066801 (2003).
- S. Saikin, L. Fedichkin, ***Phys. Rev. B***, 67(16), 161302(R) (2002).
- K.Y. Arutyunov, J.P. Pekola, A.B. Pavolotski, D.A. Presnov, ***Phys. Rev. B***, 64(6), 064519–1–064519–6 (2001).
- A.A. Larionov, L.E. Fedichkin, K.A. Valiev, ***Nanotechnology***, 12(4), 536 (2001).
- L. Fedichkin, M. Yanchenko, K.A. Valiev, ***Nanotechnology***, 11(4), 387 (2000).
- A.A. Larionov, L.E. Fedichkin, A.A. Kokin, K.A. Valiev, ***Nanotechnology***, 11(4), 392 (2000).
- V.A. Krupenin, S.V. Lotkhov, H. Scherer, T. Weimann, A.B. Zorin, F.-J. Ahlers, J. Niemeyer, H. Wolf, ***Phys. Rev. B.***, 59(16), 10778 (1999).
- K.Y. Arutyunov, D. Presnov, S.V. Lotkhov, A.B. Pavolotski, L. Rinderer, ***Phys. Rev. B***, 59(9), 6487–6498 (1999).
- J. Ahlers, J. Niemeyer, T. Weimann, H. Wolf, V.A. Krupenin, S.V. Lotkhov, ***Phys. Rev. B.***, 53(20), 13682 (1996).



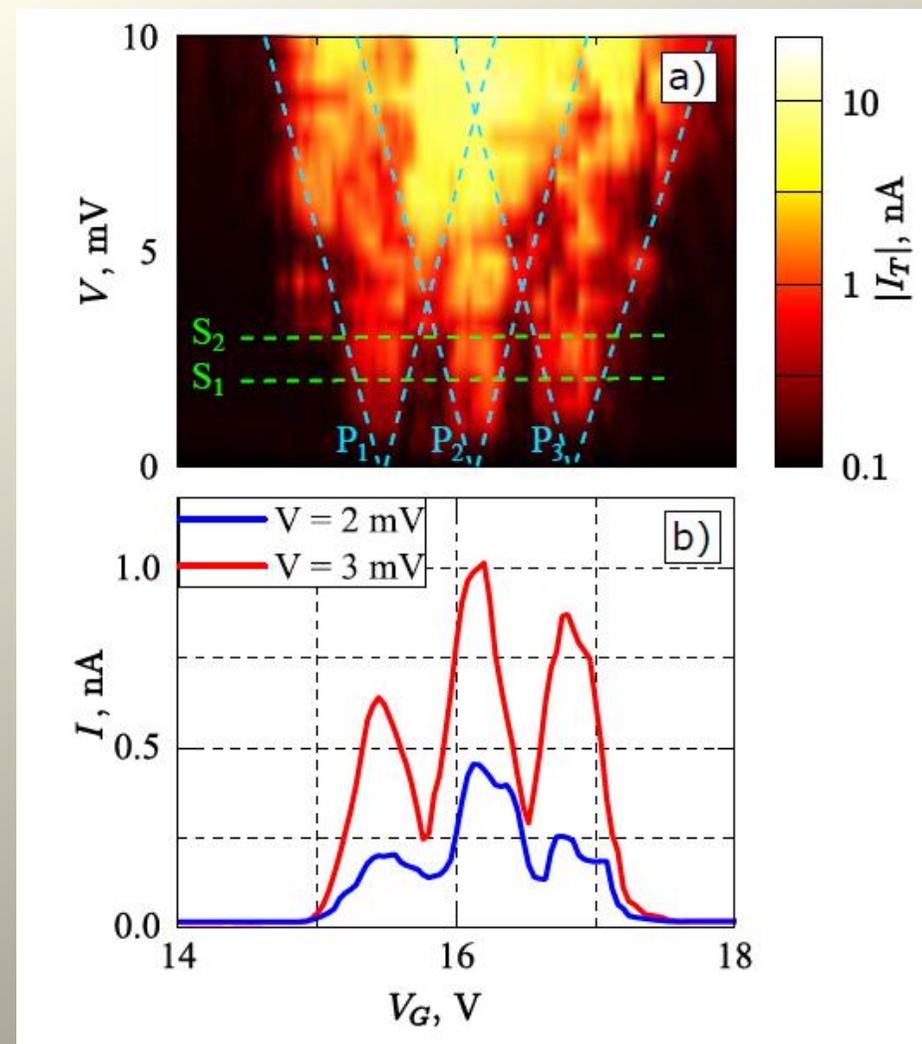
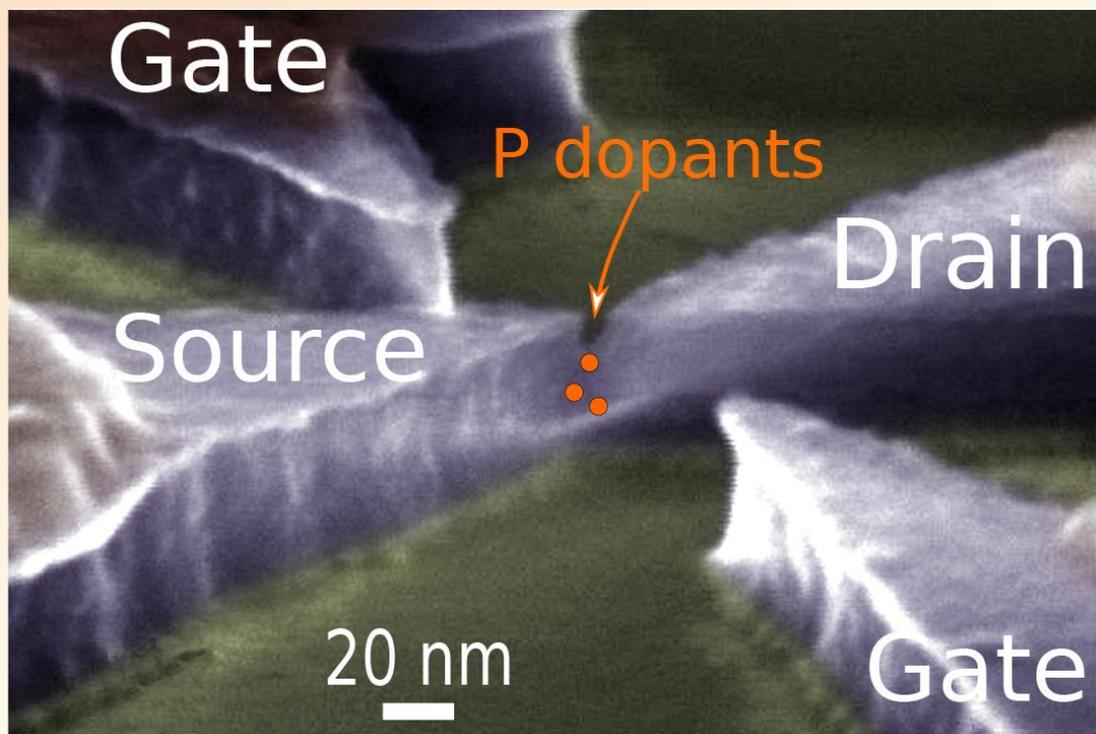
## Список рейтинговых публикаций коллабораторов



1. D.V. Averin, Yu.V. Nazarov, **Phys. Rev. Lett.**, 65, 2446 (1990),
2. D.V. Averin, A.N. Korotkov, K.K. Likharev, **Phys. Rev. B**, 44, 6199 (1991),
3. D.V. Averin, Yu.V. Nazarov, **Phys. Rev. Lett.**, 69, 1993 (1992),
4. D.V. Averin, C. Bruder, **Phys. Rev. Lett.**, 91, 057003 (2003),
5. Yu.A. Pashkin, T. Yamamoto, O. Astafiev, Y. Nakamura, D.V. Averin, J.S. Tsai, **Nature**, 421, 823 (2003),
6. O. Astafiev, K. Inomata, A. Niskanen, T. Yamamoto, Y. Nakamura, Yu.A. Pashkin, J.S. Tsai, **Nature**, 449, 588 (2007),
7. A.A. Abdumalikov, O. Astafiev, Y. Nakamura, Yu.A. Pashkin, J.S. Tsai, **Phys. Rev. B**, 78, 180502(R) (2008),
8. O. Astafiev, A.M. Zagoskin, A.A. Abdumalikov, Yu.A. Pashkin, T. Yamamoto, K. Inomata, Y. Nakamura, J.S. Tsai, **Science**, 327, 840 (2010),
9. A.A. Abdumalikov Jr., O. Astafiev, A.M. Zagoskin, Yu.A. Pashkin, Y. Nakamura, J.S. Tsai, **Phys. Rev. Lett.**, 104, 193601 (2010),
10. V.F. Maisi, O.-P. Saira, Yu.A. Pashkin, J.S. Tsai, D.V. Averin, J.P. Pekola, **Phys. Rev. Lett.**, 106, 217003 (2011),
11. O.V. Astafiev, L.B. Ioffe, S. Kafanov, Yu.A. Pashkin, K.Yu. Arutyunov, D. Shahar, O. Cohen, J.S. Tsai, **Nature**, 484, 355 (2012),
12. J.P. Pekola, O.-P. Saira, V.F. Maisi, A. Kemppinen, M. Möttönen, Yu.A. Pashkin, and D.V. Averin, **Rev. Mod. Phys.**, 85, 1421 (2013),
13. A. Guénault, A. Guthrie, R.P. Haley, S. Kafanov, Yu.A. Pashkin, G.R. Pickett, V. Tsepelin, D. Zmeev, E. Collin, O. Maillet, R. Gazizulin, **Phys. Rev. B**, 101, 060503(R) (2020),
14. S.M. Mills, D.V. Averin, Xu Du, **Phys. Rev. Lett.**, 125, 227701 (2020).



## Одноатомные одноэлектронные структуры на одиночных примесных атомах в кремнии

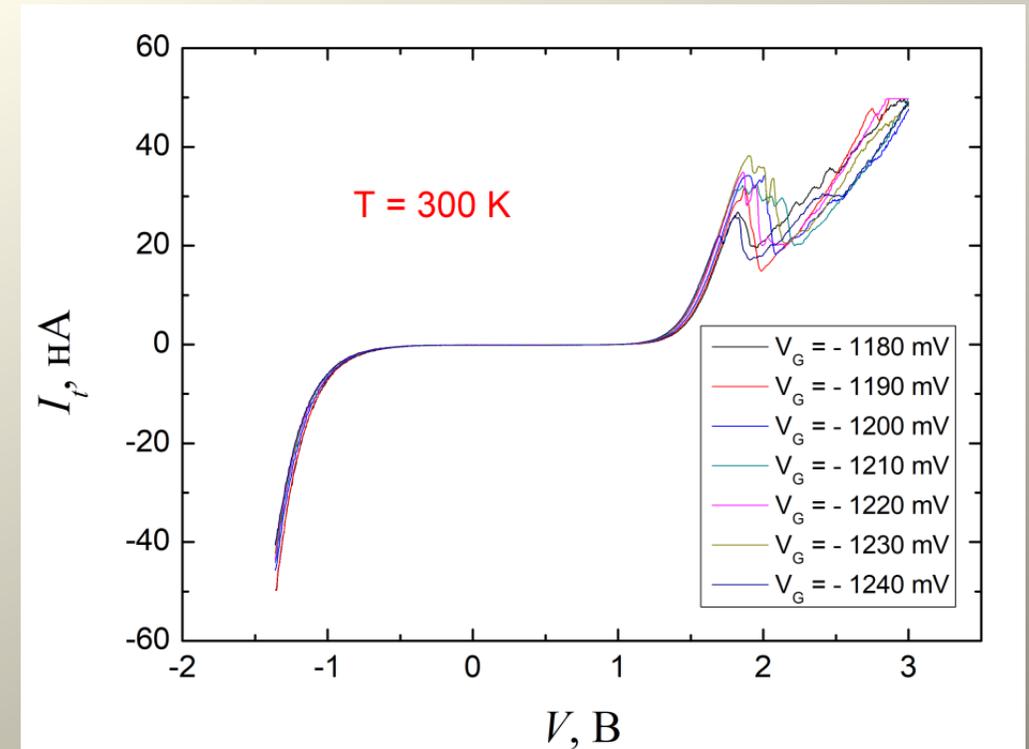
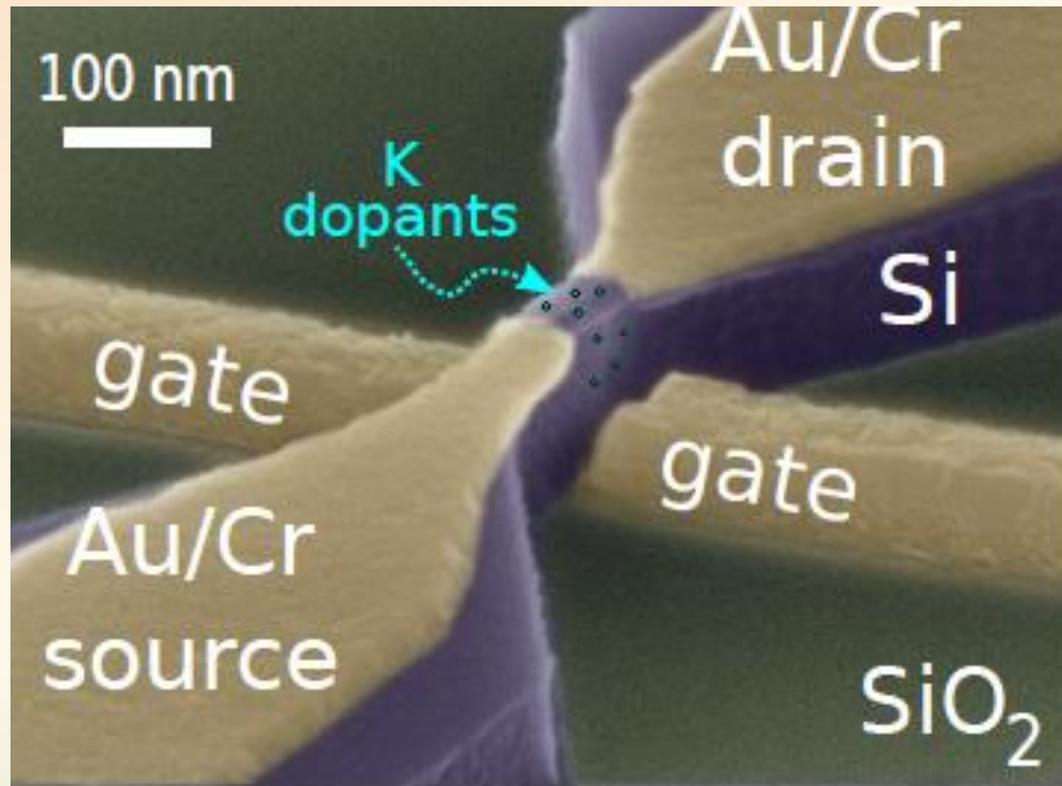


S.A. Dagesyan, V.V. Shorokhov, ... V.A. Krupenin, [Nanotechnology](#), **28**, 225304, (2017)

V.V. Shorokhov, D.E. Presnov, ... V.A. Krupenin, [Nanoscale](#), **9**, 613 (2017).



## Отрицательная дифференциальная проводимость в одноатомных устройствах при комнатной температуре



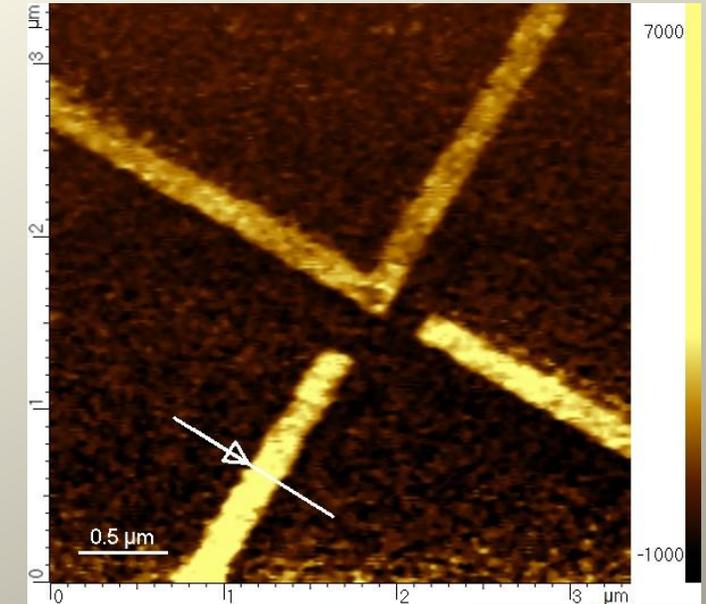
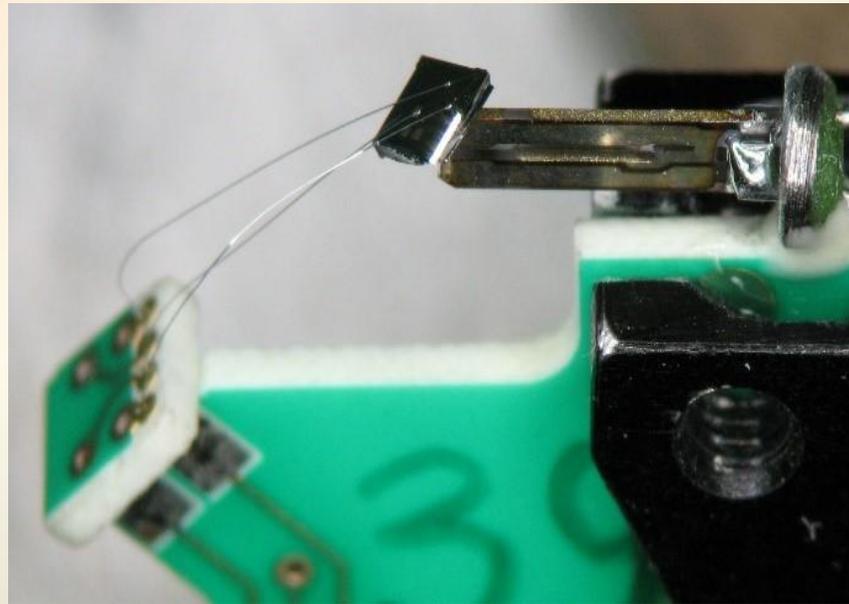
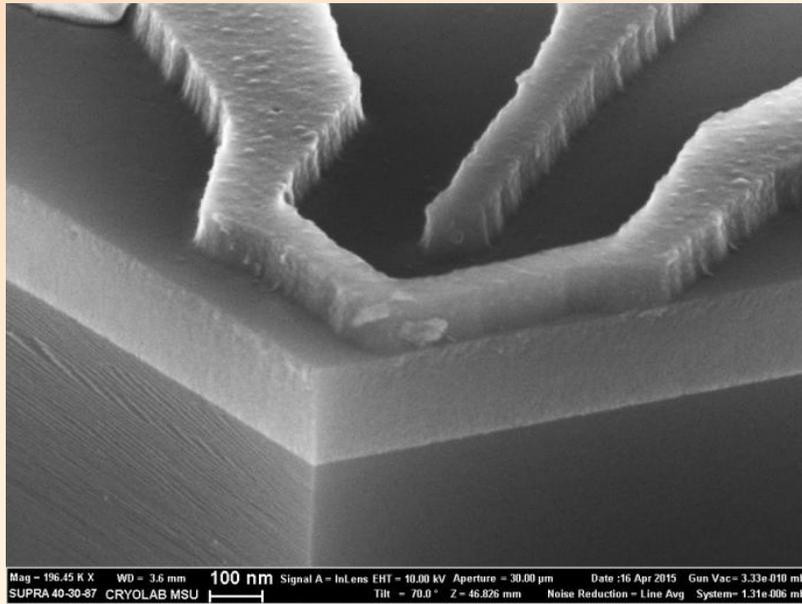
V.V. Shorokhov, S.A. Dagesyan, ...V.A. Krupenin, Submitted to [ACS Nano](#) (2022)

И.В. Божьев, Д.Е. Преснов, ... В.А. Крупенин,

[Патент РФ № RU 2 694 155](#)



## Локальный полевой зонд на основе кремниевого нанопровода



Высокая зарядовая чувствительность :  $0.1 e/\text{Гц}^{1/2}$ ,  $f = 10 \text{ Гц}$ .

Разрешение:

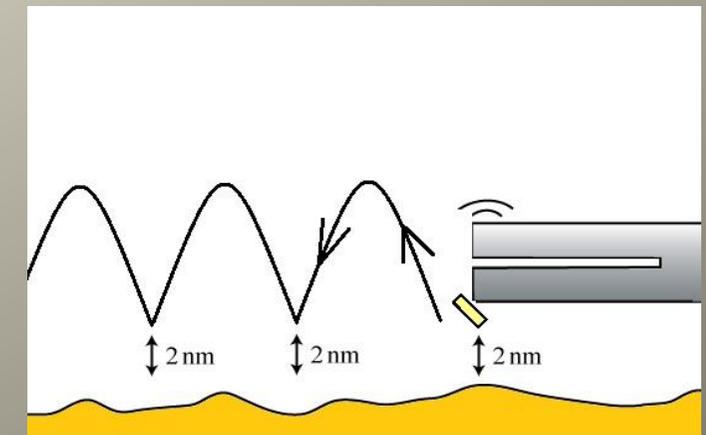
Пространственное (AFM) :  $d_{X,Y} \sim 10 \text{ nm}$ ,  $d_Z \sim 0.5 \text{ nm}$

Полевое :  $d_{X,Y} \sim 20 \text{ nm}$ ,  $d_U \sim 10 \text{ mV}$

A.S. Trifonov, D.E. Presnov, ... V.A. Krupenin, [Ultramicroscopy 179](#), 33-40 (2017)

D. E. Presnov, I.V. Vozhev,.... V. A. Krupenin, [J. Appl. Phys. 123](#), 5, 054503 (2018)

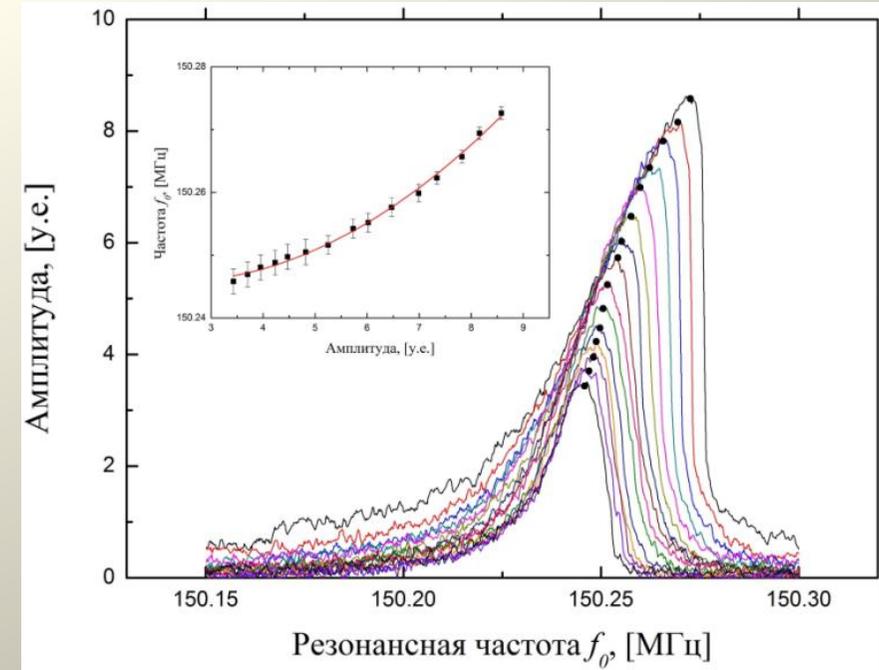
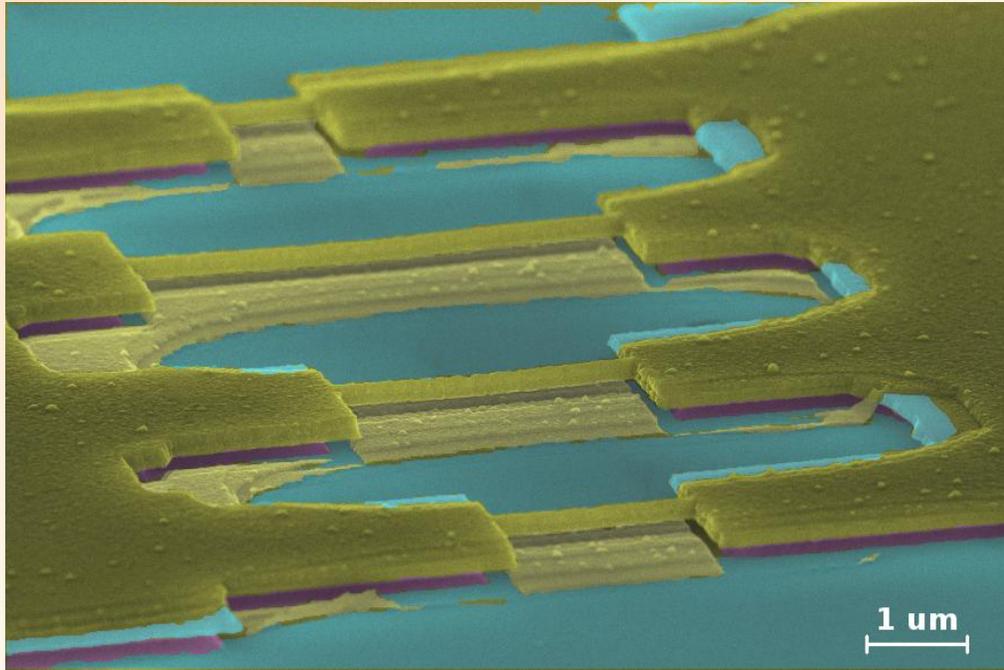
Д.Е. Преснов, И.В. Божьев, ... О.В. Снигирев, [Патент РФ № 2619811](#)





# Накопленный опыт

## Нанoeлектромеханические системы



Уникальная добротность:

$3.62 \times 10^4$

Резонансные частоты:

30 – 150 МГц

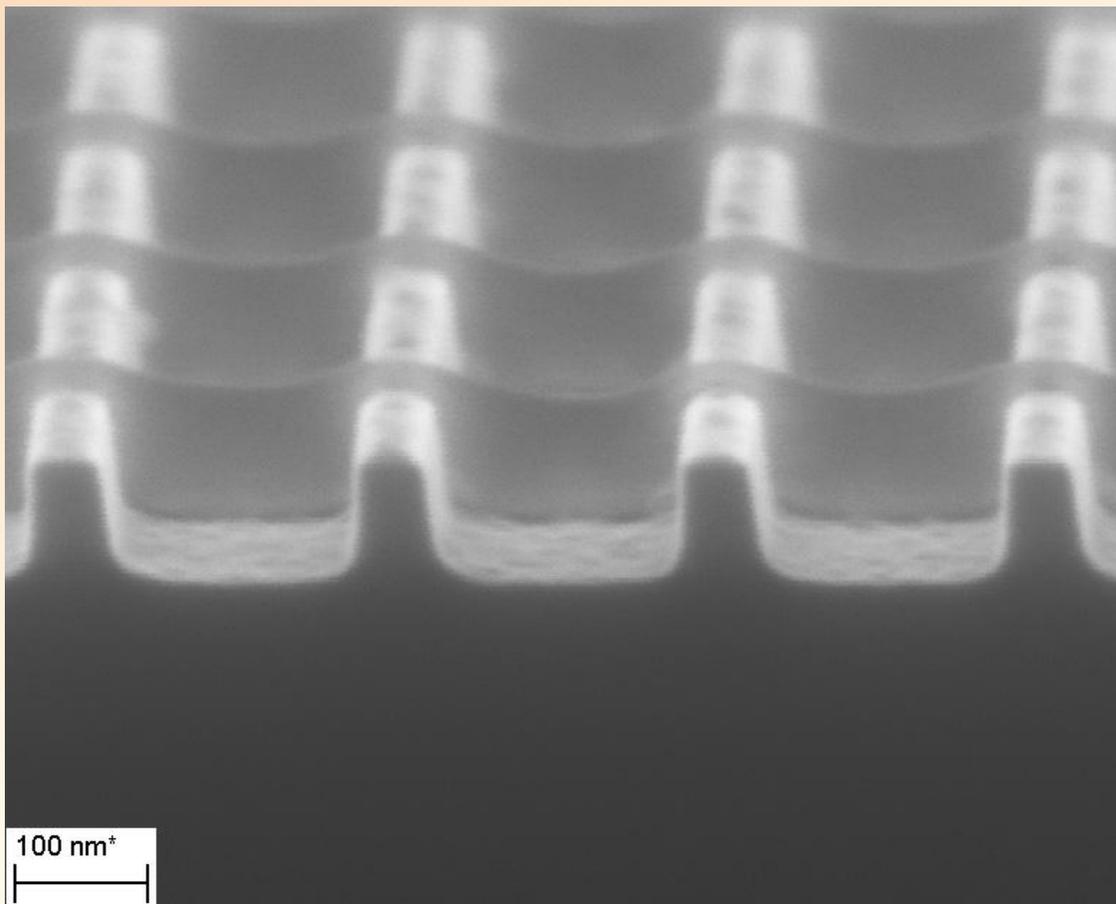
Чувствительность по массе:

$6 \times 10^{-20}$  г/Гц<sup>1/2</sup>,  $f = 10$  Гц

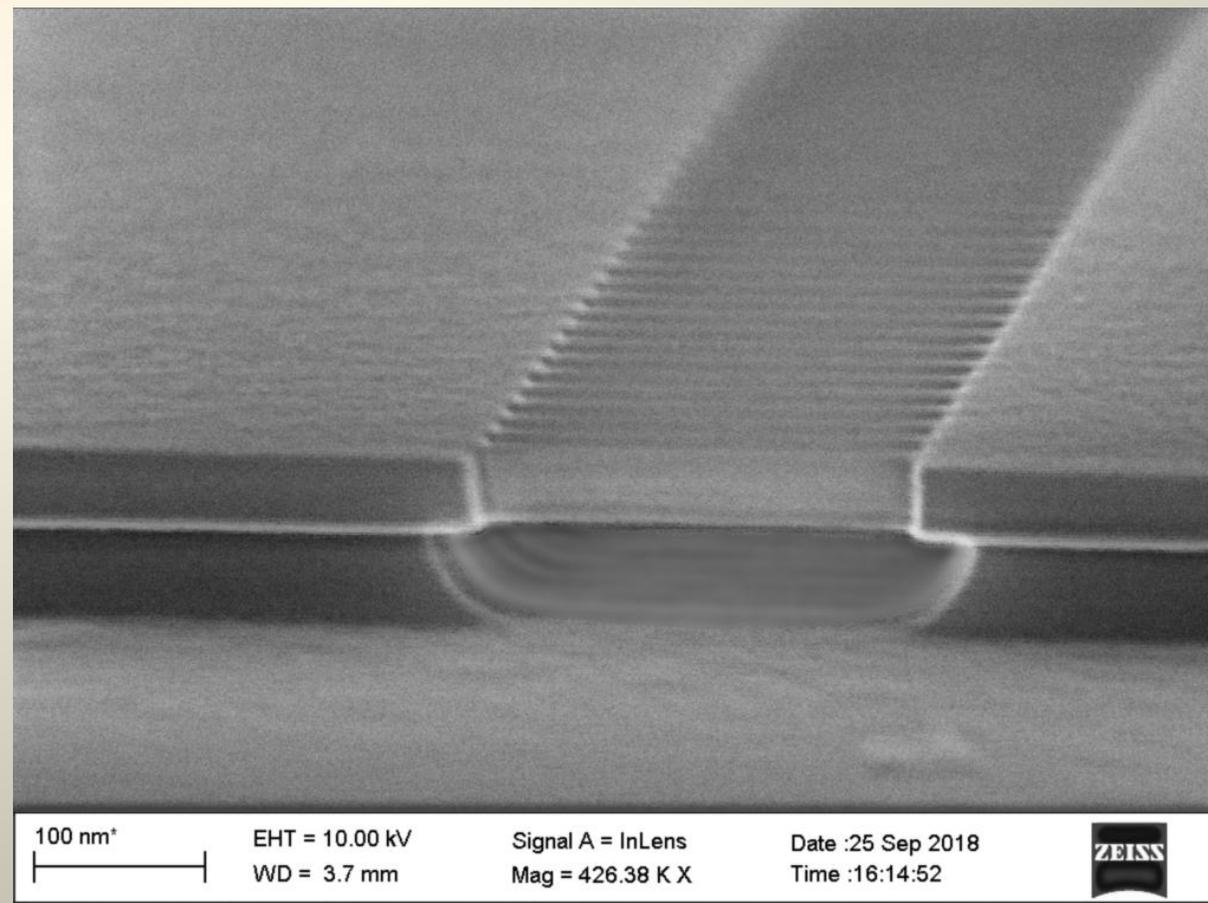
D. E. Presnov, S.Kafanov, ... V. A. Krupenin,  
A. Guthrie, S. Kafanov, ... D. Presnov,

[JETP Letters](#), 108(7), 492–497, (2018)

[Nature Communications](#), 12(1), 2645 (2021)



Электронная литография для многозатворного транзистора



Технология кремниевых Fin-структур 8 x 50 nm на SOI пластине



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**