

Механический резонанс в кремниевом нанопроводе с высокой добротностью

Д. Е. Преснов^{†*}, С. Г. Кафанов[×], А. А. Дорофеев[†], И. В. Божьев[†], А. С. Трифонов^{†*}, Ю. А. Пашкин^{×◦1)},
В. А. Крупенин^{†1)}

[†] Центр квантовых технологий, Физический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

^{*} НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

[×] Department of Physics, Lancaster University, Lancaster, LA1 4YB, United Kingdom

[◦] Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 10 августа 2018 г.

После переработки 6 сентября 2018 г.

В работе экспериментально исследованы резонансные свойства наномеханических резонаторов на основе закрепленных с двух концов кремниевых нанопроводов, изготовленных из кремния на изоляторе и покрытых тонкой пленкой алюминия. С помощью магнитодвижущего метода определены резонансные частоты основной моды при температуре 20 мК для нанопроводов различных размеров. Измеренные значения резонансных частот согласуются с оценкам, сделанными на основе теории Эйлера–Бернулли. Измеренная внутренняя добротность резонатора длиной 5 мкм, $3.62 \cdot 10^4$, превосходит значения добротности аналогичных резонаторов, исследованных при более высоких температурах. Представленные структуры могут быть использованы в качестве датчиков массы с чувствительностью $\sim 6 \cdot 10^{-20}$ г/Гц^{1/2}.

DOI: 10.1134/S0370274X1819013X

Введение. В последние годы, благодаря быстрому развитию технологий, наноэлектромеханические системы перешли в разряд широко исследуемых объектов фундаментальной и прикладной физики [1–4]. Различные микроэлектромеханические системы уже давно стали неотъемлемой частью нашей повседневной жизни. Подобные структуры присутствуют практически везде, будь то телефон или автомобиль, в виде различных микроразмерных акселерометров, гироскопов и т.п. Сегодня, когда электронные устройства уже используют свойства отдельных атомов и молекул [5–7], сфера применения наноэлектромеханических систем охватывает такие области, как сверхчувствительные измерения массы, вплоть до массы одиночных молекул [8, 9], силы [10], давления [11] и смещения [12, 13]. Связывая наномеханические резонаторы с оптическим и электронными преобразователями, стало возможным исследование квантовых эффектов [14–16]. Также механические резонаторы малых размеров являются эффективным инструментом в понимании свойств сверхтекучих жидкостей [17].

В основе работы наноэлектромеханических датчиков массы лежит явление механического резонан-

са, возникающее при возбуждении колебаний, например, в балках с субмикронным поперечным сечением, закрепленных с обоих концов. При этом, собственная частота колебаний резонатора зависит от его геометрии и материала, увеличиваясь с уменьшением размеров резонатора. В работе [18] показано, что добротность резонаторов определяется отношением площади поверхности к объему резонатора, а также качеством поверхности изготовленной структуры. Изменение массы резонатора приводит к сдвигу его резонансной частоты. Минимально детектируемое изменение массы определяется выражением [19]

$$\delta m = -2 \frac{0.735m}{f_0} \delta f_0, \quad (1)$$

где m – начальная масса нанопровода, δm – изменение массы, f_0 – резонансная частота и δf_0 – минимальный детектируемый сдвиг частоты, определяемый внутренними шумами резонатора и измерительной системы. Таким образом, для создания сверхчувствительных датчиков массы целесообразно уменьшать эффективную массу резонатора и увеличивать его резонансную частоту, одновременно повышая его добротность с целью разрешения как можно меньшего сдвига частоты. До настоящего времени рекордное

¹⁾ e-mail: y.pashkin@lancaster.ac.uk; krupenin@physics.msu.ru

значение добротности для кремниевых резонаторов с субмикронным сечением было $\sim 1.8 \cdot 10^4$ [20].

В последнее десятилетие для изготовления наноэлектромеханических систем из кремния все чаще используется кремний на изоляторе (КНИ) [21]. По своей структуре он представляет собой трехслойную пластину, у которой верхний тонкий слой монокристаллического кремния отделен от несущей подложки небольшой прослойкой оксида кремния. Такие пластины используются для изготовления полевых транзисторов с каналом-нанопроводом [22, 23], которые стали основой биосенсоров для детектирования молекул и вирусов [24], а также наноразмерных полевых зарядовых датчиков атомно-силовых микроскопов для мониторинга зарядовой динамики в различных структурах [25].

В настоящей работе представлена технология изготовления наномеханических резонаторов из кремния на изоляторе с использованием стандартных процессов микроэлектроники. Экспериментально определены основные параметры резонаторов, собственная резонансная частота и добротность. Исследована динамика резонаторов в линейном и нелинейном режимах.

Колебательные свойства нанопровода. Конструкция наиболее распространенных типов наномеханических резонаторов основана на подвешенной балке, закрепленной на одном или обоих концах. Такие резонаторы имеют различные колебательные моды изгиба, скручивания, деформации и др. Моды изгиба являются наиболее интересными, поскольку обеспечивают максимальный отклик на внешнее воздействие. Их проще возбуждать и детектировать, преобразуя механические колебания в электрический сигнал. Как показано в [26], динамика колебаний закрепленной с двух концов подвешенной балки в общем случае описывается теорией Эйлера–Бернулли и хорошо аппроксимируется движением простого гармонического осциллятора с малым затуханием. Для основной моды уравнение движения середины балки под воздействием внешней силы имеет следующий вид:

$$\ddot{x} + \gamma \dot{x} + \omega_0^2 x = f(t), \quad (2)$$

где x – отклонение середины нанопровода от положения равновесия (в отсутствие внешней силы), γ – постоянная затухания резонатора, $\omega_0 = 2\pi f_0$ – угловая резонансная частота, $f(t)$ – приведенная внешняя сила.

В случае колебаний параллельно плоскости подложки резонансная частота основной изгибной моды определяется следующим выражением [26]:

$$f_0 = 1.03 \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{w}{L^2}, \quad (3)$$

где E и ρ – модуль Юнга и плотность материала балки, а w и L – ширина и длина подвешенной балки. Данная формула справедлива в отсутствие натяжения балки, которое, в принципе, может возникать при охлаждении образца вследствие неодинаковости коэффициентов теплового расширения используемых материалов.

Линейный режим резонатора сохраняется при малых механических смещениях, однако в случае увеличения раскачивающей внешней силы он может переходить в нелинейный режим, что учитывается добавлением члена $\propto x^3$ в левую часть уравнения (2). При этом амплитудно-частотная характеристика становится несимметричной [27–30]. В зависимости от конструкции системы резонансная частота может увеличиваться (резонатор становится “жестче”) или уменьшаться (резонатор становится “мягче”), что учитывается знаком при кубичном члене. Резонатор становится нелинейной колебательной системой при амплитудах колебаний, превышающих критическую a_c , определяемую выражением [27]:

$$a_c = 2f_0 \frac{L^2}{\pi} \sqrt{\frac{\rho\sqrt{3}}{EQ}}, \quad (4)$$

где Q – добротность резонатора.

Для исследования подобных резонаторов часто используется магнитодвижущий метод [20, 31], суть которого состоит в следующем: резонатор помещается в постоянное однородное магнитное поле, направленное перпендикулярно основной оси нанопровода (плоскости подложки), через который пропускается высокочастотный (ВЧ) переменный ток. В результате, под действием силы Лоренца, нанопровод начинает изгибаться перпендикулярно направлению магнитного поля и направлению протекания тока. Частотная зависимость коэффициента прохождения ВЧ сигнала позволяет определить резонансные частоты системы. Таким методом можно детектировать только нечетные моды, поскольку вследствие симметрии детектирования четных мод не происходит. Максимальную амплитуду смещения и максимальный измеряемый отклик имеет основная изгибная мода колебаний, соответствующая половине длины волны колебаний.

Методика изготовления образцов. Для изготовления образцов использовались стандартные пластины КНИ с толщиной верхнего слоя кремния 110 нм, отделенного от несущей кремниевой подложки слоем оксида кремния толщиной 200 нм. Процесс изготовления аналогичен тому, что используется для изготовления датчиков на основе полевых транзисторов с каналом-нанопроводом [22, 23, 25] и включал три этапа электронной литографии с применением позитивного резиста, а также реактивного ионного и жидкостного травлений. Основные этапы изготовления показаны на рис. 1.

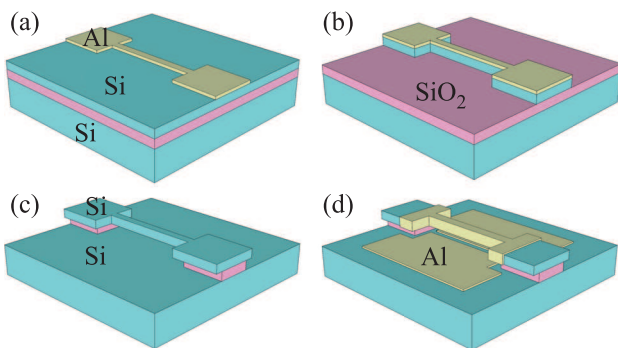


Рис. 1. (Цветной онлайн) Стадии изготовления кремниевых наномеханических резонаторов: (а) – алюминиевая маска, сформированная на пластине КНИ; (б) – структура нанопровода в верхнем слое кремния после реактивного ионного травления; (с) – подвешенная структура нанопровода после удаления слоя оксида кремния; (д) – итоговая структура после металлизации алюминием толщиной 20 нм

При изготовлении образца, на чипе формировались четыре резонансные структуры, соединенные параллельно. Такой подход дает возможность измерять все резонаторы в одном эксперименте, поскольку резонаторы не влияют друг на друга вследствие значительного различия их резонансных частот. Недостатком такой конфигурации является тот факт, что поступающий ВЧ ток распределяется между всеми резонаторами, что не позволяет оценить величину раскачивающей силы. Изображение готовых резонаторов длиной 1, 2, 3 и 5 мкм, полученное в сканирующем электронном микроскопе, представлено на рис. 2.

Экспериментальные результаты и обсуждение. Резонансные характеристики изготовленных структур исследовались в вакууме, в магнитных полях до 5 Тл при температуре 20 мК и в частотном диапазоне до 500 МГц с полосой измерения 200 Гц. ВЧ сигнал от векторного анализатора электрических цепей ослаблялся аттенуаторами, термализованны-

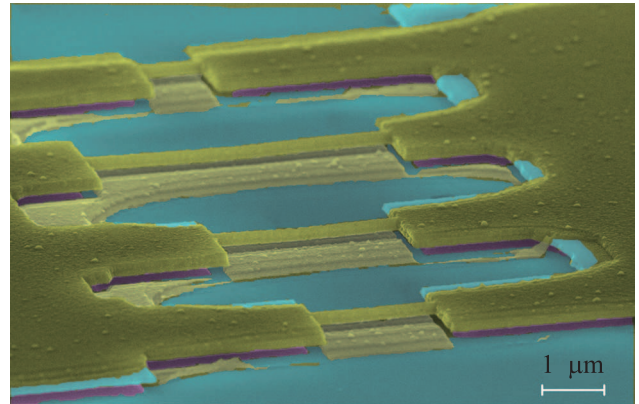


Рис. 2. (Цветной онлайн) Изображение структуры из 4 нанопроводов в сканирующем электронном микроскопе, раскрашенное в различные цвета. Голубым цветом обозначена кремниевая поддерживающая подложка; малиновым – изолирующий слой оксида кремния; светло-желтым – кремниевые нанопровода и подводящие электроды, покрытые слоем алюминия, а также паразитные тени на подложке, образовавшиеся после напыления алюминия под тремя углами. Оценочные значения размеров резонаторов составили (длина × ширина): 5 мкм × 115 нм, 3 мкм × 90 нм, 2 мкм × 85 нм, 1 мкм × 80 нм

ми при криогенных температурах, с общим ослаблением 35 дБ и подавался на структуру. Прошедший сигнал усиливался на 40 дБ при комнатной температуре и детектировался. Значения мощности, указанные в статье, соответствуют мощности, прикладываемой на измеряемую структуру. Форма частотной характеристики коэффициента прохождения сигнала обусловлена наведением отрицательной электродвижущей силы при движении проводника в магнитном поле, имеет характерный минимум на резонансной частоте (рис. 3), симметрия которого говорит о линейном режиме резонатора при малой раскачивающей силе. Аппроксимацией экспериментальных данных распределением Лоренца определяется резонансная частота и добротность резонатора. Измеренные значения резонансных частот для нанопроводов с длиной 5, 3 и 2 мкм оказались равными 32.46, 71.99 и 150.25 МГц, соответственно, что совпадает в пределах ошибки 2% с теоретическими оценками, полученными из формулы (3). Оценочные значения резонансной частоты для 1 мкм нанопровода находится вне измеряемого частотного диапазона.

Минимально детектируемый частотный шум $\sim 8 \text{ Гц}/\text{Гц}^{1/2}$ определяется из величины флуктуаций коэффициента прохождения $10^{-3} \text{ у.е.}/\text{Гц}^{1/2}$ и максимальной крутизны резонансного склона $125 \cdot 10^{-6} \text{ у.е.}/\text{Гц}$. Проведенные измерения поз-

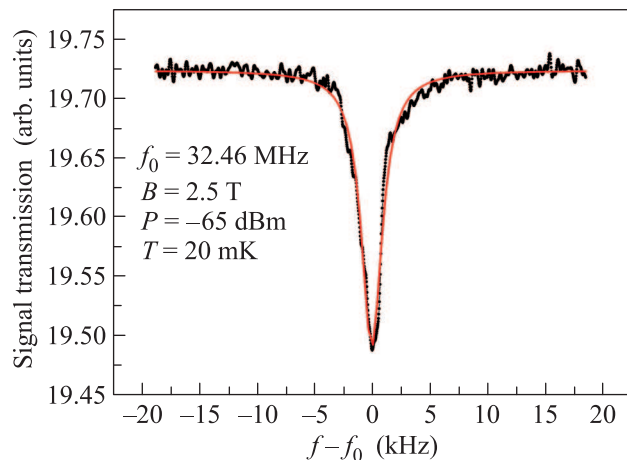


Рис. 3. (Цветной онлайн) Зависимость коэффициента прохождения ВЧ сигнала от частоты для подвешенного 5 мкм нанопровода и аппроксимация экспериментальных данных распределением Лоренца

воляют оценить предельную чувствительность и диапазон измеряемых масс для детекторов на основе представленных резонаторов. Масса резонатора $\sim 1.2 \cdot 10^{-13}$ г оценивается из его геометрических размеров. Используя формулу (1), определяется предельная чувствительность по массе в линейном режиме: $\sim 6 \cdot 10^{-20}$ г/Гц $^{1/2}$ (в полосе 200 Гц), что сравнимо со значениями массовой чувствительности, полученных другими группами [19]. При этом минимальная детектируемая масса составляет $\sim 8.5 \cdot 10^{-19}$ г, что соответствует, например, шарикку кремния радиусом 4.4 нм. В случае работы датчика в нелинейном режиме его массовая чувствительность может быть значительно улучшена [32].

Как показано в [33], при возбуждении механического резонатора магнитодвижущим методом в линейном режиме амплитуда смещения пропорциональна квадрату магнитного поля и амплитуде протекающего ВЧ тока, $I \propto P^{1/2}$, где P – мощность ВЧ сигнала. Рисунок 4а показывает зависимость амплитуды колебаний 5 мкм резонатора от квадрата величины магнитной индукции B . В магнитных полях до 3.5 Тл экспериментальные данные хорошо аппроксимируются ожидаемой линейной зависимостью амплитуды механических колебаний от величины магнитной индукции. При увеличении магнитного поля выше 3.5 Тл резонатор начинает переходить в нелинейный режим и рост амплитуды с полем замедляется.

Ширина резонансного отклика Δf определяется потерями как в самом резонаторе – внутренние потери, так и в измерительной системе – внешние поте-

ри. При сильных магнитных полях основными являются магнитодвижущие потери, пропорциональные квадрату магнитного поля, $Q^{-1} \propto \Delta f \propto B^2$. Измеренная добротность увеличивается с $6 \cdot 10^3$ при 5 Тл до примерно $2.95 \cdot 10^4$ при 0.5 Тл. Экспериментальная зависимость Q^{-1} от квадрата величины магнитной индукции представлена на рис. 4б. Линейность

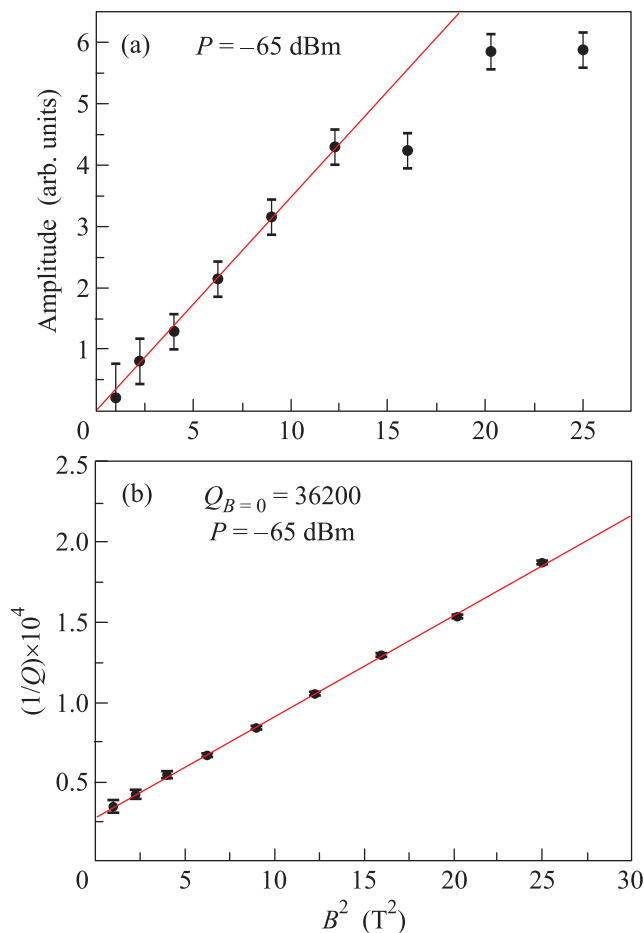


Рис. 4. (Цветной онлайн) (а) – Зависимость амплитуды колебаний 5 мкм резонатора от квадрата напряженности магнитного поля и ее линейная аппроксимация (прямая). (б) – Зависимость обратной добротности резонатора от квадрата напряженности магнитного поля и ее линейная аппроксимация

этой зависимости говорит о доминировании магнитодвижущих потерь над внутренними. Такая зависимость сохраняется во всем исследуемом диапазоне магнитных полей. Внутренняя добротность резонатора оценивается в $3.62 \cdot 10^4$ экстраполяцией в нулевое магнитное поле. Такая величина добротности превышает значения, полученные ранее в структурах, изготовленных из кремния на изоляторе [34], и сравнима с величинами в аналогичных структурах,

изготовленных из кремния [35, 36], кремния, покрытого алюминием [37] и алмаза [38]. Как было экспериментально показано в [35, 37, 38], потери в резонаторах (величина, обратная добротности) уменьшаются с уменьшением температуры при температурах меньше 1 К. В наших экспериментах измерения температурной зависимости добротности не проводились, однако очевидно, что важным фактором высокой добротности является низкая температура. Как видно из опубликованных данных, увеличение добротности с уменьшением температуры носит универсальный характер, но природа такой зависимости, несмотря на многочисленные эксперименты, пока не изучена. Построение достоверной физической модели, описывающей потери в таких системах при низких температурах является на данный момент предметом научного поиска.

На рисунке 5 представлена зависимость амплитуды механических колебаний от квадратного корня из мощности приложенного ВЧ сигнала. Вставка к рис. 5 показывает, что при малых мощностях ампли-

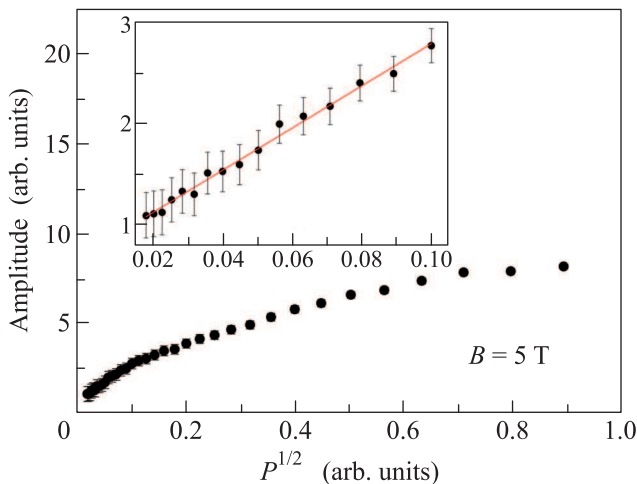


Рис. 5. (Цветной онлайн) Зависимость амплитуды колебаний 2 мкм резонатора от квадратного корня из входной мощности. На вставке показан линейный участок всей зависимости при малых мощностях ВЧ сигнала до 0.1 у. е. Прямая – линейная аппроксимация экспериментальных данных

туда колебаний пропорциональна раскачивающей силе и динамика резонатора описывается линейным уравнением гармонического осциллятора (2). Более медленный рост амплитуды колебаний при увеличении раскачивающей силы ($P^{1/2} > 0.1$ у. е.) говорит о том, что резонатор становится более “жестким”. Это также сказывается на форме отклика, который изгибается в сторону более высоких частот (рис. 6). Легко показать, что добавление кубического члена $\propto x^3$ в

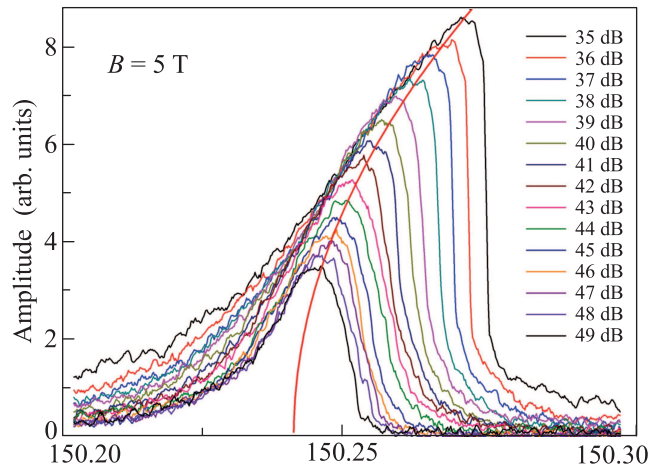


Рис. 6. (Цветной онлайн) Семейство амплитудно-частотных характеристик 2 мкм резонатора при больших мощностях накачки. При увеличении мощности ВЧ сигнала резонатор становится более “жестким”. Резонансная частота увеличивается с ростом амплитуды колебаний резонатора. Положение максимумов резонансных кривых аппроксимируется параболой, из которой определяется частота колебаний резонатора в линейном режиме

уравнение (2) приводит к квадратичной зависимости резонансной частоты от амплитуды механического смещения [27], что и наблюдается в эксперименте. Переход в нелинейный режим соответствует критической амплитуде $a_c \sim 0.9$ нм, вычисленной из формулы (4), что дает возможность найти наибольшую амплитуду колебаний резонатора при максимальной мощности накачки ~ 2.5 нм [28].

Заключение. В настоящей работе представлены результаты исследования резонансных свойств кремниевых нанопроводов, закрепленных с обоих концов. Измерения, проведенные с помощью магнитодвижущего метода позволили определить собственные резонансные частоты основной изгибной моды нанопроводов, оказавшиеся в диапазоне 30–150 МГц. Внутренняя добротность резонатора длиной 5 мкм составила $3.62 \cdot 10^4$, что является рекордным для резонаторов из кремния на изоляторе аналогичных размеров. Измеренные в ходе эксперимента значения резонансной частоты хорошо согласуются с оценками из теории Эйлера–Бернулли, а динамика резонаторов качественно описывается динамикой простого гармонического осциллятора с малой диссипацией и нелинейностью под воздействием внешней раскачивающей силы. Разработанный метод изготовления резонансных структур с применением стандартной кремниевой технологии может быть использован для создания высокочувствительных датчиков мас-

сы, силы и смещения. Оценена чувствительность по массе $\sim 6 \cdot 10^{-20}$ г/Гц^{1/2} для подвешенного нанопровода длиной 5 мкм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант Российского фонда фундаментальных исследований офи-м # 16-29-03266) и Британского Королевского общества (грант IEC\R3\170029). Использовались оборудование Учебно-методического центра литографии и микрокопии МГУ им. М.В. Ломоносова.

1. K. L. Ekinici and M. L. Roukes, *Rev. Sci. Instrum.* **76**, 061101 (2005); <https://doi.org/10.1063/1.1927327>.
2. W.-M. Zhang, K.-M. Hu, Z.K. Peng, and G. Meng, *Sensors* **15**, 26478 (2015); <https://doi.org/10.3390/s151026478>.
3. B. Arash, J.-W. Jiang, and T. Rabczuk, *Appl. Phys. Rev.* **2**, 021301 (2015); <https://doi.org/10.1063/1.4916728>.
4. Я. С. Гринберг, Ю. А. Пашкин, Е. В. Ильичев, *УФН* **182**(4), 407 (2012). <https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201204c.0407>.
5. V. V. Shorokhov, D. E. Presnov, S. V. Amitonov, Yu. A. Pashkin, and V. A. Krupenin, *Nanoscale* **9**(2), 613 (2017). <https://doi.org/10.1039/C6NR07258E>.
6. G. Lovat, B. Choi, D. W. Paley, M. L. Steigerwald, L. Venkataraman, and X. Roy, *Nat. Nanotechnology* **12**(2), 1050 (2017); <https://doi.org/10.1038/nnano.2017.156>.
7. Е. С. Солдатов, В. В. Ханин, А. С. Трифонов, С. П. Губин, В. В. Колесов, Д. Е. Преснов, С. А. Яковенко, Г. Б. Хомутов, А. Н. Коротков, *УФН* **168**(2), 217 (1998); <https://doi.org/10.3367/UFNr.0168.199802ab.0217>.
8. S. T. Bartsch, M. Arp, and A. M. Ionescu, *IEEE Journal of the Electron Devices Society* **2**(2), 8 (2014); <https://doi.org/10.1109/JEDS.2013.2295246>.
9. B. Ilic, Y. Yang, and H. G. Craighead, *Appl. Phys. Lett.* **85**(13), 2604 (2004); <https://doi.org/10.1063/1.1794378>.
10. H. Mamin and D. Rugar, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 3358 (2001); <https://doi.org/10.1063/1.1418256>.
11. X. Zhao, J. M. Tsai, H. Cai, X. M. Ji, J. Zhou, M. H. Bao, Y. P. Huang, D. L. Kwong, and A. Q. Liu, *Opt. Express* **20**(8), 8535 (2012); <https://doi.org/10.1364/OE.20.008535>.
12. R. G. Knobel and A. N. Cleland, *Nature* **424**, 291 (2003); <https://doi.org/10.1038/nature01773>.
13. A. A. Shevyrin, A. G. Pogosov, M. V. Budantsev, A. K. Bakarov, A. I. Toropov, E. E. Rodyakina, and A. A. Shklyaev, *Appl. Phys. Lett.* **106**, 183110 (2015). <https://doi.org/10.1063/1.4920932>.
14. A. Naik, O. Vu, M. D. LaHaye, A. D. Armour, A. A. Clerk, M. P. Blencowe, and K. C. Schwab, *Nature* **443**, 193 (2006); <https://www.nature.com/articles/nature05027>.
15. J. Teufel, T. Donner, D. Li, J. W. Harlow, M. S. Allman, K. Cicak, A. J. Sirois, J. D. Wittaker, K. W. Lehnert, and R. W. Simmonds, *Nature* **475**, 359 (2011); <https://www.nature.com/articles/nature10261>.
16. K. Harrabi, Yu. A. Pashkin, O. V. Astafiev, S. Kafanov, T. F. Li, and J. S. Tsai, *Appl. Phys. A* **108**(1), 7 (2012); <https://doi.org/10.1007/s00339-012-6981-8>.
17. D. I. Bradley, R. George, A. M. Guénault, R. P. Haley, S. Kafanov, M. T. Noble, Yu. A. Pashkin, G. R. Pickett, M. Poole, J. R. Prance, M. Sarsby, R. Schanen, V. Tsepelin, T. Wilcox, and D. E. Zmееv, *Sci. Rep.* **7**, 4876 (2017); <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04842-y>.
18. D. W. Carr, S. Evoy, L. Sekaric, H. G. Craighead, and J. M. Parpia, *Appl. Phys. Lett.* **75**(7), 920 (1999); <https://doi.org/10.1063/1.124554>.
19. K. L. Ekinici, X. M. H. Huang, and M. L. Roukes, *Appl. Phys. Lett.* **84**(22), 4469 (2004); <https://doi.org/10.1063/1.1755417>.
20. A. N. Cleland and M. L. Roukes, *Appl. Phys. Lett.* **69**(18), 2653 (1996); <https://doi.org/10.1063/1.117548>.
21. K. Mori, in: *Silicon-On-Insulator (SOI) Technology*, Woodhead Publishing, Singapore (2014), ch. 14, p. 435; <https://doi.org/10.1533/9780857099259.2.435>.
22. D. E. Presnov, S. V. Amitonov, P. A. Krutitskii, V. V. Kolybasova, I. A. Devyatov, V. A. Krupenin, and I. I. Soloviev, *Beilstein J. Nanotechnol.* **4**, 330 (2013); <https://doi.org/10.3762/bjnano.4.38>.
23. Д. Е. Преснов, С. В. Амитоноу, В. А. Крупенин, *Микроэлектроника* **41**(5), 364 (2012); <https://elibrary.ru/item.asp?id=17858902>.
24. M. Rubtsova, G. Presnova, D. Presnov, V. Krupenin, V. Grigorenko, and A. Egorov, *Biosensors 2016, Procedia Technology* **27**, 234 (2017); <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2017.04.099>.
25. A. S. Trifonov, D. E. Presnov, I. V. Bozhev, D. A. Evplov, V. Desmaris, and V. A. Krupenin, *Ultramicroscopy* **179**, 33 (2017); <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2017.03.030>.
26. A. N. Cleland, in: *Foundations of nanomechanics*, Springer, Berlin (2003); <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05287-7>.
27. A. H. Nayfeh and D. T. Mook, in: *Nonlinear Oscillations*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, KGaA (2007); <https://doi.org/10.1002/9783527617586>.
28. H. W. Ch. Postma, I. Kozinsky, A. Husain, and M. L. Roukes, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 223105 (2005); <https://doi.org/10.1063/1.1929098>.
29. F. Tajaddodianfar, M. R. H. Yazdi, and H. N. Pishkenari, *Microsyst. Technol.* **23**, 1913 (2017); <https://doi.org/10.1007/s00542-016-2947-7>.

30. L. Laurent, J. J. Yon, J. S. Moulet, P. Imperinetti, and L. Duraffourg, *Sensors and Actuators A: Phys.* **263**, 326 (2017); <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.06.027>.
31. T. F. Li, Yu. A. Pashkin, O. Astafiev, Y. Nakamura, and J. S. Tsai, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 043112 (2008); <https://doi.org/10.1063/1.2838749>.
32. E. Buks and B. Yurke, *Phys. Rev. E* **74**, 046619 (2017); <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.74.046619>.
33. A. N. Cleland and M. L. Roukes, *Sensors and Actuators* **72**(3), 256 (1999); [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(98\)00222-2](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(98)00222-2).
34. L. Yu, H. Pajouhi, M. R. Nelis, J. F. Rhoads, and S. Mohammadi, *IEEE Transactions on Nanotechnology* **11**(1), 1093 (2012); <https://doi.org/10.1109/TNANO.2012.2212028>.
35. G. Zolfagharkhani, A. Gaidarzhy, S. Shim, R. L. Badzey, and P. Mohanty, *Phys. Rev. B* **72**, 224101 (2005); <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.224101>.
36. J. Sulkko, M. Sillanpää, P. Häkkinen, L. Lechner, M. Helle, A. Fefferman, J. Parpia, and P. Hakonen, *NanoLetters* **10**, 4884 (2010); <https://doi.org/10.1021/nl102771p>.
37. F. Hoehne, Yu. A. Pashkin, O. Astafiev, L. Faoro, L. B. Ioffe, Y. Nakamura, and J. S. Tsai, *Phys. Rev. B* **81**, 184112 (2010); <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.81.184112>.
38. M. Imboden and P. Mohanty, *Phys. Rev. B* **79**, 125424 (2009); <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.125424>.