

ISSN: 2782-5515



# Перст

Информационный бюллетень

перспективные технологии  
наноструктуры сверхпроводники фуллерены

Том 30, выпуск 3

март 2023 г.



*Space/smotrim.ru*

Черноголовка

## ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

### *Фуллерены и нанотрубки в космосе*

Фуллерены  $C_{60}$  и  $C_{70}$  впервые были обнаружены в нескольких туманностях в 2010 г. с помощью космического телескопа *Spitzer*. Позже, проанализировав полученные телескопом ИК-спектры, исследователи представили свидетельства существования в космосе фуллеренов в твердой фазе (подробнее см. Перст [1]). Теперь уже нет сомнений, что фуллерены образуются в самых разных астрофизических условиях. Остается вопрос, как атомы углерода с  $sp^2$ -гибридизацией объединяются в стабильные наноструктуры в межзвездной среде, богатой водородом и другими элементами. Процесс “bottom-up” маловероятен: слишком много времени потребуется, чтобы построить молекулы из 60 или 70 атомов углерода при межзвездной плотности и температурах. “Top-down” синтез из полициклических ароматических углеводородов может быть осуществлен в лабораторных условиях, но сложно представить, как происходят в космосе сложные стадии удаления водорода и перестройки структуры. Ученые из Univ. of Arizona (США) [2], предложили гипотезу, суть которой в том, что фуллерены и нанотрубки могут формироваться при нагреве досолнечных, или межзвездных, зёрен кубического SiC, которые образовались в оболочках умирающих звезд, богатых углеродом. Такие “древние” зёрна SiC были обнаружены и в метеоритах.

Исследователи провели эксперименты с наночастицами SiC кубической структуры, аналогом межзвездных зёрен. Наночастицы размером 45-65 нм быстро нагрели до температуры  $1050^\circ\text{C}$  и выдержали при этой температуре в течение 3 часов. Затем их охладили до комнатной температуры. Исследования с помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения проводили *in situ*.

По мере приближения температуры нагрева к  $\sim 1000^\circ\text{C}$  авторы [2] наблюдали начало термического разложения SiC. Давление паров кремния больше давления паров углерода, и Si атомы вылетали с поверхности кристалла SiC, оставляя слои графена. Кривизна поверхности наночастиц способствовала искажению структуры графена, и при повышении температуры до  $1050^\circ\text{C}$  на поверхности зёрен появились полусферические структуры размером  $\sim 1$  нм (примерно как  $C_{60}$ ). Уже через несколько минут эти структуры преобразовались в многостенные углеродные нанотрубки (МСНТ) 3-4 нм в длину и 3-4 нм в ширину, т.е. крупнее, чем фуллерен  $C_{60}$  (рис. 1).

И далее ...

## НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

3 Теплопроводность  
кремниевых полипризматов

4 Особенности резонансного  
туннелирования в нано-  
структурах со спейсерами

## СПИНТРОНИКА

6 Связанные маятники  
на магнитный лад

## СНОВА К ОСНОВАМ

7 Не просто доплеровское  
уширение: новый эффект,  
связанный с движением  
молекул в газе

## КОНФЕРЕНЦИИ

9 Третья Международная  
конференция  
“Физика конденсированных  
состояний” (ФКС-2023),  
посвященная 60-летию  
ИФТТ им. Ю.А. Осипяна  
РАН, с 29 мая по 3 июня  
2023 года, г. Черноголовка,  
Россия

Самые большие МСНТ состояли из более чем 4 слоев с расстоянием 0.36 нм между ними.

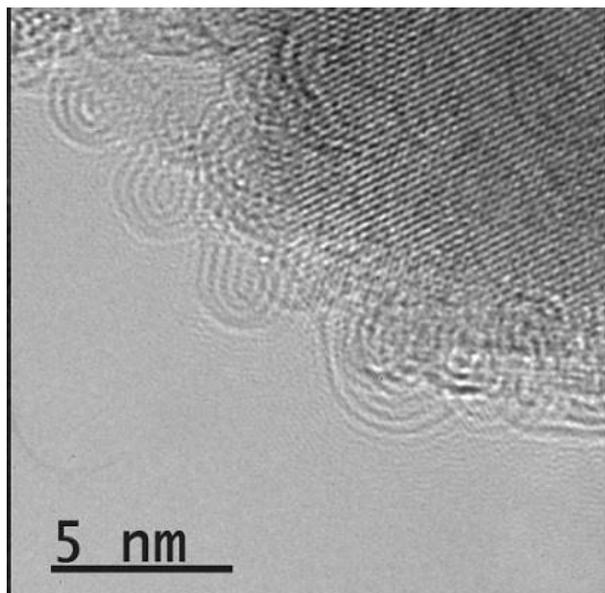
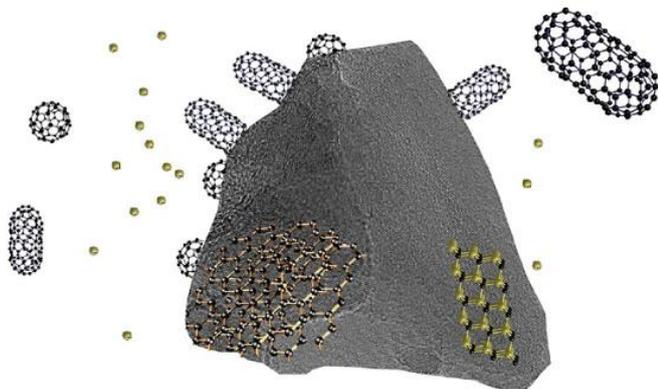


Рис. 1. Изображение МСНТ на поверхности нанозерна SiC.

Интересно, что когда авторы [2] исследовали структуру зерен при комнатной температуре через 9 дней после эксперимента с нагревом, они заметили исчезновение нанотрубок с тех мест поверхности, на которых их регистрировали раньше. Размеры наночастиц SiC заметно уменьшились. В межзвездную среду фуллерены и нанотрубки могут так же, как в этих экспериментах, “улетать” с поверхности зерен.



Авторы надеются найти подтверждение своей точке зрения, изучив образец грунта с околоземного астероида Бенну, богатого углеродом. В нынешнем году его должна доставить американская автоматическая межпланетная станция OSIRIS-REx.

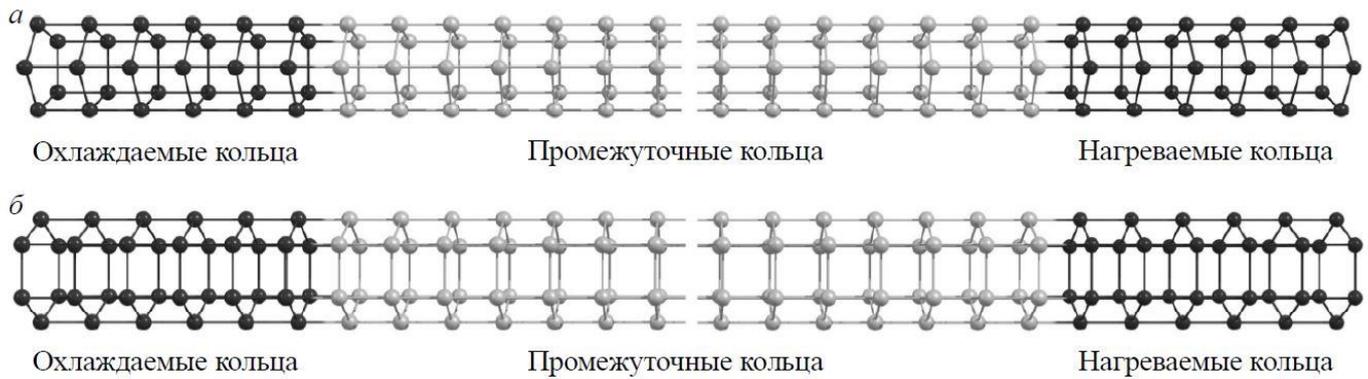
*О. Алексеева*

1. [ПерсТ 19, вып. 10, с.2 \(2012\).](#)
2. *J.J. Bernal et al., J. Phys. Chem. A 126, 5761 (2022).*

## НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОЭЛЕКТРОНИКА

### *Теплопроводность кремниевых полипризматов*

Исследователь из МИСиС (Россия) [1] попытался выяснить теплопроводящие свойства кремниевых полипризматов. Напомним, что полипризмы относятся к классу стержневых молекул и представляют собой протяженные квазиодномерные системы, состоящие из трех и более параллельно уложенных колец, скрепленных ковалентными связями. Наиболее изученными к настоящему времени являются углеродные и кремниевые системы. Если первые можно рассматривать как уложенные слоями дегидрированные молекулы циклоалканов, то кремниевые полипризматы построены похожим образом, но уже из лишенных атомов водорода циклосиланов. Таким образом, и те, и другие при большом числе составляющих колец представляют собой некоторые аналоги нанотрубок с экстремально малым поперечным сечением в виде правильного многоугольника. Предполагается, что углеродные полипризмы, начиная с некоторого критического диаметра, а также все кремниевые полипризмы проявляют металлическую природу и являются проводниками, что позволит их потенциально использовать в качестве активных элементов наноэлектроники. При этом кремниевые полипризматы, согласно данным компьютерного моделирования, считаются более устойчивыми и способны существовать при температурах значительно выше комнатной. Анализу теплопроводности этих систем с помощью классической неравновесной молекулярной динамики и посвящена работа [1]. В качестве объектов анализа автор выбрал кремниевые полипризматы с сечением в виде правильных пяти- и шестиугольников (см. рис.). Взаимодействие атомов описывалось с использованием многочастичного потенциала Терзофа с набором параметров, специально подобранных для кремния. При этом для непосредственного проведения молекулярно-динамических расчетов автор создал собственный программный пакет. Для реализации неравновесной молекулярной динамики использовался метод разделения полипризмата на три области (см. рис): нагреваемая, охлаждаемая и центральная область, через которую происходил перенос тепла.



Неравновесная молекулярная динамика для кремниевых полипризматов с сечениями в виде правильных пяти- (а) и шестиугольников (б).

В результате автором получены данные об изменении теплопроводности в зависимости от различных параметров, таких как длина полипризмана, температура, разность температур на концах полипризмана, размер подогреваемых и охлаждаемых участков, время нагрева, время термализации. Установлено, что после достижения длины в 100 колец (~25 нм) количество переданной энергии перестает зависеть от длины полипризмана, что согласуется с приводимыми ранее данными для нанотрубок. Кроме того, в работе приведено сравнение теплопроводности полипризматов с другими материалами на примере беспереходного нанотранзистора. Как раз одной из проблем таких нанотранзисторов является эффект самонагрева, поэтому для данного устройства необходим эффективный способ охлаждения. Оказалось, что для системы с прямоугольным сечением площадью  $820 \text{ нм}^2$  тепловая мощность, отводимая от транзистора соответствующим медным листом, по оценкам автора, составляет 0.032 мВт. “Лес” вертикальных углеродных нанотрубок с индексами хиральности (10,10) и ансамбль кремниевых полипризматов с сечением в виде правильного шестиугольника способны отвести 0.017 мВт и 0.019 мВт, соответственно. Таким образом, полипризманы и нанотрубки обеспечивают примерно одинаковую теплопроводность, сопоставимую с теплопроводностью меди. Подводя итог, автор приходит к выводу, что данные компьютерного моделирования свидетельствуют что экстремально тонкие кремниевые полипризманы могут служить не только проводниками тока, как было показано ранее, но и тепла.

*М. Маслов*

*И. К.А.Цыденов, Известия ВУЗов. Физика 65, 96 (2022).*

### **Особенности резонансного туннелирования в наноструктурах со спейсерами**

В настоящее время практический интерес представляет создание компактных, когерентных источников излучения в терагерцевом диапазоне частот (0.1–10 ТГц), которые обладают высокой чувствительностью, быстродействием и способны работать при комнатной температуре. Такие устройства потенциально могут использоваться в медицине, метрологии, системах безопасности, беспроводных высокоскоростных средствах связи, спектроскопии и многом другом. Одним из возможных кандидатов в качестве источника терагерцевого излучения является резонансно-туннельный диод (РТД), относящийся к твердотельным, компактным электронным приборам. Наибольшее значение для управления характеристиками РТД играют параметры активной области (квантовой ямы и барьеров), поскольку они определяют ширину и энергию резонансных уровней. Кроме того, существенное влияние на процессы резонансного туннелирования оказывают так называемые спейсерные слои, которые расположены между активной областью и легированными контактными областями (см. рис. 1). Изначально спейсерные слои использовались для уменьшения диффузии донорных примесей в нелегированную активную область. Однако оказалось, что этим роль спейсерных слоев не ограничивается, и они способны оказывать существенное влияние как на статические, так и на динамические характеристики РТД. Авторы работы [1] попытались проанализировать влияние толщины спейсера эмиттера на величину пикового тока различных резонансно-туннельных наноструктур с учетом эффектов накопления заряда и наличия сильнолегированных контактных областей, что соответствует постановке задачи, наиболее прибли-

женной к условиям реального эксперимента. Объектом исследования стали традиционные

двухбарьерные резонансно-туннельные наноструктуры (см. рис. 1).

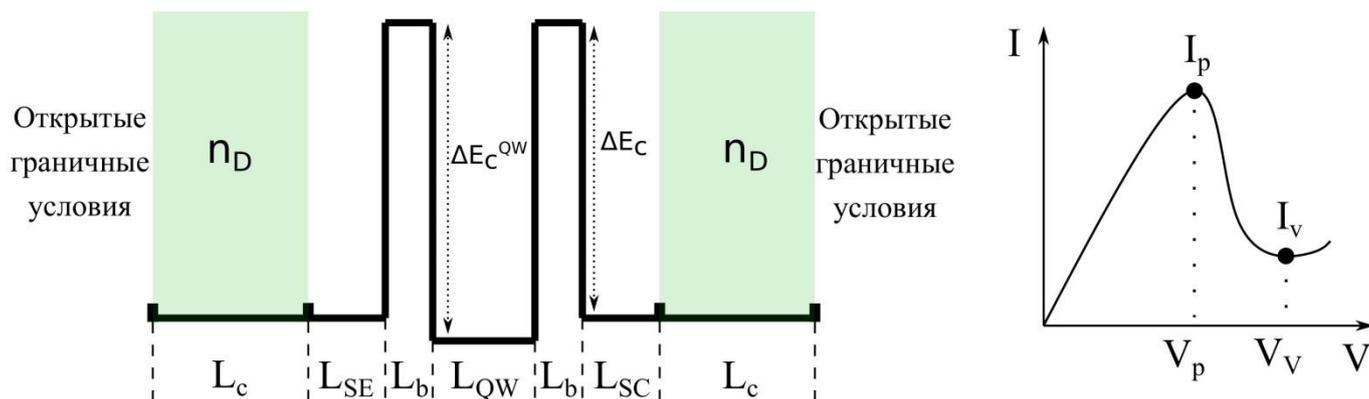


Рис. 1. Схематическая структура потенциального профиля двухбарьерной резонансно-туннельной наноструктуры и характерная зависимость тока от приложенного напряжения для такой структуры. Пиковое значение тока обозначено  $I_p$ , ток долины –  $I_v$ . Зеленым цветом обозначены сильнолегированные контактные области. Толщина спейсера эмиттера обозначается  $L_{SE}$ , толщина спейсера коллектора –  $L_{SC}$ . Активная область резонансно-туннельной наноструктуры образована двумя потенциальными барьерами толщиной  $L_b$  и высотой  $\Delta E_c$ , между которыми расположена квантовая яма толщиной  $L_{QW}$ .

Для расчета статических вольтамперных характеристик авторы предложили методику, основанную на численном решении нестационарной открытой системы уравнений Шредингера и Пуассона со ступенчатой зависимостью приложенного напряжения от времени. При таком подходе с высокой степенью точности выполняется соотношение электронейтральности, в отличие от стационарной постановки, где наблюдаются расходимости решения при определенных значениях толщины спейсера эмиттера. В результате с помощью предложенной модели исследователи проанализировали влияние толщины спейсера эмиттера на наиболее важные статические характеристики РТД: пиковый ток, ток долины и отношение пикового тока к току долины (англ. peak-to-valley current ratio, ОПД). Данные компьютерного моделирования свидетельствуют, что учет сильнолегированных контактных областей и эффектов накопления заряда является значительным. Это приводит к существенной модификации потенциала резонансно-туннельной наноструктуры, что в свою очередь отражается и на электронном транспорте. Расчеты показывают, что величина пикового тока монотонно уменьшается с ростом толщины спейсера эмиттера. При этом ОПД слабо меняется при изменении толщины спейсера эмиттера. Таким образом, для получения максимальных величин пикового тока и ОПД необходимо создавать структуры с малыми толщинами спейсера эмиттера. Также

в работе [1] авторы приводят данные о переходных процессах в резонансно-туннельных наноструктурах, вызванных быстрыми изменениями приложенного напряжения. Они установили, что времена переходных процессов слабо зависят от толщины спейсера эмиттера и имеют величины порядка 1 пс, что примерно соответствует ширине резонансного уровня для рассматриваемых в работе структур РТД. Такие времена наряду с достаточно большими величинами ОПД свидетельствуют о возможности использования резонансно-туннельных наноструктур в качестве сверхбыстродействующих переключателей. По мнению исследователей, наиболее перспективными окажутся структуры с большой шириной резонансного уровня, что сравнительно нетрудно реализовать за счет уменьшения толщин барьерных слоев.

*М. Маслов*

*1. K. Grishakov et al., Appl. Sci. 13, 3007 (2023).*

## СПИНТРОНИКА

### Связанные маятники на магнитный лад

Задача о связанных маятниках – неперенный атрибут любого физического практикума. Как и другие классические задачи механики, она имеет свое продолжение в других областях физики и передовой техники. Так, создание компактных СВЧ генераторов, использующих колебания внутри магнитных вихрей (они называются вихревыми спин-трансферными наноосцилляторами, так как связаны со спиновыми токами) предполагает синхронизацию множества наноосцилляторов. В случае магнитных вихрей “пружинками”, осуществляющими связь между наноосцилляторами, могут быть магнитоэластическое или обменное взаимодействие.

В недавней публикации [1] ученые из Института физики микроструктур РАН и Нижегородского гос. университета им. Н.И. Лобачевского провели изящное экспериментально-теоретическое исследование нормальных колебаний модельной системы связанных наноосцилляторов из двух вихрей.

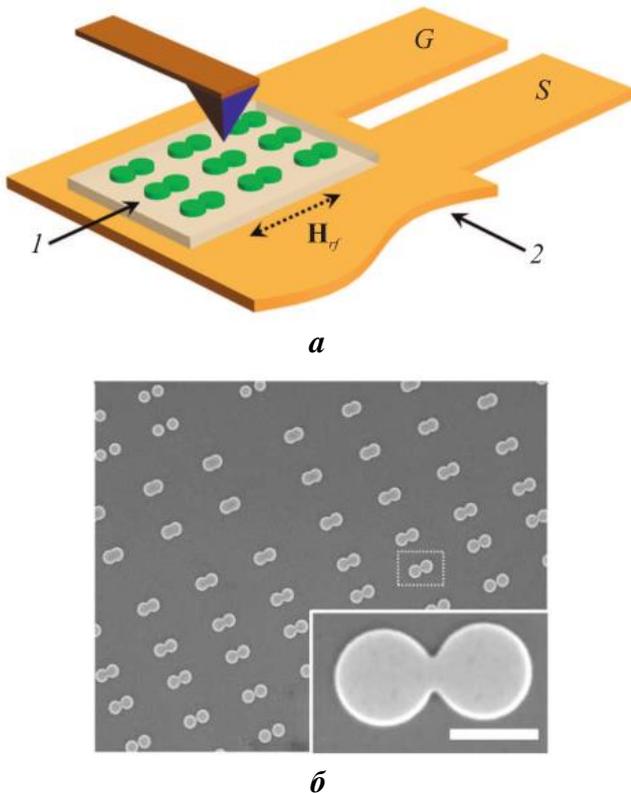


Рис. 1. Связанные пары магнитных наноосцилляторов: *а* - схематическое изображение эксперимента и исследуемой структуры: на конце кантилевера зондового микроскопа намагниченная игла магнитоэластически взаимодействует с вихрем; *б* - изображение исследуемой структуры в СЭМ (масштабный отрезок - 1 мкм) [1].

Наноосцилляторы изготавливали методами электронной литографии и ионного травления пленки пермаллоя на стеклянной подложке (рис. 1). Для детектирования колебаний в вихрях использовали магнитно-резонансную силовую микроскопию в условиях среднего вакуума: СВЧ колебания ядра вихря модулировали на собственной частоте кантилевера магнитно-силового микроскопа  $\sim 20$  кГц (рис. 1а).

При перекрытии дисков наноосцилляторов микромагнитное распределение в них уже не представляет собой просто два соприкасающихся вихря: за счет обменного взаимодействия в области перекрытия вихрей образуется ромбовидная область с квазиоднородной намагниченностью (рис. 2), что, разумеется, влияет на колебания намагниченности в связанных вихрях.

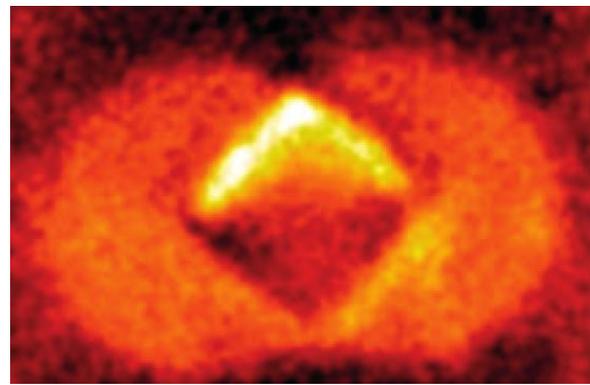
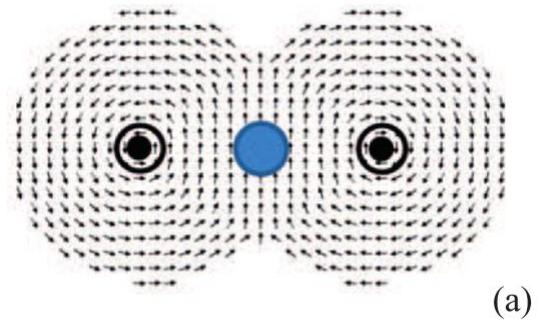
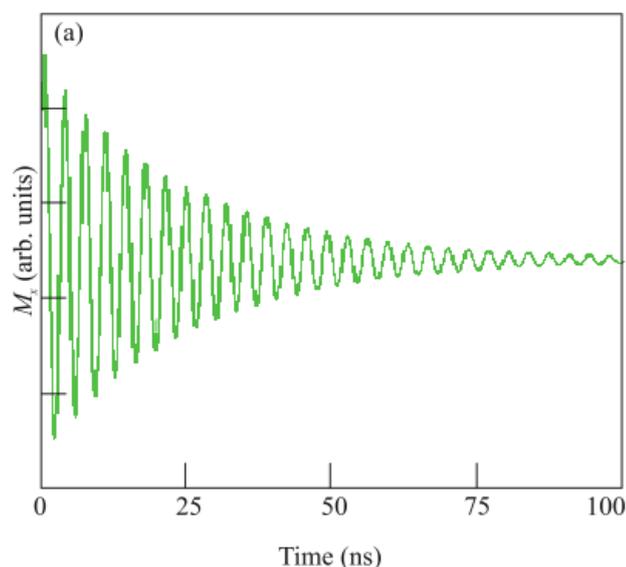


Рис. 2. Пары магнитных вихрей: а) - численно рассчитанное распределение намагниченности внутри пары связанных наноосцилляторов (синим кружком показано расположение зонда; б) - изображение пары дисков в магнитном силовом микроскопе: хорошо виден ромбовидный участок с квазиоднородной намагниченностью.

Эти колебания возникают под действием внешнего импульса магнитного поля  $\sim 1$  Э в плоскости вихря: ядра вихрей отклоняются от равновесных положений и начинают совершать круговые движения с периодом  $\sim 3$  нс. Результирующие магнитные моменты вихрей прецессируют, а их проекции на произвольное

направление в плоскости диска совершают затухающие колебания (рис. 3а). В работе [1] были проведены измерения зависимости частоты мод таких “гиротропных” колебаний вихрей от величины связи между наноосцилляторами. В качестве геометрического параметра связи использовали разность расстояния между центрами вихрей и их диаметром, нормированная



на диаметр вихря. Так, перекрытие дисков на рис. 2 составляет 20%. Здесь стоит отметить, что вследствие эффекта переэкспонирования фоторезиста при литографии двух близкорасположенных структур, физический контакт дисков наблюдался даже при отрицательных значениях геометрического параметра перекрытия (на рис. 1б), он составляет – 10%).

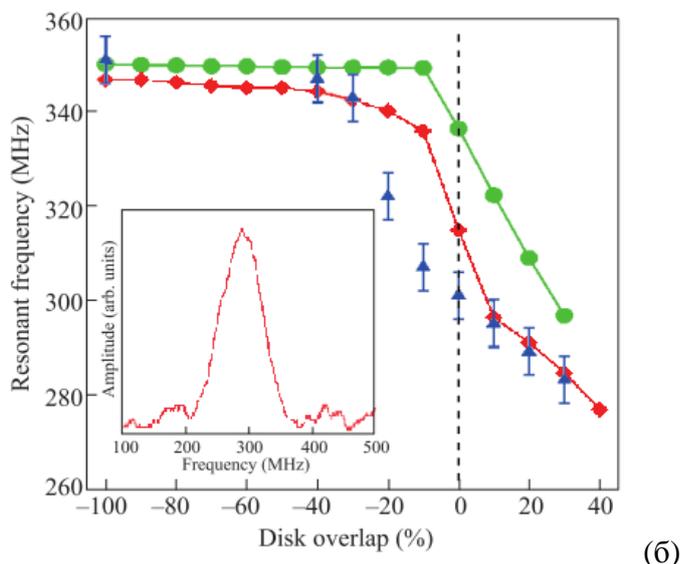


Рис. 3. Гиротропные колебания связанных наноосцилляторов: а) возбужденные субнаносекундным импульсом магнитного поля колебания проекции средней намагниченности вихря; б) зависимость частоты низко-частотной гиротропной моды колебаний связанных наноосцилляторов от геометрического параметра их перекрытия: синие треугольники – экспериментальные данные, красные ромбы – рассчитанные значения. Зеленые кружки – зависимость для парциальной частоты наноосцилляторов. На вставке: спектр гиротропных колебаний при перекрытии 20%

Последним обстоятельством объясняется то, что экспериментальные значения частоты моды существенно отклоняются от расчетных при отрицательных значениях геометрического параметра перекрытия (рис. 3б): в модели предполагается, что связь осуществляется магнито-статическим образом, а в реальности имеет место обменное взаимодействие за счет физического перекрытия вихрей.

Данные измерения позволили оценить величину взаимодействия между осцилляторами и ее зависимость от расстояния между вихрями: сила связи при геометрическом параметре перекрытия 10% составляла 2,5 мкН. Таким образом, продемонстрирована роль обменного взаимодействия в существенном увеличении энергии связи вихрей, что можно использовать для фазовой синхронизации наноосцилляторов в интегральных СВЧ генераторах.

А. Пятаков

И. Е.В.Скорыходов и др., Письма в ЖЭТФ  
117, 165 (2023).

## СНОВА К ОСНОВАМ

### Не просто доплеровское уширение: новый эффект, связанный с движением молекул в газе

Линейчатые спектры газов – первое направление в спектроскопии, положившее начало этой мощной методике в начале XIX века и определивших ее успешное развитие. С повышением разрешения спектральных приборов линии излучения и поглощения газов стали известны в мельчайших деталях. В современной оптике линии излучения разреженных газов используются как квантовые стандарты частоты, для создания сверхточных атомных часов. Основная теоретическая форма спектральной линии – лоренцевская, на которую могут быть наложены дополнительные факторы: уширение за счет эффекта Доплера, сдвиги за счет внешних полей, сдвиги за счет межатомного взаимодействия. Казалось бы, что нового можно внести в эту устоявшуюся область? Тем не менее, в недавней работе [1] российские ученые обнару-

жили еще один эффект, влияющий на форму спектральной линии. Это нелинейный эффект, возникающий при взаимодействии лазерного излучения с атомом. Этот эффект связан с движением атомов и при этом отличается от стандартного доплеровского уширения.

Авторы решили систему уравнений Максвелла-Блоха, описывающую распространение плоской монохроматической волны в среде невзаимодействующих атомов – двухуровневых систем, причем частота волны близка к частоте перехода между уровнями. Под действием электрического поля волны в атомах происходят переходы между уровнями, которые меняют поляризацию среды, а значит, воздействуют на исходную волну. Атомы хаотически движутся и имеют максвелловское распределение по скоростям. Уравнения Максвелла-Блоха решаются методом последовательных приближений, останавливаются на третьем приближении.

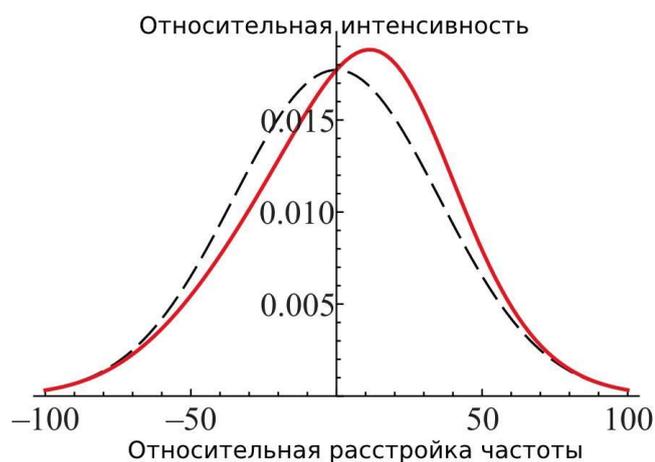


Рис. 1. Расчет линии излучения газа. Черная штриховая линия - фойгтовский контур - свертка лоренцевского и доплеровского контура. Красная сплошная линия – расчет, исходя из решения уравнений Максвелла-Блоха.

Один из результатов расчета показан на рис. 1. Для сред с малой оптической плотностью контур линии хорошо известен, он является сверткой лоренцевского контура, учитывающего конечное время жизни возбужденного состояния, и доплеровского контура. Соответствующий контур показан черной штриховой линией. Красной линией показан контур, рассчитанный в статье [1], учитывающий нелинейные эффекты взаимодействия электромагнитной волны с атомом. Видно, что этот контур несимметричен, сдвинут в сторону высоких частот относительно частоты атомного перехода.

Подход авторов к расчету не ограничивается моделью среды с малой оптической плотностью, в работе дана общая аналитическая формула, подходящая и для других газовых сред. Авторы особо обращают внимание на то, что полученная асимметрия не связана с взаимодействием атомов между собой.

Надо отметить, что в расчетах плотность вещества предполагается достаточно большой, чтобы асимметрия могла быть заметна на графике, и возможно, в реальных ситуациях эффект будет довольно слабым. Тем не менее, авторы предлагают экспериментальные методики, которые могли бы обнаружить рассчитанные отклонения. В случае же сверхточных стандартов частоты критичны любые дополнительные эффекты, связанные с формой спектральной линии, и необходимо иметь методику, позволяющую рассчитывать их с максимальной точностью.

3. Пятакова

1. В.И.Юдин и др., Письма в ЖЭТФ 117, 406 (2023).

## **КОНФЕРЕНЦИИ**

**Третья Международная конференция  
“Физика конденсированных состояний”  
(ФКС-2023), посвященная 60-летию ИФТТ  
им. Ю.А. Осипьяна РАН, с 29 мая по 3 июня  
2023 года, г. Черноголовка, Россия**

Рабочие языки конференции – русский, английский. Тезисы (на русском или английском языке) будут изданы к началу работы конференции (с присвоением DOI). Конференция проводится в Институте физики твердого тела РАН.

### **Основные научные направления конференции:**

1. Физика дефектов;
2. Фуллерены и углеродные структуры;
3. Сверхпроводимость;
4. Низкоразмерные структуры и физика поверхности;
5. Физическое материаловедение.

### **Важные даты:**

Срок регистрации – **15 апреля 2023 г.**

Тезисы докладов – до **15 апреля 2023 г.**

Текст статьи – до **29 мая 2023 г.**

Подробная информация на сайте Конференции:

<http://www.issp.ac.ru/fks2023/>

**Информационный бюллетень ПерсТ  
издается информационной группой ИФТТ РАН**

Главный редактор: И. Чугуева, e-mail: [ichugueva@yandex.ru](mailto:ichugueva@yandex.ru)

Научные редакторы К. Кугель, Ю. Метлин

В подготовке выпуска принимали участие О. Алексеева, М. Маслов, А. Пятаков, З. Пятакова

Выпускающий редактор: И. Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64