

СВЕРХПРОВОДНИКИ

Мода Хиггса в сверхпроводниках

Одним из наиболее значимых результатов фундаментальных физических исследований последнего десятилетия стало долгожданное открытие бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН. Наблюдение этой частицы с энергией 125 ГэВ подтверждает существование так называемого поля Хиггса, играющего центральную роль в Стандартной модели элементарных частиц. Может показаться странным, но идея механизма Хиггса была в свое время заимствована из физики конденсированного состояния вещества, имеющей дело с низкоэнергетическими (~ 1 эВ) частицами. В 1958 г. P.W. Anderson [1] показал, что у сверхпроводящего конденсата имеется когерентное возбужденное состояние, с осциллирующей амплитудой параметра сверхпроводящего порядка Δ (мода Хиггса, рис. 1).

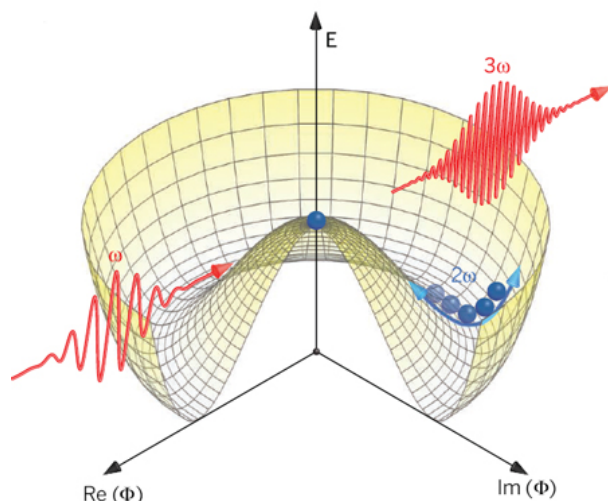


Рис. 1. Энергия E системы со спонтанно нарушенной симметрией как функция комплексного параметра порядка Φ . Амплитудная мода Хиггса соответствует осцилляциям $|\Phi|$. При воздействии электромагнитного импульса с частотой ω имеют место осцилляции $|\Phi|$ с частотой 2ω , а нелинейность индуцированного сверхтока по электрическому полю импульса приводит к испусканию света с частотой 3ω .

В физике элементарных частиц коллективная мода Хиггса появляется только в лоренц-инвариантной релятивистской теории, которая обычно ассоциируется с очень высокими энергиями. Откуда же этой моде взятись в сверхпроводниках, где энергия частиц на много порядков меньше? Дело в том, что при температуре ниже критической закон дисперсии в сверхпроводнике приобретает такой же вид, как для релятивистских частиц (рис. 2) и, более того, гамильтониан Дирака в квантовой теории формально идентичен гамильтониану БКШ в теории сверхпроводимости. Экспериментальные исследования моды Хиггса в сверхпроводниках затруднены отсутствием у нее зарядовых флуктуаций, вследствие чего она не взаимодействует с электромагнитным полем непосредственно

И далее ...

- 2 Топологическая сверхпроводимость в квантовых ямах
HgTe/HgCdTe

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

- 3 Электрический контроль долгоживущего спинового кубита в квантовой точке Si/SiGe

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

- 3 Атомарно тонкие p - n контакты из дихалькогенидов переходных металлов

СПИНТРОНИКА

- 4 Там, за перевалом гигантский спиновый эффект Холла

ФУЛЛЕРЕНЫ И НАНОТРУБКИ

Радиометка ^{14}C показала: УНТ из легких переходят в отдаленные органы

- 5 Как “надуть” фуллерен и молекулярная хирургия кремния

КОНФЕРЕНЦИИ

- 6 11th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M²S HTSC 2015), August 23-28, 2015, Geneva, Switzerland

11th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets, (ISCOM 2015), September 7–11, 2015, Bad Gögging, Germany

- 7 Семинар по физике конденсированного состояния, 8 октября 2014 г.

(в режиме линейного отклика), а только во втором порядке по амплитуде электрического поля.

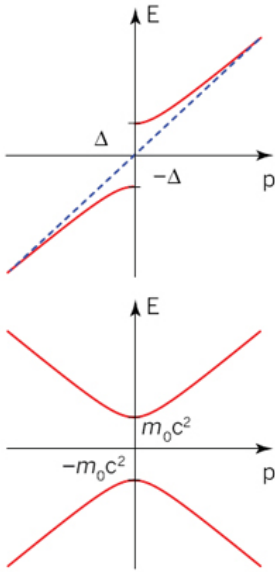


Рис. 2. Вверху – зависимость энергии квазичастицы E от ее квазиимпульса p в сверхпроводнике при температуре выше (штриховая линия) и ниже (сплошная линия) критической. Внизу – зависимость энергии E релятивистской системы частица-античастица с массой покоя m_0 от ее импульса p .

Такая нелинейность должна приводить к осцилляциям Δ с частотой 2ω , в два раза превосходящей частоту поля ω , что и было продемонстрировано в работе японских физиков [2], использовавших для этой цели пленки NbN с $T_c = 15$ К и недавно разработанные компактные источники терагерцового излучения. Мониторинг сверхбыстрой динамики Δ на пикосекундной шкале осуществлялся посредством пробного запаздывающего терагерцового импульса (рис. 3).

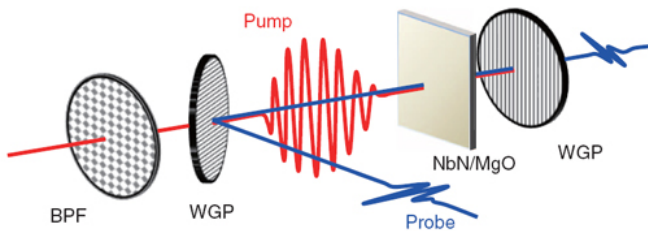


Рис. 3. Схема эксперимента. BPF – фильтр, WGP – поляризаторы.

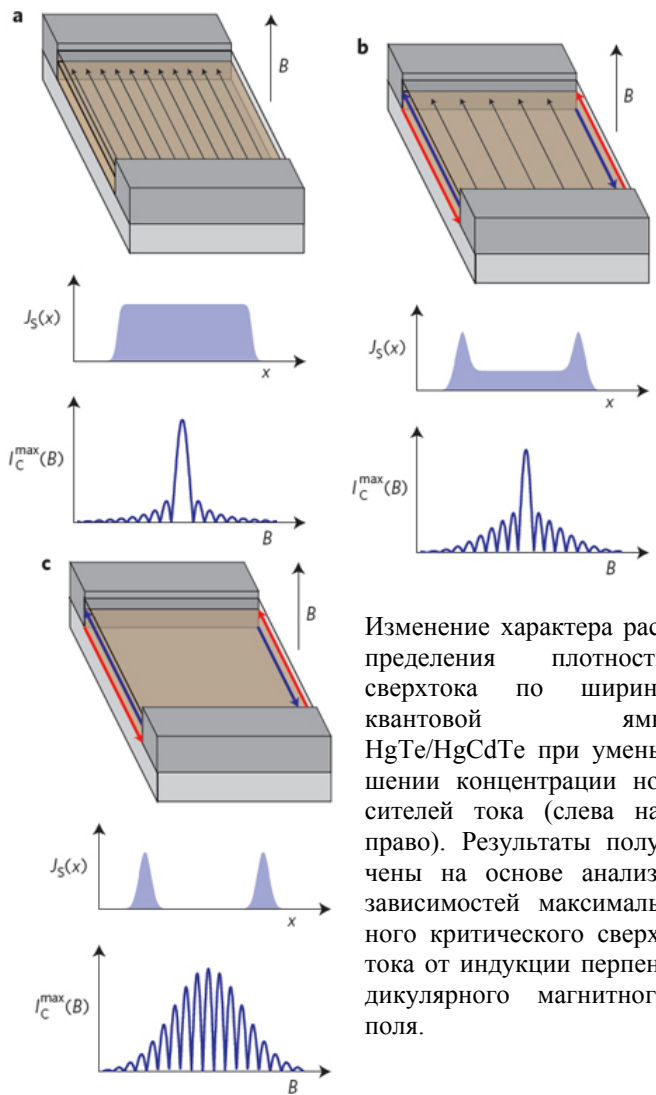
Чтобы избежать термического возбуждения квазичастиц (и связанного с ним уменьшения Δ) за счет однофотонных процессов, температуру и частоту подбирали из условия $\hbar\omega < 2\Delta(T)$. Еще одним следствием упомянутой нелинейности является генерация третьей гармоники (рис. 1) из-за осцилляций сверхтока с частотой 3ω . Применение развитой методики к “необычным” сверхпроводникам (купратам и пниктидам) может дать новую полезную информацию о конкуренции сверхпроводящего порядка с другими упорядоченными фазами.

По материалам заметки
“Particle physics in a superconductor”,
A.Pashkin, A.Leitenstorfer,
Science 345, 1121 (2014).

1. P.W.Anderson, Phys. Rev. 110, 827 (1958).
2. R.Matsunaga et al., Science 345, 1145 (2014).

Топологическая сверхпроводимость в квантовых ямах HgTe/HgCdTe

В квантовых ямах HgTe/HgCdTe толщиной свыше $d_c = 6.3$ нм состояние носителей тока отвечает двумерному диэлектрику, в котором наблюдается квантовый эффект Холла. На краях таких ям формируются одномерные спиральные состояния, в которых, согласно теории, может индуцироваться топологическая сверхпроводимость. Помещая квантовые ямы с $d = 7.5$ нм между двумя сверхпроводниками, авторы работы [1] (США, Германия) изготовили джозефсоновские контакты и изучили распределение протекающего по ним сверхтока. Они обнаружили, что при высокой концентрации носителей тока (контролируемой путем изменения напряжения на затворе) сверхток равномерно распределен по ширине ямы, а при низкой – локализован на ее краях. В ямах с $d = 4.5$ нм $< d_c$ краевые сверхтоки отсутствуют.



Изменение характера распределения плотности сверхтока по ширине квантовой ямы HgTe/HgCdTe при уменьшении концентрации носителей тока (слева направо). Результаты получены на основе анализа зависимостей максимального критического сверхтока от индукции перпендикулярного магнитного поля.

1. S.Hart et al., Nature Phys. 10, 638 (2014).

КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ

Электрический контроль долгоживущего спинового кубита в квантовой точке Si/SiGe

Интерес к электронным спиновым кубитам в полупроводниковых квантовых точках (КТ) обусловлен перспективой их интеграции в многокубитные информационные системы. Наибольший прогресс здесь достигнут при использовании КТ GaAs. Существенным недостатком этих КТ является, однако, низкая точность операций и маленькое время спиновой когерентности из-за взаимодействия спина электрона с флуктуирующими ядерными спинами окружающей матрицы. В работе [1] (Нидерланды, США) описан электронный спиновый кубит в КТ Si/SiGe (см. рис.), управляемый короткими СВЧ импульсами.

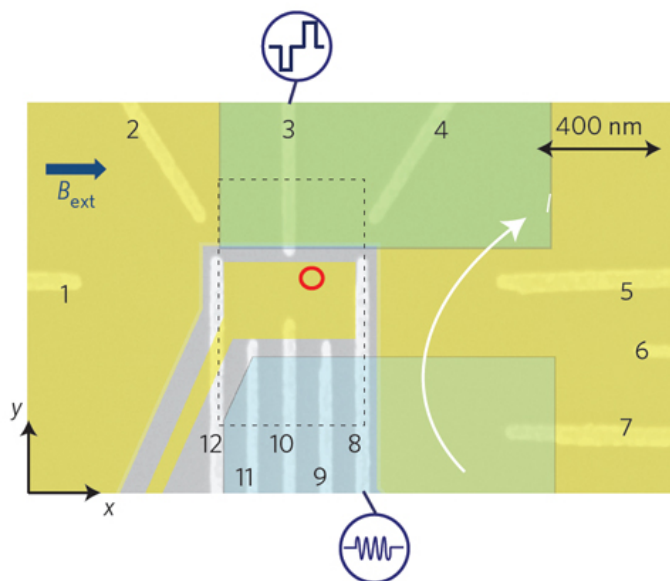


Схема устройства на основе двумерного электронного газа в гетероструктуре Si/SiGe. Красный кружок – ориентировочное место расположения квантовой точки. 1-12 – управляющие электроды. Зеленые прямоугольники – кобальтовые микромагниты.

Отсутствие ядерных спинов у элементов IV группы приводит к тому, что время дефазировки кубита $T_2^* \approx 1$ мкс оказывается на два порядка больше, чем в КТ GaAs (при сравнимой длительности операций). Основным каналом дефазировки служит взаимодействие кубита с ядерными спинами изотопа ^{29}Si , концентрация которых составляет 5%. Использование методики спинового эха (на кубит воздействовали последовательно $\pi/2$, π и $\pi/2$ импульсов) привело к увеличению T_2^* до ≈ 40 мкс. На очереди – двухкубитные операции.

Л.Опенков

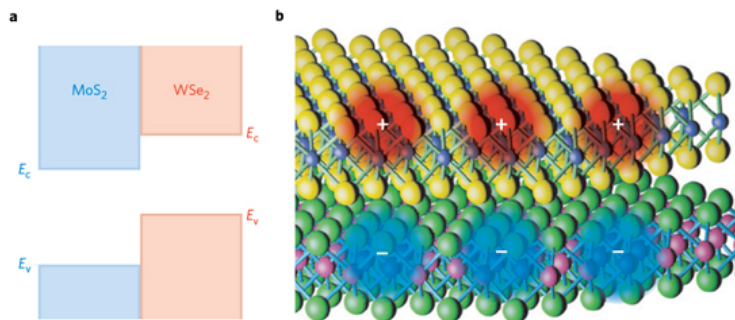
1. E.Kawakami et al., *Nature Nanotech.* **9**, 666 (2014).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

Атомарно тонкие p-n контакты из дихалькогенидов переходных металлов

Полупроводниковые p-n контакты – важнейшие элементы электронных и оптоэлектронных устройств. Они формируются на границе раздела полупроводников p-типа (носители заряда – дырки) и n-типа (носители заряда – электроны). По обе стороны от границы образуются области, обедненные носителями соответствующего знака, в результате чего возникает “встроенное” электрическое поле, и p-n контакт ведет себя как диод.

В работе [1] (США, Корея) изготовлены самые тонкие из возможных p-n контакты. Они состоят всего из двух монослоев: одного слоя WSe_2 и одного – MoS_2 (см. рис.). ВАХ этих контактов резко асимметричны, как и у обычных полупроводниковых диодов, но механизм транспорта носителей совершенно другой – не дрейф и диффузия, а квантовое туннелирование. Большая величина фототока свидетельствует о низкой скорости электрон-дырочной рекомбинации из-за пространственного разделения фотовозбужденных электронов и дырок. Накоплению фотовозбужденных носителей способствует размещение контакта между слоями графена. Ряд вопросов требует дальнейших исследований. Например, не вполне ясно, образуют ли электроны и дырки экситонные состояния, а также можно ли контролировать взаимное расположение электронных энергетических зон WSe_2 и MoS_2 электростатически?



а – Взаимное расположение электронных энергетических зон в WSe_2 и MoS_2 : E_c – дно зоны проводимости, E_v – потолок валентной зоны.

б – Схематическое изображение вертикального p-n контакта, образованного монослоями WSe_2 и MoS_2 . Синие, желтые, лиловые и зеленые сферы – атомы Mo, S, W и Se, соответственно.

Л.Опенков

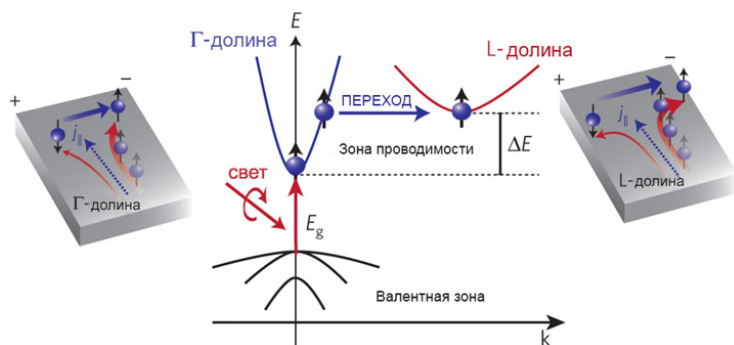
1. C.-H.Lee et al., *Nature Nanotech.* **9**, 676 (2014).

СПИНТРОНИКА

Там, за перевалом гигантский спиновый эффект Холла

Прошло уже десять лет после экспериментального обнаружения спинового эффекта Холла – поперечного сноса электронов с антипараллельными спинами в противоположные стороны при протекании электрического тока через немагнитный материал в отсутствие магнитного поля. Для спиновой электроники данный эффект значит несравненно больше, чем обычный эффект Холла для электроники “зарядовой”, поскольку он позволяет генерировать спиновый ток – чистый перенос спина, не сопровождающийся переносом электрического заряда. В этом смысле его можно сопоставить по значению с изобретением вольтова столба, положившим начало электромагнетизму. Однако “магнитные батарейки” еще далеки от совершенства, а эффект в большинстве материалов едва уловим. Относительно большие величины эффекта наблюдаются в золоте и платине, а рекордсменом по этой части является таллий – элемент с неоднозначной репутацией, стараниями Агаты Кристи снижавший среди нетерпеливых британских наследников популярность едва ли не больше, чем мышьяк.

Кстати, о мышьяке, одно из его соединений – арсенид галлия GaAs, широко используется в электронике и относительно безопасно. Именно в нем и был первоначально обнаружен спиновый эффект Холла. Можно представить себе удивление первооткрывателей, когда они узнали, что преуменьшили эффект в этом материале в 40 раз [1].



Усиление спинового эффекта Холла при междолинном переходе в GaAs. Спиновый эффект Холла детектировался по электрическому напряжению, возникающему за счет разной концентрации электронов со спином вверх и вниз при облучении полупроводника циркулярно-поляризованным светом.

Все дело в том, что арсенид галлия – это двухдолинный полупроводник, т.е. его зона Бриллюэна имеет два минимума (см. рис.), соответствующих электронам с различными энергиями и эффективными массами. Во второй долине спин-орбитальное взаимодействие на порядки превышает таковое для низкоэнергетических электронов, а значит, связанный с ним спиновый эффект Холла тоже резко возрастает, достигая величин, характерных для плати-

ны. Для того чтобы попасть во вторую долину, нужно перевалить через энергетический барьер, приложив электрическое напряжение 3кВ/см, что вполне достижимо, хотя и превышает на порядок напряжения, используемые в первых опытах по спиновому эффекту Холла. Кстати, само явление междолинного перехода хорошо известно по эффекту Ганна и давно используется для генерации СВЧ, так что, изучая спиновую электронику, никогда не стоит забывать об электронике обычной.

А. Пятаков

I. N.Okamoto et al., Nature Mater. 13, 932 (2014).

ФУЛЛЕРЕНА И НАНОТРУБКИ

Радиометка ^{14}C показала: УНТ из легких переходят в отдаленные органы

Совместные исследования французских учёных из CEA и CNRS показали, что метод радиоактивных индикаторов можно эффективно использовать для изучения транслокации углеродных наноматериалов в живых организмах в течение длительного периода времени [1].

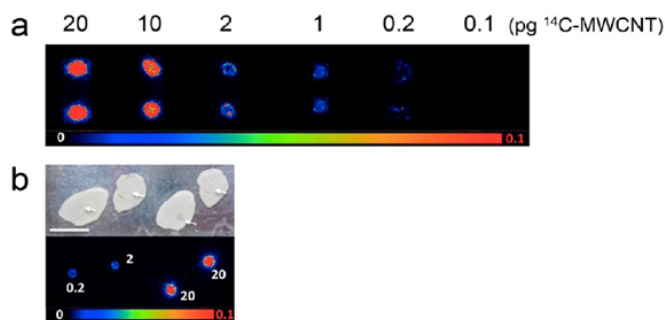


Рис. 1. Порог детектирования ^{14}C -МСНТ: *a* – 20, 10, 2, 1 и 0.2 пг ^{14}C -МСНТ на стеклянной подложке; *b* – ^{14}C -МСНТ в ткани печени (вверху оптическое изображение).

Организм борется с чужеродными включениями, в том числе углеродными нанотрубками (УНТ), разными способами, например, с помощью поглощающих их фагоцитов или путем почечной фильтрации [2]. Тем не менее, в различных экспериментах на мышах были продемонстрированы патологические изменения даже под действием коротких очищенных углеродных нанотрубок [3]. Наиболее вероятным является попадание УНТ в организм при вдыхании, поэтому очень важно знать, выводятся ли они из легких и в какие органы попадают. Для изучения этого обычно используют электронную микроскопию. Чувствительность метода очень высока, но он трудоемкий, требует изучения огромного количества срезов тканей. Французские ученые разработали альтернативный способ – непосредственно при синтезе они ввели в многостенные нанотрубки (МСНТ) радиоактивную метку ^{14}C . В предыдущих экспериментах удалось получить ^{14}C -МСНТ только с очень низкой активностью – $4.5 \cdot 10^3$ Бк/мг [4]. Благодаря тому, что авторы [1] усовершенствовали синтез (использовали в качестве

ве источника углерода бензол с меткой ^{14}C и аэрозольный CCVD-метод) удельная активность ^{14}C -МСНТ выросла в 2000 раз и достигла примерно 10^7 Бк/мг, соотношение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} \sim 1/17$. Порог детектирования по массе отвечал 22 нанотрубкам или 0.2 пг (масса МСНТ длиной 3.9 мкм и диаметром 41 нм, т.е. около $9 \cdot 10^{-15}$ г) (рис. 1).

^{14}C -МСНТ были введены в дыхательную систему мышей в дозе 20 мкг ($1.96 \cdot 10^5$ Бк). Через 1, 7 дней и 1, 3, 6, 9, 12 месяцев были изучены ткани различ-

ных органов, а также образцы крови и мочи (в каждом эксперименте умертвляли по 4 мыши) (рис. 2). Результаты показали, что некоторое количество МСНТ из легких переходит в отдаленные органы. Более того, нанотрубки накапливаются и остаются даже через год (особенно в селезенке, печени и костном мозге). Таким образом, эти углеродные наноматериалы способны преодолеть аэрогематический барьер (барьер между воздухом и кровью в альвеолах).

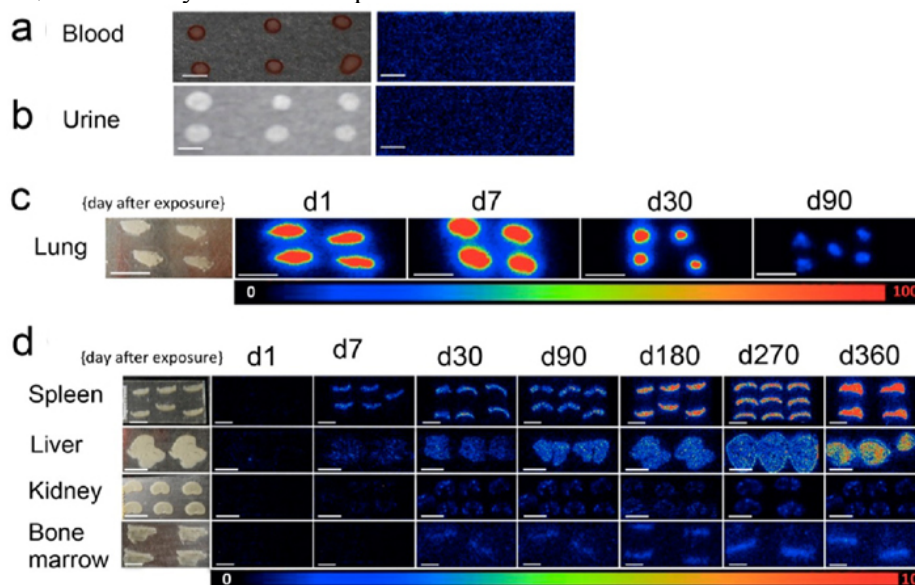


Рис. 2. *a* и *b* – образцы крови и мочи, взятые через день после воздействия; *c* и *d* – ткани различных органов в разное время после воздействия (*c* – легкие, *d* – сверху вниз: селезенка, печень, почка, костный мозг). Слева – оптические изображения.

Подход, представленный в работе [1], позволит изучить влияние размеров, химии поверхности углеродных нанотрубок на их транслокацию. Конечно, он также может быть использован для графена и других наноматериалов на основе углерода.

О. Алексеева

1. B.Czarny et al., *ACS Nano* **8**, 5715 (2014).
2. *ПерсТ* **18**, вып. 6, с.6 (2011).
3. *ПерсТ* **18**, вып.10, с.5 (2011).
4. E.JPetersen et al., *Environ. Health Perspect.* **116**, 496 (2008).

Как “надуть” фуллерен и молекулярная хирургия кремния

Наверное, нет такого человека, кто в детстве не радовался бы воздушным шарикам. И, конечно, хотелось надуть шарик как можно больше, но каково же было разочарование, если он неожиданно лопался. Видимо, не забыв о своих детских переживаниях, авторы работы [1] решили выяснить, сколько атомов инертных газов (гелия, неона и аргона) необходимо, чтобы “лопнуть” фуллереновую клетку C_{80} или кремниевый каркас Si_{80} (рис. 1).

В рамках теории функционала плотности с помощью программных пакетов SIESTA и Gaussian03 исследователи выяснили, что максимальное число атомов гелия, неона и аргона, которое может вместить в себя фуллерен C_{80} равно 46, 24 и 10, соответственно.

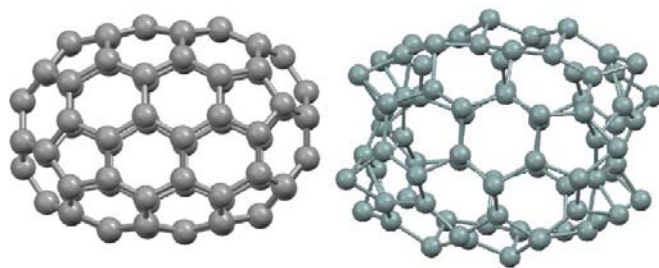


Рис. 1. Фуллерен C_{80} (слева) атомный кластер Si_{80} (справа).

Если указанное количество атомов превысить, то углеродная клетка разрушится, образуя конфигурацию, ассоциирующуюся у авторов с корзиной для покупок, в которую заботливые хозяйки складывают продукты в супермаркете (рис. 2). Поэтому эта структура получила название “молекулярной корзины”. Интересно, что молекулярная корзина образуется не всегда, а только при определенном числе

атомов газа внутри фуллерена. Например, авторам не удалось ее идентифицировать, если число инкапсулированных атомов гелия превышало 56. Что касается кремния, то было показано, что внедренные атомы инертных газов стабилизируют кремниевый остов, а максимальная вместимость каркаса составляет 95, 56 и 22 атомов гелия, неона и аргона, соответственно.

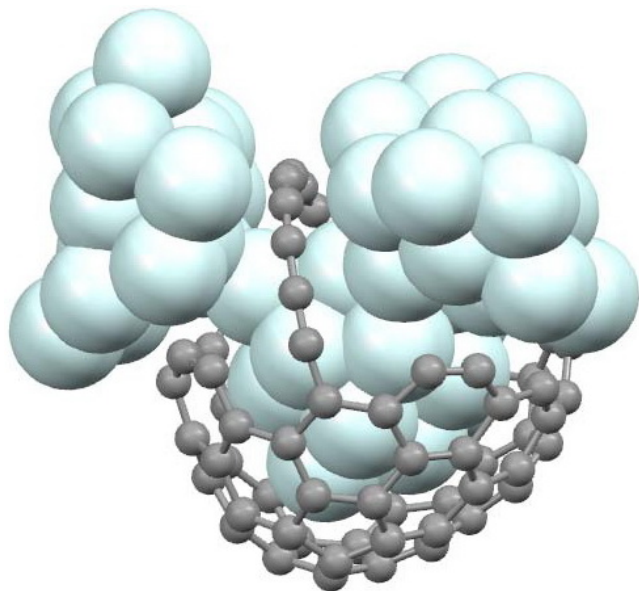


Рис. 2. “Молекулярная корзина”, образовавшаяся в процессе распада эндоэдрального комплекса $\text{He}_{50}@\text{C}_{80}$

Автор впервые обнаружил и еще одну интересную особенность, названную им “молекулярным кесаревым сечением”. Она заключается в способности кремниевого каркаса “залечивать” разорвавшиеся связи Si-Si. Автор поместил внутрь структуры Si_{80} девятнадцать атомов аргона и дополнительный атом кремния, сформировав эндоэдральный комплекс $\text{Ar}_{19}\text{Si}@\text{Si}_{80}$. В процессе геометрической оптимизации внедренный атом кремния мигрировал на внутреннюю поверхность клетки и связывался с тремя другими атомами кремния. После этого одна из связей Si-Si разрывалась и два атома аргона покидали клетку, а структура полностью перестраивалась, восстанавливая разрушенные ковалентные связи.

Итак, автор удовлетворил своё детское любопытство и получил интересные результаты. Во-первых, теперь нам известно, как аккуратно надуть фуллерен гелием, чтобы он не лопнул, а во-вторых, дальнейшее, более углубленное изучение “молекулярного кесарева сечения”, в том числе и на других кремниевых атомных кластерах, возможно, позволит значительно упростить химические реакции внедрения и синтез соединений типа хозяин-гость, что актуально для создания систем доставки лекарственных средств.

М. Маслов

I. Z. Mahdaviyar, *J. Mol. Graph. Model.* **54**, 32 (2014).

КОНФЕРЕНЦИИ

11th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M^2S HTSC 2015), August 23–28, 2015, Geneva, Switzerland



The M^2S 2015 conference is the 11th conference in the successful series of tri-annual conferences on materials and mechanisms of superconductivity. The first one took place in 1988 in Interlaken in the wake of the discovery of high- T_c superconductivity by the Swiss Nobel Prize winners Georges Bednorz and Karl Alex Müller. The meeting has since then taken place in Palo Alto, Kanazawa, Grenoble, Beijing, Houston, Rio de Janeiro, Dresden, Tokyo, Washington, and now will return to Switzerland in the summer of 2015.

The field of superconductivity is heavily driven by experimental progress using the most advanced technology available. Consequently the participants of M^2S are actively involved in materials science, experimental techniques, theoretical research and/or applications of superconductivity.

The experimental techniques involve materials processing, crystal growth and characterization, low temperature techniques, ultra high vacuum, various kinds of neutron-, electron-, optical-, X-ray, and scanning probe techniques.

Superconductivity is also the subject of intense theoretical research, and has spurred novel ground breaking theoretical approaches to the mechanisms of superconductivity and more generally of emergent properties of strongly interacting electrons.

Important Dates

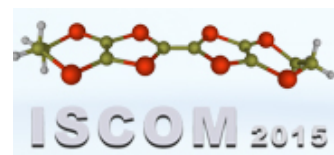
15.09.2014: opening of the registration and abstract submission

15.01.2015: abstract submission deadline

Web: www.m2s-2015.ch

E-mail: m2s2015@symporg.ch

11th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors and Magnets, (ISCOM 2015), September 7–11, 2015, Bad Gögging, Germany



ISCOM 2015 continues the series of biennial ISCOM meetings starting in Mittelberg, Austria in 1995. ISCOM 2015 will be a forum of interdisciplinary discussion on all aspects (Chemistry, Physics, Materials Science and Technology) of crystalline molecular solids.

Topics:

- Synthesis of new molecules and molecular materials

ПерсТ, 2014, том 21, выпуск 18

- Physics of low-dimensional metals and superconductors
- Electron correlations in molecular materials
- Molecular magnetism, spin liquids
- Molecular dielectrics
- Novel functional materials
- Organic molecular nanoscience
- Organic thin films and devices
- Field- and photo-induced phenomena
- Theory, modeling and computation

Important Dates

Registration and Abstract Submission Opening **March 30, 2015**

Abstract Submission Deadline **May 04, 2015**

Web: www.iscom2015.de

Семинар по физике конденсированного состояния, 8 октября 2014 г.

(17.00, многофункциональный зал библиотеки физического факультета МГУ, 5 этаж)

Рязанов Валерий Владимирович (Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка) -

“Сверхпроводящие джозефсоновские структуры с ферромагнитными барьерами и их возможное использование в сверхпроводящей электронике и спинтронике”

Пропуск на физический факультет слушателей семинара будет осуществляться по предъявлению паспорта.

Предварительная запись на семинар на сайте <http://nano.msu.ru/education/seminars> (до 15:00 дня семинара).

Для расширения возможностей участия в семинаре предполагается обеспечить прямую он-лайн трансляцию заседаний через сайт

<http://nano.msu.ru/video.php>

Видеозапись семинара впоследствии будет доступна на сайтах <http://cm.phys.msu.ru/?q=seminar> или

<http://nano.msu.ru/research/seminars/condensed/seminars>

Дополнительная информация:

тел. +7(495)939-1151

E-mail: khokhlov@mig.phys.msu.ru

Экспресс-бюллетень ПерсТ издаётся совместной информационной группой
ИФТТ РАН и НИЦ «Курчатовский институт»

Главный редактор: И.Чугуева, e-mail: irina@issp.ras.ru

Научные редакторы К.Кугель, Ю.Метлин

В подготовке выпуска принимали участие О.Алексеева, М.Маслов, Л.Опенков, А.Пятаков

Выпускающий редактор: И.Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64^а