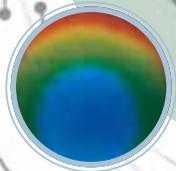


Государственные премии РФ — сибирякам

В День России, 12 июня 2010 г. в Георгиевском зале Большого Кремлевского дворца состоялось вручение Государственных премий Российской Федерации за 2009 г. Государственная премия РФ служит высшим признанием заслуг деятелей науки и культуры перед обществом и государством, и присуждается за выдающиеся работы, открытия и достижения, результаты которых существенно обогатили отечественную и мировую науку и оказали значительное влияние на развитие научно-технического прогресса. Премия носит персональный характер и присуждается, как правило, одному соискателю однократно. В этом году присуждение Государственных премий в области науки и технологий вылилось в настоящий триумф сибирской науки: две из трех премий получили новосибирцы, сотрудники Сибирского отделения РАН. Высшей государственной наградой были отмечены д. ф.-м. н. Н. А. Винокуров (Институт ядерной физики СО РАН) — за достижения в области разработки и создания лазеров на свободных электронах, и академик В. Н. Пармон (Институт катализа СО РАН) — за крупный вклад в развитие теории и практики каталитических методов глубокой переработки углеводородного сырья и использования возобновляемых ресурсов. Сегодня на страницах нашего журнала Н. А. Винокуров рассказывает о своей работе



2010

«НАУКА из первых рук», № 3(33)

Н. А. ВИНОКУРОВ

На быстрых ЭЛЕКТРОНАХ

Лазеры на свободных электронах — мощные источники когерентного излучения, возникающего при движении заряженных частиц в периодическом магнитном поле и близкого к синхротронному излучению. Главная область применения таких установок — исследования в сфере материаловедения, химии, кристаллографии, физики твердого тела, молекулярной биологии

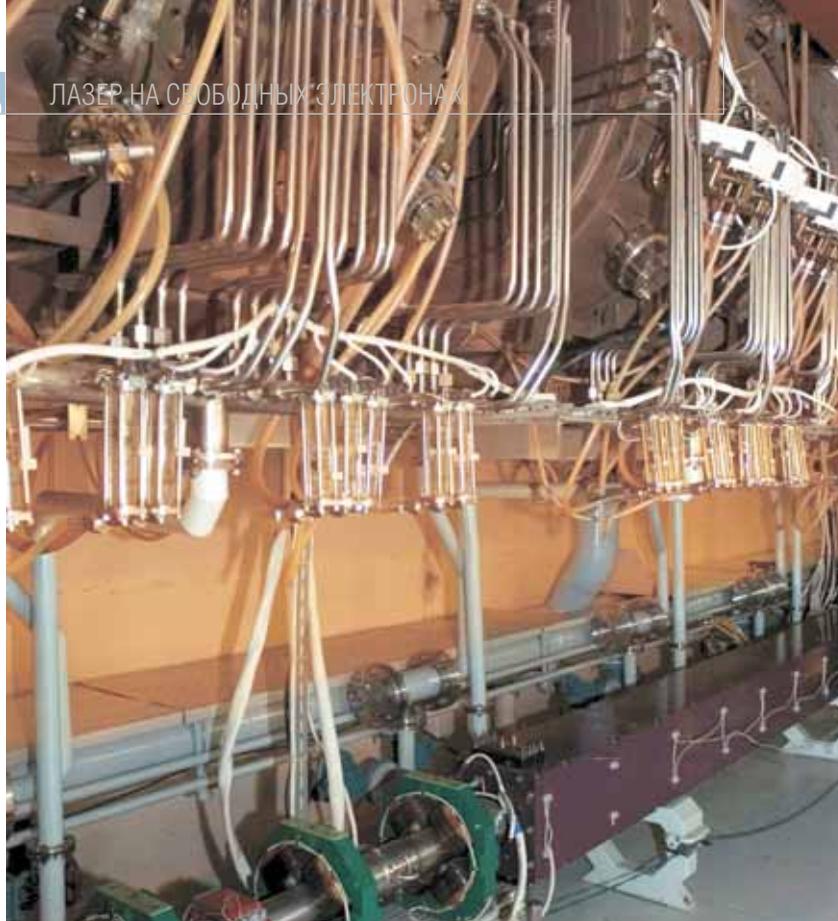


Устройства для преобразования энергии электронов, движущихся почти со скоростью света, в энергию электромагнитного излучения получили название лазеров на свободных электронах (ЛСЭ).

Общепризнанным достоинством этого устройства, выделяющего его среди других лазеров, является возможность получения монохроматического излучения на любой длине волны в беспрецедентно широком диапазоне от 0,1 нм до 1 мм. При этом возможна относительно быстрая перестройка лазера с одной длины волны на другую в интервале до десятков процентов.

Ключевые слова: лазеры на свободных электронах, ускорители заряженных частиц, синхротронное излучение
Key words: free electron lasers, charged particle accelerators, synchrotron radiation

ВИНОКУРОВ Николай Александрович — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск). Специалист в области физики и техники лазеров на свободных электронах (ЛСЭ). Под его руководством созданы не только все ЛСЭ в Новосибирском научном центре, но и самый малогабаритный в мире ЛСЭ для Института атомной энергии в Корею. Более десяти лет представляет Россию в оргкомитете международных конференций по ЛСЭ. Лауреат Международной премии по лазерам на свободных электронах (1991), Премии им. Комптона (1995) и Государственной премии РФ (2010). Награжден орденом Дружбы (2007). Автор и соавтор около 200 научных публикаций, в том числе 150 — в международных изданиях



Первая очередь установки с ЛСЭ, запущенная в апреле 2003 г., в отличие от полномасштабного варианта имеет единственный канал транспортировки электронов

Усилитель излучения

Процесс излучения электрическим зарядом электромагнитной волны можно представить как отрыв части его электрического поля. Это означает, что в пустом пространстве излучают лишь заряды, движущиеся с ускорением, в то время как электрон движется по прямой линии с постоянной скоростью. Чтобы он начал излучать, надо заставить его двигаться волнообразно. Обеспечить такое движение можно, например, с помощью статического электрического или магнитного полей.

Еще в 1947 г. советский физик В. Л. Гинзбург предложил использовать периодическое поле для усиления интенсивности излучения быстрой заряженной частицы и рассчитал параметры такого излучения. Позже было создано устройство под названием *ондулятор*, создающее периодическое магнитное поле для организации особого движения электронов по волнистой траектории вдоль продольной оси прибора. Возникающее при этом усиление электромагнитного излучения составляет суть работы ЛСЭ, а сам усилитель электромагнитного излучения собственно и является лазером на свободных электронах.

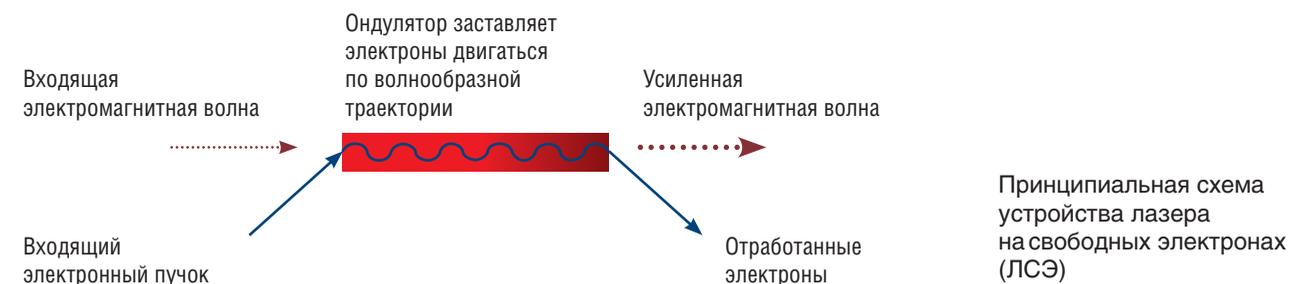
Такое название можно объяснить тем, что в лазерах других типов используется излучение электронов, связанных со своим атомом, или в полупроводниковых лазерах – с кристаллом. Однако и в ЛСЭ электроны не совсем свободны, так как они совершают вынужден-

ные колебания в ондуляторе. Работа любого лазера основана на явлении вынужденного излучения, обусловленного соответствующей синхронизацией отдельных излучателей (электронов, атомов, молекул) внешней усиливаемой волной. В ЛСЭ синхронизация происходит за счет продольной группировки электронов.

К сожалению, электронный коэффициент полезного действия ЛСЭ (доля энергии электронов, преобразуемая в энергию электромагнитного излучения) весьма невысок – не более 1%. Это связано как раз с нарушением условия синхронизма для замедленных электронов пучка.

Циклическая подача излучения с выхода усилителя на его вход может приводить к самовозбуждению усилителя, превращая его в генератор. В случае ЛСЭ усилитель преобразуется в генератор с помощью *оптического резонатора* – двух зеркал, расположенных слева и справа от ондулятора на его продольной оси. Электромагнитная волна циркулирует между зеркалами, усиливаясь при каждом проходе через ондулятор (для компенсации дифракционной расходимости излучения зеркала часто делают вогнутыми).

Рост интенсивности излучения такого генератора, впрочем, имеет свои пределы, обусловленные, например, практически полной группировкой электронов во второй половине ондулятора.



Принципиальная схема устройства лазера на свободных электронах (ЛСЭ)

КАК ЛСЭ УСИЛИВАЕТ СВЕТ

Представим, что в ондулятор входят монохроматическая электромагнитная волна длиной λ и пучок быстрых электронов, равномерно распределенных вдоль продольной оси прибора и движущихся со скоростью v , почти равной скорости света.

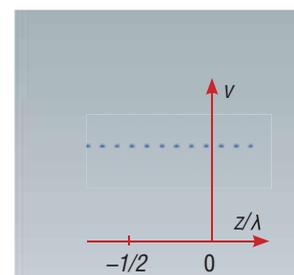
Каждый электрон движется в ондуляторе вдоль слабоволнистой траектории. Для сильного (резонансного) взаимодействия электрона и электромагнитной волны необходимо обеспечить выполнение условия синхронизма: при прохождении одного периода траектории электрон должен отставать от волны ровно на ее длину λ (в силу огромных скоростей величина λ очень мала). Если энергия электронов и длина волны таковы, что удовлетворяется условие синхронизма, то происходит перераспределение энергии частиц.

Сначала средняя энергия электронов не меняется, но происходит ее модуляция, и пучок разбивается

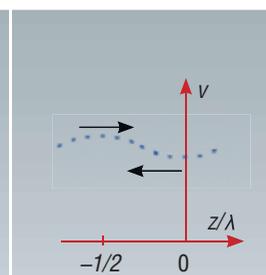
на слои толщиной $\lambda/2$ с чередующимся знаком отклонения энергии от начальной величины.

Однако частицы с меньшей энергией летят медленнее, а с большей – быстрее. В результате «быстрые» слои догоняют «медленные», что приводит к модуляции плотности электронов примерно с периодом λ .

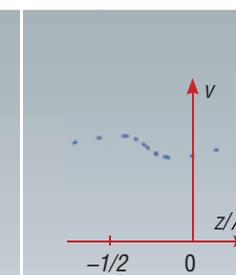
Во второй половине ондулятора повторяется то же самое: замедление и ускорение чередующихся слоев, но теперь энергию теряют слои с большей плотностью частиц, а приобретают слои – с меньшей. При этом средняя энергия электронов падает и в соответствии с законом сохранения энергии мощность электромагнитной волны растет. Вот таким образом ЛСЭ усиливает электромагнитное излучение, используя энергию быстрых электронов



На входе в ондулятор все частицы имеют одинаковую скорость и равномерное продольное распределение



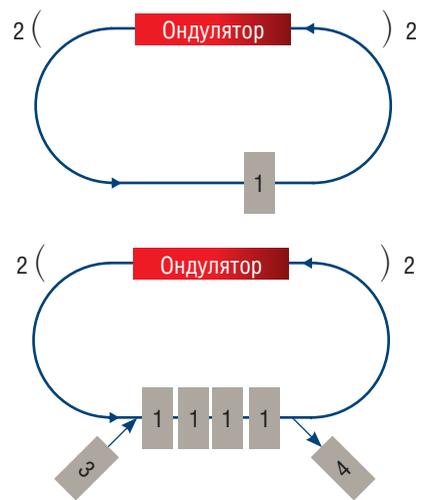
В средней части ондулятора одни частицы теряют энергию, другие – приобретают; их продольное распределение начинает меняться из-за различия в скоростях



Во второй половине ондулятора из-за относительного сдвига частиц образуются области их уплотнения и разрежения (вблизи $-1/4$ и $+1/4$ соответственно)

В ондуляторе под действием попутной электромагнитной волны меняется скорость электронов, что отражается на их продольном распределении

λ – длина волны;
 z – продольная координата электрона;
 v – скорость электрона



Стандартные схемы установки с ЛСЭ на базе электронного накопителя (вверху) и ускорителя-рекуператора. Стрелками показана траектория движения электронов. 1 – высокочастотный резонатор, 2 – зеркала оптического резонатора, 3 – источник электронов низкой энергии, 4 – поглотитель замедленных электронов

ПОГОНЩИКИ ЭЛЕКТРОНОВ

Для хорошей работы ЛСЭ требуется высокоэнергетический электронный пучок с малыми поперечными размерами и небольшим разбросом по скоростям. Такие пучки можно получить только на электронных ускорителях, являющихся самой сложной, габаритной и дорогостоящей частью установок с ЛСЭ. Размеры современного электронного ускорителя могут составлять сотни метров, а его энергопотребление – десятки мегаватт. Из-за низкого электронного КПД ЛСЭ желательно возвращать энергию отработанных электронов в ускоряющую систему. В установках с ЛСЭ используются два типа ускорителей.

К одному из них относятся широко используемые в фундаментальных научных исследованиях *электронные накопители*, в которых электроны движутся вдоль замкнутой траектории (орбиты). При этом электрон может оставаться в накопителе несколько часов (время жизни ограничено рассеянием на молекулах остаточного газа, который всегда есть в вакуумной камере накопителя). Такие ускорители применяются в экспериментах по физике элементарных частиц и для генерации рентгеновского излучения.

При использовании накопителя пучок электронов, отдавший часть энергии в ондуляторе ЛСЭ, проходит через поворотные магниты ускорителя и снова возвращается в ЛСЭ для повторного использования. Поскольку при

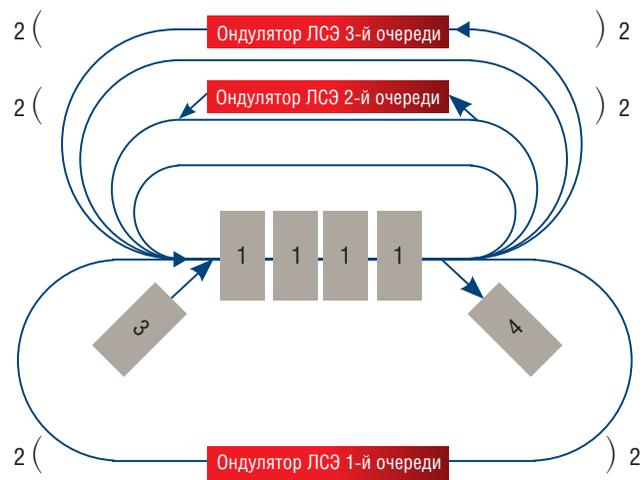
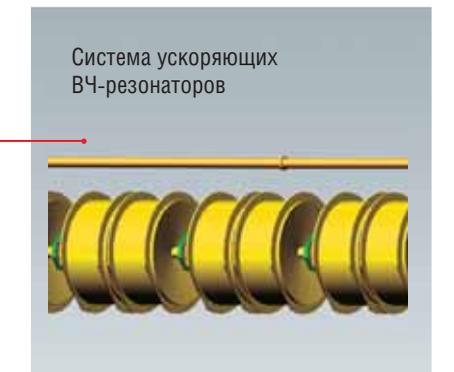
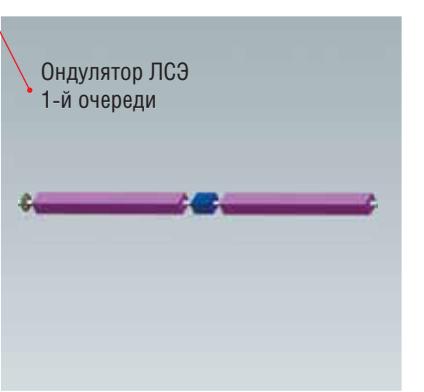
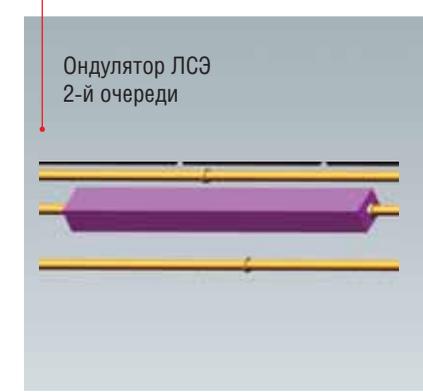
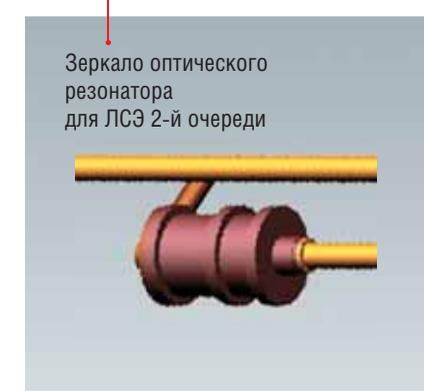
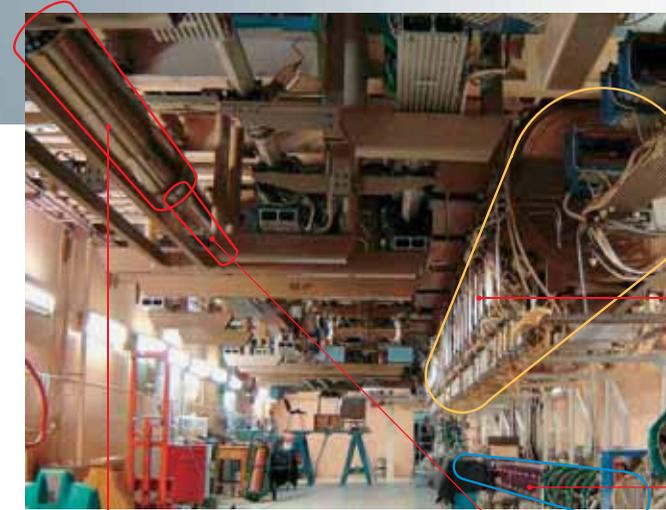
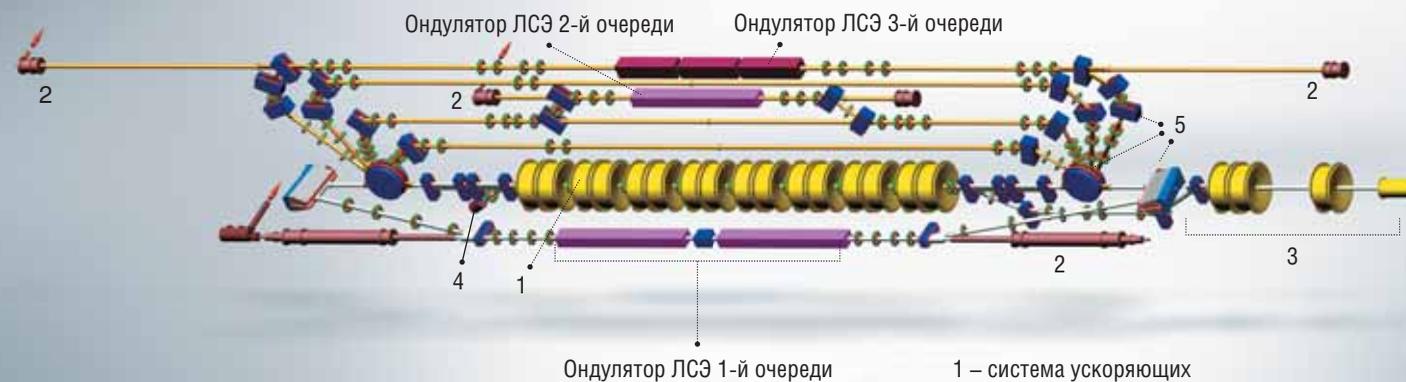


Схема (вверху) и общий вид (справа вверху) ► полномасштабной установки Сибирского центра фотохимических исследований. Замкнутыми линиями на схеме показаны электронно-оптические каналы транспортировки электронов (стрелки указывают направление)

взаимодействии с излучением в ондуляторе одни частицы ускоряются, а другие – замедляются, каждый проход через ЛСЭ приводит к нарастанию энергетического разброса электронного пучка. Хотя средняя потеря энергии излучающими электронами восполняется высокочастотным (ВЧ) резонатором с продольным электрическим полем, растущий энергетический разброс частиц ограничивает среднюю мощность излучения ЛСЭ на базе накопителя несколькими ваттами.

Для повышения мощности излучения ЛСЭ в 1978 г. А. Н. Скринский и Н. А. Винокуров предложили применить так называемый *ускоритель-рекуператор (УР)*. При использовании такого ускорителя пучок электронов ускоряется в нескольких стоящих друг за другом ВЧ-резонаторах, отдает часть своей энергии в ондуляторе ЛСЭ, после чего замедляется в тех же ВЧ-резонаторах, возвращая энергию, затраченную на его ускорение. Применение УР позволяет получать большие средние токи электронов и существенно снижает радиационную опасность установки.

Современные лазеры на свободных электронах, использующие УР, генерируют излучение со средней мощностью более 10 кВт. Теоретически обоснована возможность применения таких установок для получения излучения со средней мощностью более 100 кВт



На полномасштабной установке, генерирующей излучение для Сибирского центра фотохимических исследований, планируется иметь три ЛСЭ на базе единого ускорителя-рекуператора. Режим работы установки регулируется простым переключением поворотных магнитов

Инструмент познания

Для Института ядерной физики СО РАН создание ускорителей заряженных частиц является одной из основных и традиционных тематик, поэтому его устойчивый интерес к разработке ЛСЭ при наличии такой мощной базы вполне понятен.

Работы по созданию лазеров на свободных электронах начали проводиться в институте с 1977 г., когда А. Н. Скринский и Н. А. Винокуров предложили модификацию ЛСЭ (*оптический клистрон*), значительно повысившую усиление прибора по сравнению с классической схемой. В процессе разработки новых ЛСЭ в ИЯФе впервые в мире заработал ондулятор на постоянных магнитах с регулировкой амплитуды магнитного поля при помощи изменения рабочего зазора, а спустя несколько лет появились гибридные ондуляторы на постоянных магнитах. Как переменный зазор, так и гибридная конструкция ондуляторов сейчас стали общепринятыми и применяются на всех источниках синхротронного излучения.

Реализованная в 1988 г. оригинальная конструкция ондулятора большой длины в оптическом клистроне на накопителе ВЭПП-3 оказалась настолько удачной, что неоднократно использовалась позже в различных отечественных и зарубежных установках, а нам позволила получить излучение рекордно короткой (для ЛСЭ) длины волны 0,24 мкм в ультрафиолетовом диапазоне и небывало узкого (10^{-6}) спектра. Кстати, этот рекорд продержался более 10 лет.

Важнейшим этапом развития ЛСЭ в новосибирском Академгородке стала организация Сибирского центра фотохимических исследований на базе Института химической кинетики и горения СО РАН, который в начале девяностых годов возглавлял академик Ю. Н. Молин.

В институте к тому времени давно работала лаборатория лазерной фотохимии под руководством А. К. Петрова, сотрудники которой активно поддержали идею коллективного использования учеными различных специальностей излучения мощной лазерной установки на быстрых электронах, способной легко варьировать

его параметры в широких пределах. Несмотря на известные трудности переходного десятилетия и благодаря энтузиазму участников проекта, ЛСЭ 1-й очереди с длинами волн в диапазоне 120–240 мкм был запущен в 2003 г. Отмечу, что его средняя мощность 500 Вт является мировым рекордом для источников излучения в терагерцовом диапазоне частот.

Год назад начал работать ЛСЭ 2-й очереди. На этом лазере получено когерентное излучение с длинами волн в диапазоне 40–80 мкм с наибольшей в мире средней мощностью – около 500 Вт. В этом году излучение ЛСЭ 2-й очереди стало доступно ученым для проведения экспериментов в различных областях науки.

Генерируемое установкой лазерное излучение по каналу с сухим азотом доставляется к пользовательским станциям, на которых оно используется сотрудниками академических институтов и Новосибирского государственного университета для проведения исследований по физике твердого тела, химии и биологии, в том числе на наноструктурном уровне. Сейчас работает шесть таких экспериментальных станций.

Использование мощного субмиллиметрового излучения с перестраиваемой длиной волны в качестве уникального исследовательского инструмента открывает перед учеными принципиально новые возможности и перспективы. Скажем, сотрудниками трех институтов СО РАН совместно разработан метод «мягкой абляции» для исследования биологических макромолекул (например, ДНК), использующий малость энергии фотона субмиллиметрового излучения. Энергия фотона настолько мала, что излучение не разрушает исследуемую молекулу и более того – сохраняет ее биологическую активность.

На ближайшее будущее планируется дальнейшее повышение мощности излучения действующих лазеров и размещение на установке ЛСЭ 3-й очереди с длинами волн в ближнем инфракрасном диапазоне 5–30 мкм. Планов в этой интересной и перспективной области познания всегда много.

БУДУЩЕЕ НЕ ВСПОМНИТЬ

Благодаря высокой яркости излучения из длинного ондулятора на электронном накопителе ВЭПП-3 удалось провести цикл уникальных экспериментов по изучению влияния квантовых флуктуаций на движение одного циркулирующего в накопителе электрона. Было показано, что это движение таково, как если бы оно было вызвано действием случайной силы, и схоже с броуновским движением малой частицы в жидкости. Однако причины случайности этих процессов кардинально различаются.

Траектория броуновского движения не является истинно случайной, поскольку при знании начальных скоростей молекул жидкости в принципе можно рассчитать и движение самих молекул, и движение частицы под их ударами. «Случайность» броуновского движения связана с нашим незнанием этих микроскопических параметров системы. В случае движения электрона все необходимые для расчета параметры известны, но при этом движение электрона принципиально непредсказуемо. Проведенные эксперименты дают один из немногих примеров истинно случайного процесса, который, в частности, доказывает принципиальную непредсказуемость будущего, демонстрируя, что «Бог играет в кости»

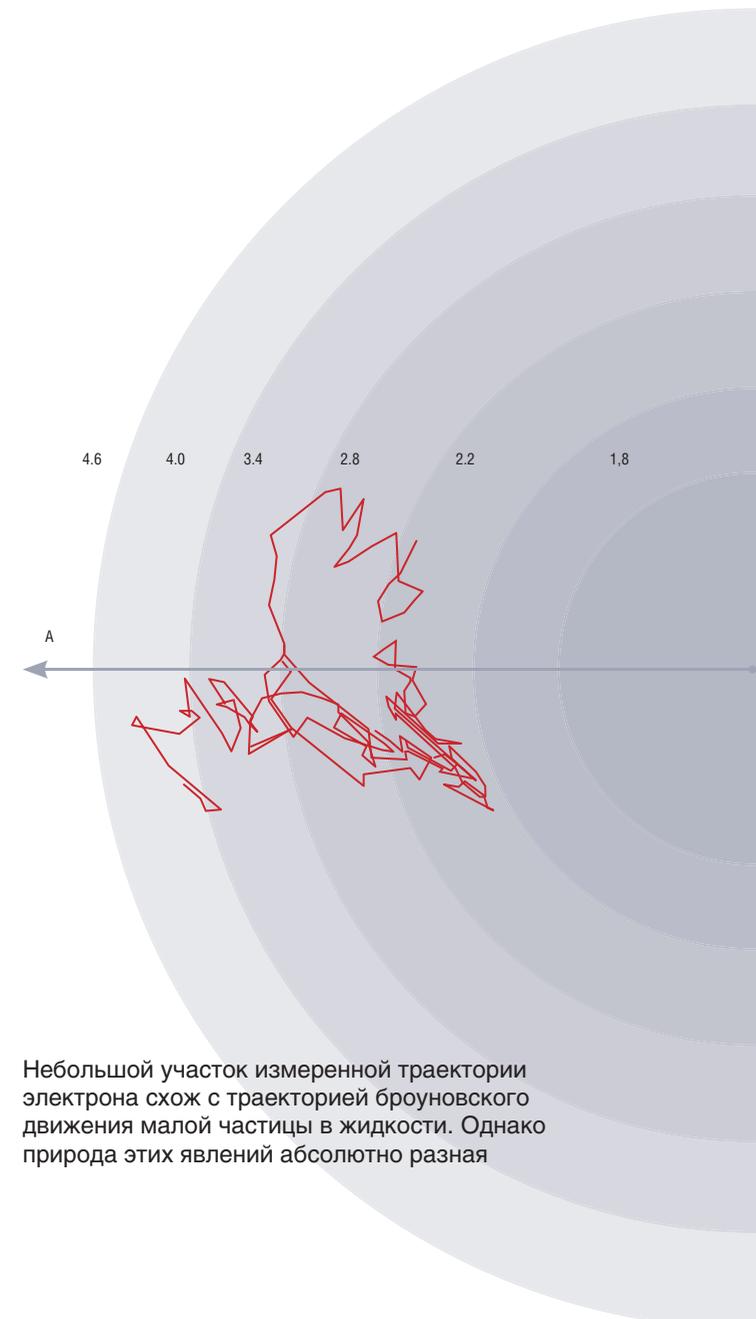
Литература

Маршалл Т. Лазеры на свободных электронах / Пер. с англ. М.: Мир, 1987.

Агафонов А. В., Лебедев А. Н. Лазеры на свободных электронах. М.: Знание, 1987.

Кулипанов Г. Н. Изобретение В. Л. Гинзбургом ондуляторов и их роль в современных источниках синхротронного излучения и лазерах на свободных электронах // Успехи физических наук. 2007. 177, С. 384

Brau C. Free-Electron Lasers. Boston: Academic Press, Inc., 1990.



Небольшой участок измеренной траектории электрона схож с траекторией броуновского движения малой частицы в жидкости. Однако природа этих явлений абсолютно разная