

НА ОБЩЕМ СОБРАНИИ СО РАН

# Лазеры на свободных электронах: новый этап развития

В Новосибирском научном центре создан уникальный источник когерентного электромагнитного излучения — лазер на свободных электронах (ЛСЭ). Рекордно высокая мощность сибирского ЛСЭ (0,5 кВт) обусловлена использованием оригинального ускорителя-рекуператора электронов со средним током пучка 30 мА. Запуск второй очереди ЛСЭ существенно расширил спектр мультидисциплинарных исследований, проводимых с использованием лазерного излучения в Сибирском центре фотохимических исследований СО РАН.

Человечество научилось использовать в своей повседневной жизни широкий спектр электромагнитного излучения. Неотъемлемой частью нашей действительности стали радио, телевидение, сотовые телефоны, микроволновые печи, рентгеновская диагностика. С другой стороны, каждый раз освоение нового спектрального диапазона, появление новых источников излучения приводило к новому пониманию окружающего нас мира. В частности, исследования в области ультрафиолетовой и мягкой рентгеновской спектроскопии привели к созданию квантовой механики. Новые возможности перед наукой открывают синхротронное излучение и лазеры на свободных электронах.

В чём заключается основное достоинство лазеров на свободных электронах? ЛСЭ позволяют получать монохроматическое излучение на любой заданной длине волны (от 0,1 нм до 1 мм, т.е. семь порядков) и плавно её перестраивать. Средняя мощность излучения может быть порядка 100 кВт при сохранении дифракционного качества источника излучения. Это объясняется тем, что в ЛСЭ отсутствует лазерная среда, которая имеет обыкновение портиться при повышении мощности — она нагревается, появляются градиенты плотности... Лазерная среда ЛСЭ — релятивистские (т.е. высокой энергии) электроны, поэтому проблем с сохранением дифракционного качества здесь не существует.

В основе работы ЛСЭ лежит явление вынужденного ондуляторного излучения. Ондулятор — это магнитная система, создающая пространственно-периодическое знакопеременное поперечное магнитное поле. В таком поле релятивистские электроны движутся по слабоизогнутой синусоидальной либо спиральной траектории.

Ондулятор впервые был предложен будущим Нобелевским лауреатом В.Л. Гинзбургом в 1947 году. Затем в 1951 г. американец Г. Мотц поставил ондулятор под линейный ускоритель, а Р. Филипс уже в 1960-х сделал первый вариант лазера на свободных электронах, который назывался «убитроном». Но изобретение обычных лазеров в 60-е годы и плохое в то время качество электронных пучков остановило эти работы. Р. Филипс перестал получать финансирование от Министерства обороны Соединённых Штатов, поскольку все средства были пущены на обычные лазеры. Это надолго задержало развитие нового направления.

Серьёзный вклад в развитие идеи создания генераторов коротковолнового электромагнитного излучения на базе релятивистских электронных пучков внесли многие выдающиеся учёные. Андрей Викторович Гапонов в 1959 г. разработал гиротрон — самый мощный в мире источник миллиметрового излучения (1 мегаватт непрерывной мощности). Эти устройства, в частности, используются для нагрева электронов в ТОКАМАКАх. Пётр Леонидович Капица в 1961 г. изобрёл оротрон. В числе тех, кто занимался когерентным синхротронным излучением — академики Л.А. Арцимович и И.Я. Померанчук. Хорошую работу на эту тему в 1945 г. сделал Р. Фейнман, а Александр Михайлович Прохоров в 1956 г. занимался поиском когерентного синхротронного излучения на синхротроне в ФИАНе.

Для обеспечения работы ЛСЭ необходимо соблюдение условия синхронизма движения электронов и электромагнитной волны вдоль ондулятора — нужно, чтобы на каждом периоде ондулятора электроны отставали от электромагнитной волны ровно на одну длину волны. Благодаря этому, в зависимости от фазы влёта электронов, одна их половина увеличивает свою энергию, вторая — уменьшает. Это приводит к модуляции энергии электронов вдоль густка с периодом электромагнитной волны, затем модуляция энергии за счёт зависимости скорости электронов от энергии переходит в модуляцию плотности. Можно сказать, мы получаем пучок электронов, «нарезанный» на тонкие ломтики, причём поперечный размер электронного пучка больше периода продольной «нарезки» в  $10^3$ — $10^6$  раз! Такого эффекта позволяет достигнуть только очень высокое качество пучка. А поскольку микросгустки электронов расположены друг от друга на расстоянии длины электромагнитной волны, то реализуется когерентное излучение электронов, которое интенсивнее ондуляторного в  $10^6$ — $10^7$  раз.

Работы по анализу возможного усиления инфракрасного излучения электронным пучком в ондуляторе начали американские учёные (Р. Пантелл с соавторами и группа Дж. Мэйди) в конце 1960-х годов. Первые эксперименты по усилению и генерации инфракрасного излучения электронным пучком были проведены в Стэнфорде командой Дж. Мэйди. В 1974 г. он взял патент, где назвал это устройство очень красивым именем — лазер на свободных электронах. По сравнению с «убитроном» это звучит куда более ярко. После этого эти устройства по-другому никто и не называет.

С тех пор как в первых работах был продемонстрирован коэффициент усиления порядка 4%, стало ясно, насколько это перспективный метод. В Институте ядерной физики В.Н. Байером и А.И. Мильштейном был проведён анализ, как это устройство может работать. Потом Н.А. Винокуров и А.Н. Скринский предложили модификацию лазера на свободных электронах — оптический клистрон. Работа Н.А. Винокурова и А.Н. Скринского «О предельной мощности оптического клистрона» (1977 г.) фактически открыла новое направление, связанное с созданием лазера на свободных электронах на базе ускорителей-рекуператоров. А работы Я.С. Дербенёва, А.М. Кондратенко и Е.Л. Салдина (1980 г.) открывают сейчас лист публикаций



по рентгеновским лазерам на свободных электронах — это были первые публикации в мире.

Параллельно мы начали экспериментальные работы. В 1977—1985 гг. были реализованы оптический клистрон, первый в мире ондулятор на постоянных магнитах с изменяемым зазором, первые в мире гибридные ондуляторы на постоянных магнитах. В 1985—1994 гг. был создан ЛСЭ видимого и ультрафиолетового диапазона на базе накопителя электронов ВЭПП-3. Для этого ЛСЭ был предложен и сделан электромагнитный ондулятор с оригинальной конструкцией обмотки. На этой установке были опробованы внутривиброизлучающий эталон Фабри-Перо, конфокальный резонатор, а в 1986 г. была получена рекордно короткая для ЛСЭ длина волны 0,24 мкм. Только через 10 лет в Японии, а потом в США этот мировой рекорд смогли превзойти (0,21 и 0,19 мкм). В эти же годы в Новосибирске был предложен и экспериментально проверен метод вывода излучения из оптического резонатора ЛСЭ (т.н. электронный вывод), позволяющий получать выходную мощность более 10 кВт.

Электронный КПД лазеров на свободных электронах довольно низок (около 1%), поэтому в мощных ЛСЭ необходимо применять рекуперацию энергии отработанного электронного пучка. Этот принцип с успехом используется в терагерцевом (субмиллиметровом) ЛСЭ, который работает в Новосибирске с 2003 г. В нашем ускорителе-рекуператоре электроны из инжектора с энергией 2 МэВ ускоряются в высокочастотных резонаторах до энергии 11 МэВ, отдавая часть энергии в ЛСЭ, а затем замедляются в тех же ВЧ резонаторах. При этом энергия возвращается в резонаторы, а электроны с низкой (2 МэВ) энергией отводятся в поглотитель. Рекуперация снижает радиационную опасность установки и позволяет повысить средний ток электронного пучка.

В настоящее время в Сибирском центре фотохимических исследований, созданном совместными усилиями Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН и Института химической кинетики и горения СО РАН, работают два мощных ЛСЭ терагерцевого и дальнего ИК диапазонов. Сегодня полностью перекрыт диапазон от 300 мкм до 40 мкм. Строится третья очередь ЛСЭ. Полный диапазон перестройки длин волн излучения трёх лазеров, установленных на 1-й, 2-й и 4-й дорожках полномасштабного ЛСЭ, будет составлять от 5 до 250 микрон. В основе своей полномасштабный проект имеет четырёхдорожечный ускоритель-рекуператор с максимальной энергией 40 МэВ. Эта установка предоставляет научным учреждениям России возможность проведения уникальных исследований с использованием терагерцевого излучения (область оптического спектра между дальним инфракрасным и микроволновым излучениями с длиной волны от 100 до 300 мкм). По средней мощности излучения (0,5 кВт) новосибирский ЛСЭ значительно превосходит аналогичные зарубежные установки в своих диапазонах длин волн (40—80 и 110—240 микрон).

Почему в последние годы возник столь большой интерес к терагерцевому излучению? Во-первых, раньше про-

сто не существовало его источников (как известно, икра не пользовалась спросом, когда её не было в продаже). Во-вторых, терагерцевое излучение обладает уникальными возможностями.

Терагерцевое излучение — это неионизирующее излучение с энергией фотонов  $100^{-1}$  миллиэлектрон-вольт. Оно хорошо проходит мутные среды и мелкодисперсные материалы из-за подавления рэлеевского рассеяния. Терагерцевое излучение — это область вращательных спектров молекул, колебаний биологически важных коллективных мод ДНК и белков, колебаний твёрдотельной плазмы. Атомные спектры возбуждённых Ридберговских состояний также лежат в терагерцевом диапазоне. Это область водородных связей и Ван-дер-Ваальсовских сил межмолекулярного взаимодействия. Энергия фотонов терагерцевого излучения совпадает с областью энергетической щели сверхпроводников. По этим причинам терагерцевое излучение интересно не только физикам, но и химикам, и биологам.

Тематика экспериментов, осуществляемых в Сибирском центре фотохимических исследований, постоянно расширяется. Одной из первых демонстраций большой мощности нашего ЛСЭ были опыты по абляции оргстекла несфокусированным субмиллиметровым излучением ЛСЭ. Несфокусированный пучок насквозь просверливает 50-мм кубик за 3 минуты. Горения при этом не наблюдается. Высокая частота повторения позволяет исследовать механизм абляции в ранее недостижимых условиях. С помощью этого метода возможно эффективное производство наноматериалов — излучение позволяет выбивать с поверхности частицы строго заданного размера.

Биологи ИЦиГ добились серьёзных успехов в ультрамягкой лазерной абляции ДНК. Низкая энергия терагерцевого кванта не разрушает ковалентные связи и позволяет отделять биологические макромолекулы без разрушения их структуры.

Специалисты ИХКиГ СО РАН занимаются молекулярной спектроскопией с использованием излучения ЛСЭ. Одна из задач — обнаружение радикалов ОН в водородном пламени по эффекту Фарадея.

Необходимо, правда, отметить и недостатки ЛСЭ: большой размер и высокую стоимость. Поэтому адекватные области их применения — это исследовательские центры на базе уникальных ЛСЭ и технологические центры на базе мощных (100—1000 кВт) ЛСЭ, обеспечивающих малую стоимость киловатт-часа излучения.

Сегодня ЛСЭ субмиллиметрового диапазона работают в России (ИЯФ СО РАН), Голландии (FELIX), США (UCSB), Южной Корее (KAERI), Франции (CLEO), Японии и других местах. Рентгеновские лазеры есть в США (LCLS) и Германии (FLASH). Новые рентгеновские ЛСЭ строятся в Японии, Германии, Италии, Англии, Китае и Южной Корее.

Самый компактный из них построен ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН для KAERI (Ю. Корея). Его размеры: 3х4 метра и мощность в районе ватта. А самый большой рентгеновский лазер SLAC работает в США. Его длина — 1 километр, а строительство обошлось в 400 млн долларов без учёта уже готового линейного ускорителя. В Гамбурге в настоящее время строится лазер стоимостью 1 млрд 250 млн евро.

Всё изложенное выше — иллюстрация тезиса, что за последние десятилетия мировая наука претерпела большие качественные изменения. Практически во всех развитых странах построены и продолжают создаваться установки, которые сейчас называются установками «mega-science», являющиеся инфраструктурой всей современной науки, как фундаментальной, так и прикладной. К таким установкам относятся лазеры на свободных электронах, источники синхротронного излучения и нейтронные источники, сверхмощные импульсные лазеры, лаборатории сверхвысоких магнитных полей, астрофизические лаборатории и т.п. На их базе развиваются химия, биология, физика твёрдого тела, материаловедение.

Вокруг современных центров «mega-science», как правило, складывается уникальная научная инфраструктура, позволяющая эффективно использовать дорогостоящее время их работы. Очень важно и то, что каждый из источников излучения, работая ежегодно 5—7 тысяч часов, одновременно обслуживает большое число экспериментальных групп (20—60) из различных областей науки. В центрах «mega-science» в мире ежегодно проводят эксперименты более 50 тысяч человек, защищают дипломные работы 20—30 тысяч студентов. Существующие и создаваемые источники излучения являются эффективными фабриками производства новых знаний, новых технологий, новых материалов.

Россия пока почти не участвует в создании собственной базы «mega-science», финансируя, однако, крупные международные проекты. Правда, в этом году работа ИЯФ СО РАН была замечена Президентом России, и Николаю Александровичу Винокурову была вручена Государственная премия РФ в области науки и технологии за создание лазеров на свободных электронах. Я надеюсь, что следующим шагом будет осознание того, что надо не только давать научным сотрудникам премии, но и вкладывать большие деньги в создание инфраструктуры науки в Российской Федерации.

Академик Г.Н. Кулипанов  
На снимке В. Винокуров

— лауреат Государственной премии РФ Н.А. Винокуров ведёт экскурсию по ЛСЭ для новосибирских журналистов.