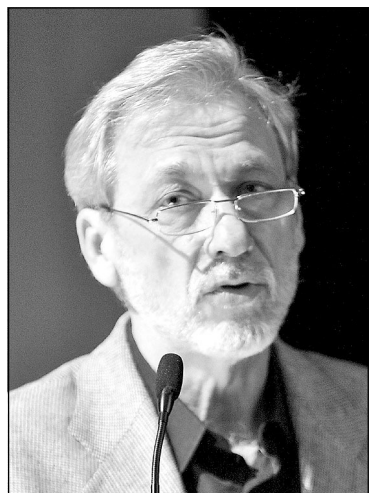


НА ОБЩЕМ СОБРАНИИ СО РАН

# Экзаваттные лазеры: история развития

С подробным сообщением о новом этапе развития физики — экзаваттных лазерных системах — на научной сессии Общего собрания СО РАН выступил заведующий лабораторией физики лазеров сверхкоротких импульсов к.ф.-м.н. Е.В. Пестряков.



После бурного рывка в самом начале зарождения лазерной физики как науки последовал долгий период, когда продвижения вперёд почти не наблюдалось, так как мощность лазеров достигла определённой величины, которую стало возможно изменить только после того, как была введена новая элементная база и появились новые принципы усиления импульсов короткой длительности. Тогда предельной короткой длительностью импульса были фемтосекунды. Импульсы генерировались лазерами на красителях, а продвижение в область высоких энергий сдерживалось отсутствием ак-

тивных сред, выдерживающих высокие плотности мощности. Был предложен метод усиления импульсов, который состоит в том, что импульс сначала расширяется с помощью стретчера, потом усиливается, затем сжимается с помощью компрессора, имеющего дисперсию, обратную той, которую имеет стретчер.

Второе направление связано с появлением новой активной среды — титан-сапфира, который обладает уникальными свойствами. Ширина полосы такой среды находится в районе 220 нанометров, что позволяет усиливать импульс до 3 фемтосекунд, и эта среда настолько хороша по оптическим качествам, что она до сих пор занимает лидирующее место в фемтосекундных лазерах.

Для фемтосекундных лазеров исследовались также такие среды как хризоберилл. Эти работы велись совместно с ИГиГ СО АН СССР (середина 80-х гг.), а затем с Институтом геологии и минералогии. В качестве активной среды также использовался двухвалентный титан, и была получена генерация импульса, показавшая, что такая среда не уступает титан-сапфиру, но её матрица сложнее в подготовке, и невозможно добиться таких же физических данных, как у сапфира. Поэтому хризоберилловая среда отошла на второй план, и сейчас основной средой является именно титан-сапфир.

Разработка новых активных сред для ла-

зеров и новых методов усиления импульсов позволила исследователям достичь диапазона такой интенсивности, которая называется релятивистской ( $10^{18}$  Вт). Релятивистские интенсивности получаются с помощью лазеров тераваттного, мультитераваттного и петаваттного диапазонов. Пиковая мощность таких лазеров —  $10^{15}$  Вт в петаваттном лазере. Такие интенсивности позволяют говорить о новых физических явлениях — например, о получении экстремальных состояний вещества. Если облучать твёрдую мишень с помощью фемтосекундного лазера, наблюдается явление так называемого холодного плавления. Возникает резкое возращание температуры и давления внутри фокуса, и при этом не происходит изменение его объёма. Такие эксперименты позволяют изучать процессы, происходящие в звёздах.

Подобные интенсивности позволяют генерировать импульсы аттосекундной ( $10^{-18}$  сек) длительности. Вопрос о генерации аттосекундных импульсов стал актуален, поскольку существуют широкие возможности применения их в изучении динамики электронов атомах и молекулах. Аттосекундные импульсы могут быть получены при генерации высших гармоник в газовых средах, при взаимодействии излучения фемтосекундного лазера с газовой средой или при облучении твердотельной мишени. Можно утверждать, что такая техника открывает новую

эру в физике и химии, и мы можем говорить уже об аттофизике и аттохимии.

В настоящее время речь может идти о вторжении в область ультрарелятивистских интенсивностей, создающих принципиально новый режим взаимодействия между светом и веществом, но для этого необходимо создать лазеры экзаваттной ( $10^{18}$  Вт) и зеттаваттной ( $10^{21}$  Вт) мощности. А чтобы создать такие системы, необходимо перейти к многоканальной схеме создания этих источников, в которых бы всё контролировалось оптическими часами для того, чтобы когерентность канала была выверена с точностью до сложения полей. Сложение полей в такой системе позволяет выйти на уровень мощности  $10^{26}$ – $10^{27}$  Вт и планировать создание систем мультитераваттной и экзаваттной мощности, переходя к постановке экспериментов по вскипанию вакуума и связанных с ним релятивистских эффектов.

В настоящее время можно назвать такие современные системы как тераваттная в Институте лазерной физики СО РАН (г. Новосибирск), в Сарове и Институте прикладной физики в Нижнем Новгороде, и петаваттная система, которая развивается сейчас в Германии. Все они построены на линейном принципе усиления. ИЛФ разрабатывает экзаваттную систему в сотрудничестве с рядом институтов, сформировав коллектив, который активно занимается этой проблемой.

## ФОТОНЫ ПОШТУЧНО

В своем выступлении д.ф.-м.н. В.А. Гайслер (ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН) рассказал о быстродействующих лазерах и излучателях одиночных фотонов с вертикальным резонатором.

Лазеры с вертикальным резонатором (ЛВР) — наиболее миниатюрные, экономичные и быстродействующие лазеры. Они являются рекордсменами по этим параметрам не только среди полупроводниковых лазеров, но и неоспоримо лидируют в области всей лазерной техники: объем резонатора может составлять несколько кубических длин волн, пороговые токи генерации могут быть на уровне ~ 10 мкА, а частота токовой модуляции способна достигать десятков гигагерц.

Вертикальный резонатор, как правило, формируется в едином технологическом процессе выращивания полупроводниковой гетероструктуры, содержащей два полупроводниковых брэгговских зеркала. Ось резонатора ориентирована вертикально по отношению к плоскости полупроводниковой структуры. Вертикальные резонаторы характеризуются малым размером и обеспечивают эффективную локализацию энергии электромагнитной волны как в аксиальном, так и в латеральном направлениях.

Структура лазера с вертикальным резонатором относится к числу наиболее сложных и прецизионных полупроводниковых структур, разработанных к настоящему моменту. Число различных полупроводниковых слоев нанометровой толщины в такой структуре может достигать и даже превышать 1000, при этом точность задания толщины слоев должна быть не хуже 1 %. Технология выращивания этих структур методом молекулярно-лучевой эпитаксии успешно развивается в ИФП на протяжении последних 10 лет.

Одна из уникальных характеристик ЛВР — высокое быстродействие, что позволяет использовать его в оптических высокоскоростных системах передачи информации. К настоящему времени с использованием ЛВР продемонстрирована скорость передачи данных 40 Гбит/с, что является мировым рекордом, однако это ещё не предел потенциала данного типа излучателей. Другая особенность ЛВР — возможность изготовления матриц, содержащих десятки и сотни излучателей, а это уже открывает перспективы разработки сверхмощных оптических систем передачи данных, обеспечивающих скорости на уровне терабит в секунду.

Использование ЛВР в оптических системах передачи данных — важнейшее, но не единственное применение этих лазеров. Дру-

гая интересная возможность применения ЛВР — его использование в миниатюрных атомных стандартах частоты. В миниатюрных атомных стандартах частоты нового поколения (Chip-scale atomic clock, CSAC) резонансные лампы заменяются на сверхминиатюрные полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором (ЛВР), что открывает перспективы создания нового класса приборов — атомных стандартов частоты с малым весом (десятки грамм), размерами (сантиметры) и малым энергопотреблением (десятки милливатт). Это позволит существенно улучшить характеристики большого числа телекоммуникационных и навигационных устройств. В ИФП СО РАН в течение последних двух лет разработаны экспериментальные образцы одномодовых ЛВР с длиной волны излучения ~ 795 нм, соответствующей переходу  $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$  атомов  $Rb^{87}$ . Характеристики разработанных ЛВР соответствуют требованиям, предъявляемым к излучателям для миниатюрных атомных стандартов частоты на основе  $Rb^{87}$ ; разработанные лазеры могут быть использованы для создания экспериментальных миниатюрных атомных стандартов частоты.

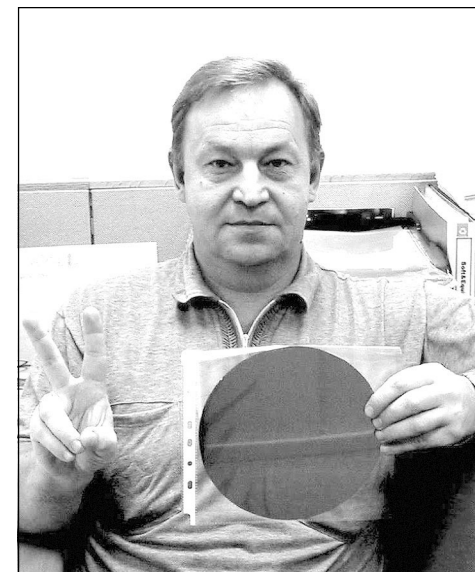
Вторая часть доклада посвящена излучателям одиночных фотонов (ИОФ). ИОФ, конечно же, не лазер — одиночному фотону не с чем находиться в когерентных взаимоотношениях. Но создание полупроводниковых ИОФ было бы немислимо без ЛВР.

Излучатель одиночных фотонов (или одnofотонный излучатель) — это абсолютный предел миниатюризации излучателей света. Определим, что он представляет собой: излучатель одиночных фотонов — это фотонный источник, в котором под действием управляющего сигнала (и только под действием этого сигнала) излучается один (и только один) фотон. Излучение ИОФ характеризуется неклассической суб-пуассоновской статистикой, а идеальный излучатель одиночных фотонов генерирует однофотонные фокковские состояния (световой поток с нулевым шумом). ИОФ может быть реализован только на основе изолированной квантовой системы: одиночного атома, молекулы, искусственного атома (полупроводниковой квантовой точки). Создание эффективных ИОФ представляет собой сложнейшую научно-техническую проблему, включающую в себя решение трёх задач: локали-

зации, изоляции квантовой системы; эффективной накачки изолированной квантовой системы; сбора излучения.

Излучатели одиночных фотонов могут найти применение в системах квантовой криптографии и квантовых вычислений. Они также необходимы для прецизионной спектроскопии и создания эталонов оптической мощности. К настоящему моменту однофотонное излучение (с оптической лазерной накачкой) продемонстрировано на целом ряде объектов: одиночных атомах и ионах, одиночных молекулах, центрах окраски и одиночных полупроводниковых квантовых точках. Достоинством полупроводниковых квантовых точек является возможность создания излучателя одиночных фотонов с токовой накачкой в виде сверхминиатюрного светодиода, т.е. полностью твердотельного компактного излучателя. Такой излучатель реализован в Институте физики полупроводников СО РАН совместно с берлинским Институтом физики твёрдого тела (ФРТГ). ИОФ содержит брэгговский вертикальный микрорезонатор, который используется для увеличения внешней квантовой эффективности, и слой квантовых точек InGaAs низкой плотности. На одном квадратном микроне в среднем размещается одна квантовая точка. Инжекция тока в слой с квантовыми точками осуществляется через оксидную апертуру с субмикронным внутренним диаметром, что обеспечивает токовое возбуждение лишь одной квантовой точки. Спектр излучения содержит единственную узкую линию, отвечающую рекомбинации экситона, локализованного в одиночной квантовой точке.

Таким образом, все три задачи по созданию эффективного ИОФ, сформулированные выше, удается решать в рамках полупроводниковых нанотехнологий. Анализ статистики фотонов разработанного излучателя демонстрирует, что вероятность двухфотонного излучения в заданный интервал времени близка к нулю. Использование брэгговского вертикального микрорезонатора позволяет существенно увеличить внешнюю квантовую эффективность излучателя (до уровня ~ 30 %) и значительно уменьшить время спонтанной эмиссии экситона квантовой точки за счет эффекта Парселла. Фактор Парселла для разработанного микрорезонатора составляет



~ 2,5, что обеспечивает большее быстродействие излучателя в 2–2,5 раза. Излучатель одиночных фотонов относится к числу первых полупроводниковых оптоэлектронных приборов, принцип работы которых основан на эффектах квантовой электродинамики резонаторов. Уменьшение времени спонтанной эмиссии экситона квантовой точки за счет эффекта Парселла с ~ 1нс до ~ 0,4нс позволило поднять быстродействие ИОФ до рекордно высокого уровня 1 ГГц.

Подведём итог. Полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором (ЛВР), обладая высоким быстродействием и возможностью интегрирования в матрицы большого формата, представляют собой идеальный излучатель для оптических систем параллельной передачи информации со скоростью передачи данных по одному каналу 10 Гбит/с и выше. Использование ЛВР в матричном исполнении открывает перспективы создания оптических информационных систем с быстродействием на уровне 1 Тбит/с. Эффективные излучатели одиночных фотонов (ИОФ) с токовой накачкой на основе полупроводниковых квантовых точек и брэгговских вертикальных микрорезонаторов могут представлять большой интерес для систем квантовой криптографии и квантовых вычислений, а также для разработки прецизионного спектрального оборудования и эталонов оптической мощности. Скорость передачи данных с использованием данного типа ИОФ может достигать 1 Гбит/с и выше.

Подготовила Ю. Александрова, «НВС»  
На снимке:  
— В.А. Гайслер держит в руках пластину, содержащую десятки тысяч лазеров.