

Мощные импульсные газовые лазеры и их применение

Активной средой газовых лазеров является низкотемпературная плазма, в которой за счёт различных физических процессов создаётся инверсная населённость между определенными энергетическими уровнями молекул. Чем больше объём плазмы и чем выше концентрация в ней активных частиц, тем большая энергия лазерного излучения может быть получена.

В первых газовых лазерах, созданных в 1960-х годах, использовали тлеющий разряд в длинных трубках. Поскольку давление газа в тлеющем разряде малое (в сотни раз меньше атмосферного), для получения больших мощностей требовалось создавать громоздкие лазерные установки.

Использование методов мощной импульсной энергетики и сильноточной электроники позволило в начале 1970-х годов осуществить в технике газовых лазеров настоящую революцию. Она состояла в том, что при использовании источников мощных наносекундных ($1 \text{ нс} = 10^{-9} \text{ с}$) и микросекундных импульсов электрической энергии, а также мощных систем создания инициирующих электронов удалось создавать низкотемпературную плазму в больших, вплоть до нескольких кубических метров, объёмах различных газов при давлениях в несколько атмосфер и более. За счёт высоких давлений газа и больших его объёмов удалось многократно увеличить энергию и мощность в лазерных импульсах.

Фундаментальную основу для работ в этом направлении составили два научных открытия, сделанные в Институте сильноточной электроники СО АН СССР под руководством Г.А. Месяца. Открытие многоэлектронного инициирования в наносекундных разрядах и разряда с прямой инъекцией электронного пучка позволило осуществить объёмный разряд при высоком давлении (больше атмосферного), а открытие взрывной электронной эмиссии в вакуумном разряде — создать источники сильноточных электронных пучков с большим поперечным сечением.

Существуют три основных метода накачки газовых лазеров высокого давления. Первый — это создание объёмного лавинного разряда при его многоэлектронном инициировании и приложении к электродам разрядной камеры импульсов напряжения наносекундной длительности. Такие лазеры называются электроразрядными с самостоятельным разрядом. Первыми лазерами, работавшими в электроразрядном режиме, были

импульсные CO_2 -лазеры. Второй метод основан на ионизации газового объёма инжектируемым в него мощным импульсным пучком электронов, обычно с энергией до 1 МэВ. Впервые этот способ был предложен в ФИАН группой Н.Г. Басова для накачки лазера на жидком ксеноне, а затем получил широкое распространение при возбуждении активных сред лазеров высокого давления. Наконец, третий, электроионизационный способ накачки мощных газовых лазеров — это накачка электрическим разрядом, который контролируется пучком электронов. Такой разряд был впервые осуществлён в ИСЭ, а первый электроионизационный лазер (на углекислом газе) был создан в ФИАН в 1971 году. Принципиальной особенностью всех перечисленных систем накачки является то, что ток разряда (или инжектируемого электронного пучка) течёт поперечно по отношению к направлению лазерного луча. Очень важно, что многие из разработанных систем накачки обладали универсальностью: путем простой смены сорта газа можно было получать излучение на самых различных длинах волн.

В числе наиболее мощных импульсных газовых лазерных систем, разработанных в ИСЭ — лазеры на углекислом газе с энергией в импульсе излучения до 5 килоджоулей (1976 год), лазеры на эксимерных молекулах (галогениды инертных газов) с энергией до 2 кДж. Были получены импульсы мощного лазерного излучения длительностью от нескольких наносекунд до микросекунд. Для специальных применений разрабатывались мобильные установки на основе эксимерных лазеров. Предложенная в ИСЭ концепция лазера с многократной инжекцией сильноточного электронного пучка в газовый объём была принята за рубежом при разработке лазерных систем мегаджоульного уровня.

Кроме рекордных энергетических характеристик возрастающее внимание уделялось получению излучения с высокой стабильностью и качеством. Лазер на углекислом газе, в котором генератор и усилитель

совмещены в одном газовом объёме, обеспечивал плавную перестройку частоты излучения и был использован для разделения изотопов (1979 г.). Пятикаскадный эксимерный лазерный комплекс с ультрафиолетовым излучением высокого качества и энергией в импульсе 0,5 кДж был поставлен за рубежом. Газовые лазеры меньшей импульсной мощности (энергии в импульсе в единицы джоулей) нашли применение в спектроскопии, при разработке основ технологических наноматериалов, в медицинской диагностике и фармацевтике, были применены в лидарных системах для зондирования атмосферы на дальности до 10 км (в этой системе гибридный импульсно-непрерывный CO_2 -лазер работал как в качестве излучателя, так и в качестве усилителя отраженного сигнала), а также для дистанционного обнаружения взрывчатых веществ.

Достижения в физике импульсных газовых разрядов позволили разработать, кроме лазеров, и более компактные устройства спонтанного, но узкополосного излучения — эксилампы. Используя в этих устройствах различные газовые смеси, можно получать излучение во всех частях ультрафиолетового диапазона, использовать это излучение для фундаментальных исследований, а также в микроэлектронике, плазмохимии, биологии, медицине.

Одно из новых приложений физики и техники мощных газовых лазеров — получение сверхмощных (петаваттных, $1 \text{ ПВт} = 10^{15} \text{ Вт}$) сверхкоротких (фемтосекундных, $1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$) импульсов лазерного излучения. Такие импульсы излучения чрезвычайно интересны как новый инструмент для фундаментальных исследований вещества в условиях экстремальных внешних воздействий.

Петаваттная мощность была первоначально получена в лазерных пучках сравнительно большой, субнаносекундной длительности. Задача же получения фемтосекундных импульсов такой мощности решается сегодня: достигнут уровень 0,5—1 ПВт. Традици-

онно используемые для получения таких импульсов твердотельные лазерные усилители не позволяют усиливать сверхмощные фемтосекундные импульсы непосредственно. Перед усилением импульс в тысячи раз растягивают, а после усиления сжимают до исходной длительности с использованием достаточно сложных систем. Ограничиться десятикратным, технически простым растяжением и сжатием можно, если в качестве активной среды использовать газ. Такая лазерная система будет гибридной: начальный импульс, генерируемый твердотельным лазером, усиливается в конечном усилителе с газовой активной средой.

Два таких лазерных комплекса созданы Институтом сильноточной электроники СО РАН в сотрудничестве с Физическим институтом им. П.Н. Лебедева РАН. В обеих системах, построенных на основе сильноточных электронных ускорителей, используется двухступенчатая накачка активной среды. Сильноточным электронным пучком, инжектированным в ксенон, возбуждается мощный импульс жесткого ультрафиолетового излучения, который в свою очередь используется для фотонакачки определенного энергетического перехода в рабочей смеси XeF_2 , излучающего в синей области спектра. Первая система с импульсным источником питания на основе генератора Маркса работает в ФИАНе, на ней получены импульсы с мощностью 10^{13} Вт . Более мощная система на основе линейного импульсного трансформатора недавно запущена в ИСЭ.

Институт сильноточной электроники внёс свой вклад и в создание твердотельных лазерных систем с рекордной энергетикой. Для французского мегаджоульного лазерного термоядерного комплекса LMJ институтом на основе уникальных многокулонных разрядников разработаны прототипы импульсных источников питания — флэш-лампы накачки неодимового стекла.

Н.А. Ратахин, чл.-корр. РАН,
директор Института
сильноточной электроники СО РАН

Лазеры и оптика атмосферы

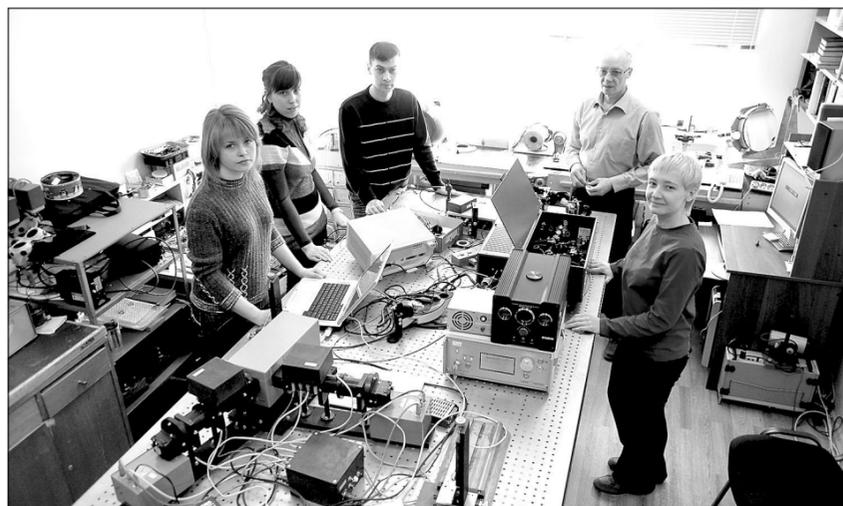
После создания первого лазера зародилась и стала стремительно развиваться «лазерная эпоха» в атмосферной оптике.

Уникальные свойства лазерного излучения быстро нашли широкое применение в фундаментальных и прикладных исследованиях различных по масштабам и природе процессов и явлений, протекающих в атмосфере Земли.

В нашей стране первые лазерные эксперименты по изучению атмосферы начались в 1965 году Центральной аэрологической обсерватории Госкомгидромета. В 1969 году в Томске на базе лаборатории инфракрасных излучений Сибирского физико-технического института при Томском государственном университете был создан Институт оптики атмосферы, основными научными задачами которого стали исследования распространения лазерного излучения в атмосфере с учетом поглощения атмосферными газами, ослабления аэрозолями, флуктуаций за счет атмосферной турбулентности; лазерное зондирование атмосферы, генерирование и детектирование лазерных импульсов с заданными свойствами, изучение нелинейных эффектов при распространении мощного оптического излучения в атмосфере.

Основателем института стал Герой Социалистического Труда, лауреат Государственной премии СССР и премии Совета Министров СССР академик Владимир Евсеевич Зуев (1925—2003 г.). Под его началом Институт оптики атмосферы сформировался в крупнейшее в мире учреждение в этом направлении. В 1985 г. результаты исследования сотрудников института по распространению лазерного излучения в атмосфере Земли и разработке новых методов решения задач самовоздействия лазерных пучков были отмечены Государственной премией СССР. В институте разработан широкий спектр научных приборов для лабораторных и натурных измерений аэрозольных, газовых, турбулентных и других характеристик атмосферы, в том числе лидары наземного, самолетного и космического базирования, лазерные навигационные системы для посадки самолетов и проводки судов. После успешных наземных испытаний 20 мая 1995 г. на станцию «Мир» в составе модуля «Спектр» был выведен на околоземную орбиту первый российский космический лидар «БАЛКАН», созданный совместно Институтом оптики атмосферы, СКБ НП «Оптика» и НИИ космического приборостроения. Лидар осуществлял зондирование облаков всех ярусов в глобальном масштабе.

В череде событий, отметивших продви-



жение лазеров в оптическую науку, для атмосферной оптики важно отметить возникновение самостоятельного научного направления, связанного с исследованием фундаментальных и прикладных проблем применения мощных лазеров, — нелинейной оптики атмосферы. Это направление охватывает широкий круг оптических задач, связанных с изучением свойств газов и аэрозолей атмосферы в мощных оптических полях, поведении мощных лазерных пучков на протяженных атмосферных трассах. В институте были впервые поставлены и решены задачи получения информации о свойствах атмосферной среды по оптическому отклику — результату взаимодействия мощного лазерного импульса с аэрозольной средой.

Институт оптики атмосферы СО РАН совместно с Институтом прикладной физики РАН осуществил первые в России натурные эксперименты по управлению параметрами тераваттного ультракороткого лазерного излучения для обеспечения эффекта самофокусировки на удаленной дистанции. Установ-

лена принципиальная возможность организации на атмосферной трассе генерации широкополосного когерентного излучения — так называемого квазизеленого света. Кроме того, показано, что передача высокой интенсивности излучения на длинные дистанции пучком световых жгутов, так называемых филаментов, возбуждаемых в прогнозируемых местах оптического канала, является вполне реальной.

При исследовании нелинейно-оптических задач в атмосферной оптике коллективом института был использован методологический подход, основанный на комплексном исследовании явлений, когда совместно проводятся лабораторные, теоретические и натурные исследования. Такой подход позволяет осуществлять построение прогнозных полуматематических моделей взаимодействия излучения мощных лазеров и атмосферной среды, что необходимо для практической атмосферной оптики.

В институте детально разрабатываются методы лазерной спектроскопии и на их ос-

нове создаются образцы нового поколения спектральной аппаратуры — сверхчувствительные лазерные спектрометры. Проводятся исследования колебательно-вращательных спектров высокого разрешения слабопоглощающих атмосферных газов и малых примесей антропогенного и природного происхождения. Анализируется влияние внутри- и межмолекулярных взаимодействий на структуру спектра и контура отдельных спектральных линий.

Возможность дистанционного определения характеристик воздушной среды и получения разнообразных сведений о свойствах атмосферы на различных высотах, хорошее пространственно-временное разрешение, связанное с малой длительностью лазерного импульса и высокой частотой повторения импульсов, стимулировали интенсивное развитие методов лазерного зондирования окружающей среды с помощью лидаров. В институте создана и эксплуатируется многоуровневая система глобального дистанционного экологического и метеорологического мониторинга оптических и физических параметров атмосферы на основе уникального комплекса стационарных и мобильных установок, созданы и применяются на практике лидары различного целевого назначения, разработаны системы оптического дистанционного определения скорости и направления ветра, параметров турбулентности, температуры и влажности воздуха, характеристик аэрозольных и газовых составляющих атмосферы. Полученные экспериментальные данные позволяют исследовать связи между различными параметрами атмосферы и определять закономерности их изменения. Накопленный потенциал и опыт в решении комплексных проблем применяются для изучения окружающей среды и процесса глобального изменения климата.

Г.Г. Матвиенко, д.ф.-м.н., директор Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

На снимке: — сотрудники института монтируют стенд для лабораторных исследований закономерностей взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов с атмосферой.