

МЕЖИНСТИТУТСКИЙ СЕМИНАР  
«ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ ОПТИКИ  
И СПЕКТРОСКОПИИ»

УДК 621 : 535

С. Г. РАУТИАН

(Новосибирск)

УСПЕХИ ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ

- I. О задачах семинара.
- II. Лазерные источники излучения.
- III. Глобальные приложения лазерных методов.
- IV. Некоторые конкретные вопросы лазерной физики.

I. **О задачах семинара.** Широко распространено мнение о революционных изменениях в оптике, происходящих в наше время под влиянием оптических квантовых генераторов (или лазеров). Характерная особенность этой революции состоит в том, что фундамент оптики, заложенный нашими великими предшественниками и сконцентрированный в основных положениях электродинамики, квантовой механики и статистики, остается незыблемым. Указанная особенность и отличает современную революцию от революции начала XX века, в ходе которой изменилось то, что мы называем фундаментом науки. Другими словами, сейчас речь идет о радикальном изменении условий, в которых применяются фундаментальные законы оптики, и об исключительно большом расширении сферы приложения оптических методов исследования для решения неоптических задач, чрезвычайно разнообразных по своему содержанию. Последнее обстоятельство представляется особенно важным. Оптика является одной из древнейших наук, за тысячелетнюю историю свою она нашла обильные и весьма продуктивные применения, начиная от исправления дефектов зрения (очки) и кончая астрофизическими проблемами. Однако происходящее в наше время и ожидаемое в ближайшем будущем не идет ни в какое сравнение с долазерными приложениями оптики как по разнообразию, так и по своим масштабам.

В период 1960—1970 гг. основная масса исследований, связанная так или иначе с лазерами, относится к открытию и изучению собственно оптических явлений. Речь идет, прежде всего, о явлениях в самих лазерах, о нелинейной оптике и нелинейной спектроскопии. Эти направления оптики продолжают развиваться весьма быстрыми темпами. Однако создается впечатление, что несколько лет тому назад еще более быстрыми темпами начали развиваться приложения лазеров вне оптики. Об этом говорят и субъективные впечатления, и общие законы развития науки, и анализ потока научной информации. Я убежден в существовании и жизненности такой тенденции, в ее будущности.

В связи с изложенным и возникла идея о нашем семинаре. Основная задача его состоит в том, чтобы помочь разобраться в многочисленных разветвлениях лазерных методов, их перспективности и возможностях. При современной узкой специализации, тесно связанной с углубленностью изучения того или иного научно-технического вопро-

са, решение такой задачи затруднительно или практически невозможно для каждого человека в отдельности. В условиях же Сибирского отделения АН СССР, в котором по изначальному замыслу сконцентрированы представители разных наук и специальностей, можно и должно консолидировать усилия и попытаться создать ясность в этой проблеме, очень важной для развития науки в целом.

В пределах одного, даже сравнительно большого доклада нет возможности остановиться на всех главных путях развития лазерных дел. Попытка такого рода неизбежно сведлась бы к перечислению названий. Будет рассмотрен на одном или нескольких специальных заседаниях семинара, а я ограничусь констатацией фактов и буду краток. В следующей части сообщения обсуждаются направления, которые можно назвать глобальными для лазерной физики и техники. Наконец, в заключительной части будут рассмотрены некоторые конкретные вопросы, связанные с применением лазеров и подобранные таким образом, чтобы охарактеризовать общий уровень развития лазерной физики.

**II. Лазерные источники излучения.** Итак, рассмотрим лазеры как источники оптического излучения. Мы не будем останавливаться на внутрилазерных процессах, т. е. на возбуждении и релаксации активной среды, на электродинамике лазеров и т. д. Внутрилазерные процессы представляют интерес с различных точек зрения; изучение их существенно обогатило конкретными знаниями атомную и молекулярную физику, физическую оптику, физику твердого тела. Однако сейчас лазеры нас будут интересовать с иной точки зрения, а именно: каковы значения основных параметров когерентного излучения, достижимые в настоящее время?

К разряду основных параметров относятся спектральные, временные и энергетические характеристики, а также направленность излучения.

В табл. 1 приведены численные значения интересующих нас параметров для некоторых типов лазеров. Несмотря на разнообразие активных сред (в настоящее время генерация получена на тысячах переходов с использованием около десяти способов возбуждения), за основу классификации удобно принять активную среду и способ возбуждения квантового генератора. Связано это с тем, что практически важным, сравнительно более универсальным оказывается небольшое число лазеров. Кроме того, активная среда определяет положение в спектре и ширину спектрального интервала, в котором существует усиление.

Наибольшее распространение получили гелий-неоновые лазеры непрерывного действия, дающие излучение в красной области спектра. Они сравнительно хорошо разработаны в технологическом отношении, выпускаются промышленностью, дешевы, удобны в обращении. Ширина спектра, направленность и мощность их излучения удовлетворяют запросы специалистов во многих лабораторных исследованиях.

Весьма «популярными» являются рубиновый и неодимовый лазеры, обладающие большой мощностью. Они работают и в непрерывном, и в разных вариантах импульсного режима. Мощности их излучения достаточно велики для самых разнообразных применений. С помощью тех или иных способов расходимость излучения может быть доведена до дифракционного предела, а ширина спектра генерации уменьшена до величин порядка  $10^{-3}\text{см}^{-1}$ . И то, и другое достигается, как правило, ценой заметного снижения мощности.

Таблица 1

Активная среда	Способ возбуждения	Длина волны, мкм	Временной режим	Длительность, с	Частота повторения, Гц	Мощность, Вт	Расходимость относительно дифракционной	Ширина спектра, см <sup>-1</sup>	Область перестройки, см <sup>-1</sup>
He-Ne	Разряд	0,63	Непрерывный			$10^{-3}-1$	1	$0,01-10^{-6}$	0,02
Рубин	Оптический	0,69	Непрерывный Свободная генерация Модуляция добротности СКИ	$10^{-4}$		2	1-10	$0,1-10^{-3}$	2
				$10^{-8}$ $10^{-10}$		$10^5$ $10^8$ $10^{10}$	1-10 <sup>2</sup> 1-10 <sup>2</sup> 1-10	$1-10^{-3}$ $1-10^{-3}$ 1	2 2 2 2
Неодим в различных матрицах	»	1,06	Непрерывный Свободная генерация Модуляция добротности СКИ	$10^{-4}$		10	1-10	$10^{-3}-0,1$	50
				$10^{-8}$ $10^{-12}$		$10^6$ $10^9$ $10^{11}$	1-10 <sup>2</sup> 1-10 <sup>2</sup> 1-10 <sup>2</sup>	$10^{-3}-50$ $10^{-3}-10$ 30	50 50 50 50
CO <sub>2</sub>	Разряд	10	Непрерывный Модуляция добротности	$10^{-8}$		$1-10^3$ $10^8$	1-10 <sup>2</sup> 1-10 <sup>2</sup>	$10^{-2}-1$ $10^{-2}-1$	100 100
CO	»	5	Непрерывный Импульсный	$10^{-8}$		$1-10^2$ $10^8$	1-10 <sup>2</sup> 1-10 <sup>2</sup>		
N <sub>2</sub>	»	0,34	Импульсный	$10^{-7}-10^{-9}$	$10^2$	$10^7$	1-10 <sup>2</sup>	0,1	
Ag+	»	0,5	Непрерывный			$1-10^2$	1-10	$0,1-10^{-3}$	0,1
Cu	»	0,51 0,57	Импульсный	$10^{-7}-10^{-9}$	$10^4$	$10^5$	1-10 <sup>2</sup>	0,02	
Красители	Оптический	0,4-0,7 0,3-1,1	Непрерывный Импульсный СКИ	$10^{-8}-10^{-6}$ $10^{-12}$		$0,1-10$ $10^3$ $10^7$		$10^{-5}-100$ $10^{-4}-100$ $10-100$	$10^4$ $10^4$ $10^4$
						$10^{-4}-10^{-2}$	1	$10^{-5}$	$10^4$
Полупроводники		0,8-30	Непрерывный				1		$10^4$

В средней инфракрасной области спектра мы располагаем прекрасными лазерами на СО и СО<sub>2</sub>. Эти лазеры могут иметь значительную мощность в импульсном и непрерывном режимах и характеризуются относительно высокими значениями КПД (десятки процентов). По этой причине они находят широкое применение в тех областях, где велики затраты энергии и едва ли не главную роль играет фактор экономической рентабельности. Разумеется, лазеры на СО и СО<sub>2</sub> используются и в разнообразных научных исследованиях, при выполнении которых мало задумываются над энергетическими затратами, так как обычно они сравнительно невелики в общем балансе расходов.

Наиболее мощным лазером непрерывного действия в видимой области спектра является аргоновый лазер. Ряд фирм, отечественных и зарубежных, выпускает его в различных модификациях, и аргоновый лазер уступает по распространенности разве только гелий-неоновому, рубиновому и неодимовому.

Замечательным достижением 70-х годов является разработка лазеров с перестройкой частоты излучения в значительном спектральном интервале. Лазеры этого типа созданы на основе многих активных сред, но особенно большие успехи в случае красителей и полупроводников. Лазеры на красителях непрерывного действия позволяют иметь излучение во всей видимой области спектра, причем степень его монохроматичности может быть очень высокой (до  $10^{-5}$ — $10^{-6}$  см<sup>-1</sup>). И наоборот, при известных условиях ширина спектра излучения лазеров на красителях может быть сделана очень большой (до  $10^3$  см<sup>-1</sup>).

Импульсные лазеры на красителях включают в сферу своего применения ближнюю инфракрасную область и ближний ультрафиолет.

Полупроводниковые лазеры перекрывают и ближнюю, и среднюю инфракрасную области, где расположено большинство частот колебаний молекул. К сожалению, их мощности сравнительно невелики, хотя и вполне достаточны для линейной спектроскопии.

Особого упоминания заслуживают генераторы сверхкоротких импульсов (СКИ). Такого рода лазеры появились в конце 60-х годов, а детальное изучение и разработка их осуществлены в 70-е годы. Многие генераторы (рубиновый, неодимовый, лазеры на красителях) можно ввести в такой режим работы, когда их излучение представляет собой последовательность импульсов, длительность которых составляет  $10^{-10}$ — $10^{-12}$  с. Таким образом, возникла реальная возможность оптического изучения очень быстрых процессов; кроме того, резко увеличился рекорд для пикового значения мощности излучения. Генераторы СКИ, несомненно, великое достижение лазерной физики и техники.

В табл. I не нашли отражение многие интересные и полезные лазеры, в том числе химические, газодинамические, фотодиссоциативные и др. Я не стремился к исчерпывающей полноте и привел лишь те данные, которые в достаточной степени иллюстрируют возможности лазерной техники и ее современный уровень. С этой точки зрения необходимо подчеркнуть, что возможности лазерной техники значительно расширяются с помощью нелинейно-оптических явлений. Я имею в виду генерацию суммарных и разностных гармоник, параметрическую генерацию, вынужденное комбинационное рассеяние света. Располагая лазером с перестройкой частоты, мы можем, например, получить излучение с удвоенной частотой и с тем же относительным интервалом перестройки. При таком нелинейном преобразовании спектра излучения в более или менее значительной степени теряется мощность, но во многих случаях с этим можно мириться. Так были получены вторая, четвертая и т. д. гармоники излучения рубинового (0,35; 0,17 мкм) и неодимового (0,53; 0,27 мкм) лазеров.

Следует иметь в виду, что цифры в табл. I отвечают некоторым средним значениям параметров. Рекордные значения для мощности и ширины линий, как правило, на порядок лучше.

В заключение данной части сообщения перечислю наиболее важные, еще не решенные проблемы. К их числу относят прежде всего создание источников когерентного излучения в далекой ультрафиолетовой, рентгеновской и  $\gamma$ -областях спектра. Наиболее коротковолновое излучение, полученное к настоящему времени, представляет собой 48-ю гармонику излучения неодимового лазера, длина его волны составляет 22 нм, но мощность чрезвычайно мала. Сколь-нибудь существенное продвижение в сторону коротких длин волн (0,1—10 нм) сопряжено со значительными трудностями, о которых кратко упоминается в конце сообщения. Однако создание таких лазеров представляется весьма важной проблемой; в частности, они должны найти фундаментальные применения в биологии и химии.

В последние годы на базе лазера с углекислым газом в качестве активной среды резко интенсифицировались работы в области лазерной фотохимии, тесно связанные с исследованием взаимодействия молекулярных колебаний с лазерным мощным излучением. По плану нашего семинара эти работы будут подробно разобраны на одном из его заседаний. Многие колебания, интересные с точки зрения молекулярной физики и химии, обладают частотами, расположенными в иных областях спектра, не совпадающими в первом приближении с частотой  $\text{CO}_2$  лазера. В этой связи важнейшей задачей является разработка мощных лазеров для областей спектра 7 и 15 мкм и др. Работы в указанном направлении ведутся весьма интенсивно, но реальные успехи пока связаны только с повышением мощности лазера на угарном газе.

Насущной проблемой является разработка таких лазеров, которые могли бы служить основой для создания лазерных спектрометров. Лазер можно рассматривать как монохроматор, на выходе которого мы имеем чрезвычайно монохроматическое излучение. Сканирование частоты лазера эквивалентно с этой точки зрения вращению диспергирующего элемента (призмы, дифракционной решетки) «обычного» монохроматора. Ширина аппаратной функции лазерного спектрометра определяется шириной спектра излучения лазера и в настоящее время может быть доведена до сотен или нескольких десятков кГц, что соответствует  $10^{-5}$ — $10^{-6}$  см $^{-1}$ . Для сравнения напомним, что ширина аппаратной функции трехпризменного спектрографа ИСП-51 составляет около 2 см $^{-1}$ , а для прибора с дифракционной решеткой размерами 10 см аппаратная функция практически не может быть уже 0,1 см $^{-1}$ . Для достижения разрешающей способности  $\delta\tilde{\nu}=10^{-6}$  см $^{-1}$  нужна дифракционная решетка размером

$$D=1/(\delta\tilde{\nu})=10^6 \text{ см} = 10 \text{ км}$$

или интерферометр Фабри — Перо толщиной

$$h=1-r/(2\pi\delta\tilde{\nu})=16 \text{ м},$$

если коэффициент отражения его зеркал  $r=0,99$ .

Таким образом, классические способы спектрального разложения излучения оказываются практически непригодными, коль скоро речь идет о разрешающей способности порядка  $10^{-6}$ — $10^{-5}$  см $^{-1}$ , хотя в принципиальном отношении такого ограничения не существует. Кстати, приведенные числа очень наглядно иллюстрируют важнейшую роль технологической стороны дела: если и существуют так называемые принципиальные ограничения разрешающей способности, то они связаны с технологией — технологией изготовления больших дифракционных решеток, технологией зеркальных покрытий и полировки зеркал интерферометров, стабилизацией температуры в помещении и т. д.

Вернемся к вопросу о лазерных спектрометрах. Из изложенного ясно, что разрешающая способность  $10^{-5}$  см $^{-1}$  практически недоступна

классическим методам и лазерные спектрометры здесь вне конкуренции. В литературе имеются сообщения об исследованиях на таком уровне разрешения, однако они связаны с выяснением сравнительно небольшого числа вопросов. Подавляющее большинство реально существующих вопросов требует значительно более грубого разрешения, и спектроскописты были бы рады приборам с разрешающей способностью  $10^{-1}$ — $10^{-3}$  см<sup>-1</sup>. Такое положение вполне закономерно, ибо наука идет по пути постепенного освоения новых методов эксперимента и при слишком резких улучшениях качества аппаратуры не может обеспечить ее достаточным количеством физических задач. Создание приборов с разрешением  $10^{-5}$  см<sup>-1</sup> имеет большое принципиальное значение, так как тем самым выясняются далекие перспективы оптики, но сейчас «погоду делают» задачи с разрешением не лучше  $10^{-3}$  см<sup>-1</sup>. В этой области классические методы работоспособны, и лазерным спектрометрам предстоит конкуренция в первую очередь в отношении дешевизны, простоты эксплуатации и долговечности. Дело в том, что какой-нибудь дифракционный спектрометр или эталон Фабри — Перо сначала устаревает морально и лишь затем приходит в техническую негодность. Лазеры же пока имеют небольшой срок службы и выходят из строя до того, как морально устаревают.

Я остановился на проблеме лазерных спектрометров несколько более подробно, так как придаю ей особенно большое значение. Дело в том, что работы по спектроскопии составляют заметно большую половину всех оптических исследований. Поэтому аппаратное перевооружение спектроскопистов означает создание предпосылок для нового скачка во всей оптике в целом и, следовательно, во всех сопряженных с ней областях науки.

Разумеется, и сейчас, и в ближайшем будущем будут продолжаться работы по дальнейшему наращиванию мощности квантовых генераторов. Существующие уровни мощности во многих случаях ограничиваются разрушением элементов лазеров (активные элементы, покрытия, зеркала). Проблема радиационной стойкости материалов порождена лазерами, для оптики является совсем новой и ей уделяется большое внимание. Однако пока не ясно, следует ли признать такого рода ограничения принципиальными или же они носят «технический характер» и устранимы технологическими способами.

Резюме изложенного беглого обзора можно сформулировать следующим образом. Сумма накопленных знаний по физике и технологии лазеров находится на таком уровне, что вполне реально можно говорить о создании или разработке лазеров, адекватных той или иной конкретной физической или технической задаче. Несколько лет назад ситуация была иной: лазеры уже существовали, но физические, технические, химические и др. задачи находили «под лазер». Теперь же мы можем, как правило, делать лазер «под задачу».

Отмеченное обстоятельство является, по моему мнению, главной особенностью современного состояния оптики. Оно же свидетельствует о том, что в середине 70-х годов мы вступили в новый этап лазерной революции.

**III. Глобальные приложения лазерных методов.** Коль скоро мы осознали силу лазерных источников излучения, естественно поставить вопрос о сферах их приложений, о перспективности применений лазеров. Этот вопрос можно ставить на разных уровнях общности и, следовательно, по отношению к интервалам времени разного порядка. Остановимся на глобальных направлениях приложений лазеров. Под глобальными направлениями или глобальными сферами приложений я буду понимать такие направления, которые связаны с основными особенностями человеческого общества и окружающей нас природы. По существу, только при подходе на таком уровне общности можно гаран-

тировать себя от опасности оказаться в положении мещан от науки и в какой-то мере оценить полезность своей деятельности. Разумеется, такой подход не нужен при решении вопросов месячного и даже годового масштаба. Но при рассмотрении перспектив своей работы в течение 10 лет и тем более в течение сознательной жизни следует подумать о том, что же сулят лазеры в глобальном смысле. Поскольку наш семинар предназначен для обсуждения современного состояния оптики с точки зрения перспектив ее развития, указанная глобальная постановка вопроса представляется уместной.

Подчеркну, что я не предполагаю рассматривать все основные особенности человеческого общества и природы. Подобный анализ выходил бы за рамки естественных наук и относился бы к компетенции философии. Я приведу лишь небольшое число особенностей, для которых, по моему мнению, лазеры будут полезными. Даже в рамках такой задачи я отнюдь не стремлюсь к исчерпывающей полноте, так как преследую главным образом иллюстративные цели, и хочу показать, что лазеры действительно имеют глобальные сферы применений (и, следовательно, будут жить вечно), и совсем не собираюсь рассматривать всю совокупность таких глобальных сфер.

В качестве первого глобального направления остановлюсь на использовании лазеров для исследования механического движения. Вполне очевидно, что механическое движение изначально присуще человеку, его творениям, окружающей нас природе. Речь может идти о потоках воды или атмосферных масс, о самодвижущихся экипажах вплоть до космических аппаратов, о движении материков, живых существ и т. д. Такие и многие другие движения всегда будут интересовать человека, всегда, следовательно, будет необходимость измерять расстояния, углы, смещения, скорости, ускорения и прочие кинематические характеристики движения.

Что ужé дали лазеры в этом отношении? Интерферометрический контроль перемещения инструмента и деталей на больших металлорежущих станках, лазерные дальномеры, измерение поля скоростей в газовых и жидкостных потоках, измерение малых смещений и деформаций самых разнообразных предметов с помощью голографической интерферометрии, навигационные приборы на базе кольцевых лазеров, локацию облаков, Луны, спутников и многое, многое другое. Перечень такого рода лазерных приборов очень велик.

Я ограничусь изложенным и приведу только один пример, показательный в том отношении, что он наглядно демонстрирует происходящую сейчас переоценку ценностей, порожденную лазерами в данной области. Речь пойдет о созданном в ИАиЭ СО АН СССР лазерном гравиметре, т. е. о приборе для измерения ускорения силы тяжести. В этом приборе измеряется время и путь свободно падающего тела. Время измеряется с помощью стандарта частоты, а перемещение — лазерным интерферометром. Сейчас относительная погрешность измерений составляет  $\Delta g/g = 10^{-8}$  и определяется нестабильностью частоты лазера, используемого для создания интерференционной картины.

Для сравнения с указанной точностью измерений любопытно вычислить изменение силы тяжести на поверхности Земли под влиянием притяжения к Луне (или Солнцу) и суточные вариации этого изменения:

$$\frac{\Delta g}{g} = \frac{M}{M_{\oplus}} \left( \frac{r_{\oplus}}{R} \right)^2; \quad \delta \left( \frac{\Delta g}{g} \right) = 2 \frac{M}{M_{\oplus}} \left( \frac{r_{\oplus}}{R} \right)^2 \frac{\Delta R}{R}.$$

Здесь  $M_{\oplus}$ ,  $r_{\oplus}$  — масса и радиус Земли;  $M$ ,  $R$  — масса Луны (Солнца) и расстояние от нее до Земли. Изменение  $\Delta R$  расстояния  $R$  в течение полусуток зависит, конечно, от широты той точки на поверхности Зем-

ли, где производится измерение. Принимая для простоты  $\Delta R = 2r_*$  и подставляя численные значения всех величин, можно найти:

$$\Delta g/g = 3,0 \cdot 10^{-6}; \delta(\Delta g/g) = 1,9 \cdot 10^{-7} \quad (\text{Луна});$$

$$\Delta g/g = 5,3 \cdot 10^{-4}; \delta(\Delta g/g) = 0,85 \cdot 10^{-7} \quad (\text{Солнце}).$$

Таким образом, даже суточные вариации ускорения силы тяжести, вызванные притяжением Луны и Солнца, на порядок превышают ошибку измерений лазерного гравиметра. Можно сказать поэтому, что крылатая фраза преподавателей физики на первом курсе: «Не будем же мы

Вся деятельность человека неразрывно связана с разрушением вещества. Человек разрушает горы, рубит лес, снимает лишний материал с металлической болванки при изготовлении нужной детали, сверлит отверстия, режет ткань и т. д. Такое сознательное разрушение (или обработка материалов), собственно, и отличает человека от животного.

Разрушение вещества сводится к сообщению энергии, превышающей энергию химического или межмолекулярного взаимодействия. Для того чтобы испарить стакан воды, нужно затратить энергию, примерно равную 0,5 МДж. Для нагревания, плавления и испарения 1 см<sup>3</sup> стали необходима энергия около 40 кДж. Приведенные цифры, внушительные по лазерным меркам, показывают, что использование дорогой лазерной энергии для разрушения больших масс вещества, как правило, не оправдано. Такие операции проще и дешевле проделать с помощью взрыва или газовой горелки, т. е. разрывать химические связи в разрушаемом веществе с помощью химической же энергии. Однако в тех случаях, когда необходимо удалить малый объем вещества: разрезать, например, лист стали с минимальными потерями, просверлить отверстие малого диаметра и т. д., — лазер очень полезен, а иногда и незаменим. Дело в том, что малая величина длины волны и высокая степень пространственной когерентности позволяют сконцентрировать лазерное излучение на площадке с микронными размерами и зачатую область «испорченного» материала определяется не непосредственным «очагом поражения», а теплопроводностью материала и другими вторичными процессами. Грубые оценки такого рода легко проводятся на уровне общей физики, хотя детальная теория, принимающая во внимание испарение и ионизацию вещества, теплопроводность, выброс продуктов испарения, поглощение ими падающего излучения и другие обстоятельства, отнюдь не проста.

В настоящее время технологические применения лазеров довольно разнообразны: свариваются кузова автомобилей, сверлятся отверстия в рубиновых часовых камнях и алмазных волокнах, разрезаются металлические плиты (примерно 1 мм/с при толщине 10 мм и мощности излучения 10 кВт), обрабатываются и свариваются детали радиоаппаратуры и т. д.

Разрушению вещества можно противопоставить созидание его. В этой области проводятся исследовательские работы и вполне оптимистично выглядят надежды на лазерное управление химическими реакциями, получение новых химических веществ и т. п. Общие соображения о такого рода применениях лазеров были высказаны около 10 лет назад, однако проблема оказалась сложной, и промышленные варианты



Большой интерес представляет проблема внедрения лазеров в быт. Нет нужды доказывать, что сфера быта является глобальной. В США уже осуществлены в широких масштабах лазерные кассовые аппараты в продуктовых магазинах, работающие схематически следующим образом. На упаковке товара закодирована его стоимость; вы предъявляете автомату соответствующее место упаковки, лазерный луч сканирует код, расшифровывает стоимость, при необходимости суммирует стоимость всех приобретенных покупок и выдает вам чек.

Другой пример лазера в быту дают видеопластинки, на которых сделана (лазерным способом) запись информации о какой-то сцене, телевизионной программе и т. п. Пластинка устанавливается на специальную приставку к телевизору, просвечивается лазерным лучом, и на экране телевизора проигрывается желаемая сцена или программа. Одна пластинка содержит запись 20-минутной программы. На 1980 г. в США планируется выпуск соответствующей аппаратуры на сумму в несколько миллиардов долларов.

Приведенные примеры трудно комментировать с точки зрения перспектив дальнейшего внедрения лазеров в быт, поскольку в этой области важны экономические, психологические, социальные, но не физические законы. Тем не менее сами по себе примеры впечатляющие.

В заключение данной части сообщения я перечислю еще несколько глобальных направлений применения лазеров. К таковым, безусловно, относятся лазерная связь, лазерная обработка информации, контроль, диагностика и анализ различных процессов, применение лазеров в науке, в частности в атомной и молекулярной физике, химии, биологии. По плану семинара многие из этих направлений будут рассматриваться на последующих заседаниях, и я позволю себе ограничиться приведенным, заведомо неполным перечнем.

**IV. Некоторые конкретные вопросы лазерной физики.** В последней части сообщения я остановлюсь на четырех конкретных вопросах, разбор которых помогает, как мне кажется, создать общее впечатление о состоянии дел в лазерной физике.

1. Первый вопрос касается нового измерения скорости света, произведенного группой Ивенсона в США (1972 г.). Скорость света является важнейшей физической постоянной, и в свое время было затрачено много усилий на постепенное уточнение ее значения. После измерений Майкельсона (1926 г.) ошибка определения скорости света составляла 4 км/с. За последующие 30 лет эта величина была снижена до 200 м/с. В методе, примененном Ивенсоном, непосредственно измерялась длина волны и частота излучения гелий-неонового лазера ( $\lambda = 3,39$  мкм). Длина волны измерялась путем интерферометрического сравнения с эталоном длины, в качестве которого сейчас принята длина волны оранжевого излучения криптона (605,8 нм). Частота лазера сравнивалась с эталоном времени. Скорость света находилась как произведение длины волны на частоту. В итоге мы знаем теперь скорость света с ошибкой 1 м/с.

Таким образом, применение лазерных методов позволило в данном случае повысить точность измерений сразу в 200 раз. Этот результат очень характерен и показателен вот в каком отношении. Установка Ивенсона чрезвычайно сложна и потребовала вложения больших материальных средств и человеческих усилий, однако затрачено им было все-таки существенно меньше труда, чем его предшественниками, добившимися тем не менее значительно худшей точности. Мне кажется, этот пример является веским аргументом в пользу утверждения о могуществе лазерных методов.

2. Остановимся теперь на некоторых результатах применения сверхкоротких импульсов света для исследования быстрых процессов.

Как известно, в недавнем прошлом существовала некоторая неопределенность в числовых значениях среднего времени поворотного броуновского движения молекул в жидкости. Указанное время определяет, например, инерционность эффекта Керра. Действительно, пусть жидкость помещена в постоянное электрическое поле. Если молекулы, составляющие жидкость, анизотропны, обладают различными поляризуемостями в разных направлениях, то индуцируемый полем дипольный момент не параллелен полю; возникающая пара сил поворачивает молекулы таким образом, чтобы ось молекулы, соответствующая большей поляризуемости, оказалась направленной вдоль напряженности поля. Следовательно, внешнее поле обуславливает частичную ориентированность молекул и жидкость приобретает анизотропию, которая, в свою очередь, вызывает двойное лучепреломление распространяющегося через нее света. Спрашивается, каково время релаксации анизотропии, т. е. за какой промежуток времени исчезает анизотропия после мгновенного выключения электрического поля? Понятно, что время релаксации анизотропии совпадает с временем деориентации молекул.

Сформулированный вопрос представляет большой интерес и с точки зрения физики жидкого состояния, и с точки зрения прикладной, поскольку явление Керра получило обширные технические применения. Попытки непосредственного измерения инерционности эффекта Керра не привели в свое время к мало-мальски надежным результатам, и теперь нам ясна причина неудач: время деориентации молекул оказалось порядка  $10^{-10}$ — $10^{-12}$  с и существовавшие тогда методы были слишком грубыми для измерения столь малых интервалов времени.

В 40-х годах время деориентации молекул было определено по спектру релеевского рассеяния света. Дело в том, что поворотное движение молекул модулирует рассеянный свет и обуславливает деполаризованную часть рассеянного света (так называемое крыло линии Релея). Ширина крыла линии Релея определяется обратным временем деориентации молекул. Измерения и оценки, основанные на изложенных соображениях, привели для ряда жидкостей к значениям релаксации анизотропии  $10^{-10}$ — $10^{-12}$  с.

Метод, базирующийся на изучении рассеянного света, имеет, очевидно, косвенный характер. Более того, форма крыла линии Релея оказалась сложнее ожидавшейся. Поэтому проблема оставалась не вполне выясненной.

Решительный успех был достигнут с помощью генераторов сверхкоротких импульсов. Аналогично случаю постоянного электрического поля ориентированность молекул (а следовательно, и анизотропия среды) создается электрическим полем импульса лазерного излучения с определенным состоянием поляризации. Схема опыта такова: в кювету с жидкостью последовательно направляются два сверхкоротких импульса света; первый импульс создает анизотропию в жидкости, а второй — служит для ее «зондирования». Изменяя время задержки второго импульса относительно первого, можно, очевидно, проследить за исчезновением анизотропии, наведенной первым импульсом. Таким способом были измерены времена релаксации анизотропии для нескольких жидкостей (табл. 2, первая колонка — значения  $\tau$ ; во второй колонке даны значения  $\tau$ , оцененные по спектральной ширине крыла линии Релея). Итак, теперь мы знаем непосредственно измеренные времена деориентации молекул, оказавшиеся весьма близкими к тем, которые даются методом релеевского рассеяния света.

Другой вопрос, столь же эффектно решенный с помощью сверхкоротких лазерных импульсов, связан с измерением времени существования возбужденных колебательных состояний молекул в жидкости.

Таблица 2

Вещество	$\tau, 10^{-12} \text{ с}$	
	СКИ	Крыло линии Релея
Сероуглерод $\text{CS}_2$ . . .	2,5	2,3
Нитробензол $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$ . . .	27,5	30
Толуол $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ . . .	5	4,4
Бензол $\text{C}_6\text{H}_6$ . . . . .	4	3

Таблица 3

Вещество	Линия КР, $\text{см}^{-1}$	$\tau_1$ $10^{-12} \text{ с}$	$\tau_2$ $10^{-12} \text{ с}$
Азот . . . . .	2326	75	
Этиловый спирт $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ . . . . .	2928	22	0,26
1. 1. 1-трихлор- этан $\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_3$ . . . . .	2939	5	1,3

И в этом случае косвенные методы, базировавшиеся на изучении оптико-акустического эффекта, контуров линий инфракрасного поглощения и комбинационного рассеяния света, не допускали согласующейся интерпретации и для времени релаксации колебаний сколь-нибудь уверенно можно было называть только порядок величины.

Лазерный метод измерения сводится в общих чертах к следующему. В кювету с жидкостью направляют два разделенных во времени сверхкороткого импульса. Первый импульс испытывает стоксово комбинационное рассеяние. Вследствие этого процесса молекулы, как известно, переходят в возбужденное колебательное состояние. Иными словами, «заселяется» один из колебательных уровней молекулы. Второй сверхкороткий световой импульс призван прозондировать созданную «заселенность». Интенсивность антистоксового комбинационного рассеяния второго импульса пропорциональна заселенности колебательного уровня, созданной первым импульсом и убывающей со временем в результате взаимодействия молекул с соседями. Измеряя интенсивность антистоксового рассеяния в зависимости от промежутка времени между первым и вторым импульсами, можно определить продолжительность возбужденных колебательных состояний.

В табл. 3 собраны некоторые данные  $\tau_1$ , полученные описанным способом; время релаксации колебаний оказалось равным  $10^{-10}$ — $10^{-11}$  с, причем ширинам линий комбинационного рассеяния (КР) соответствуют значительно меньшие времена  $\tau_2$  (второй столбец табл. 3).

Аналогичные опыты, выполненные с растворами, позволили выяснить, что в случае, например, трихлорэтана девозбуждение колебаний происходит в результате тройных столкновений: одной возбужденной и двух невозбужденных молекул. В случае же этилового спирта механизм релаксации колебаний оказался многоступенчатым и довольно сложным. Допустим, возбуждено колебание с частотой  $2928 \text{ см}^{-1}$ . Тогда за время, примерно равное  $0,5 \text{ пс}$  ( $1 \text{ пс} = 10^{-12} \text{ с}$ ), энергия передается группе колебаний с близкими частотами  $2972$ ,  $2877$  и  $2897 \text{ см}^{-1}$ . Затем в течение  $22 \text{ пс}$  энергия передается группе молекулярных колебаний с частотами  $1485$ ,  $1456$  и  $1395 \text{ см}^{-1}$ . Именно это время и фигурирует в табл. 3. Следовательно, дезактивация колебаний СН-групп происходит в результате внутримолекулярных процессов. Третий этап, длящийся  $40 \text{ пс}$ , состоит в релаксации колебаний со средними частотами.

Таким образом, для некоторых колебаний имеет место внутримолекулярная релаксация, как в случае высокочастотных колебаний молекулы этилового спирта, а для других — межмолекулярная релаксация, как в случае трихлорэтана.

Из разнообразных примеров видно, что сверхкороткие световые импульсы действительно являются мощным средством исследования быстропротекающих процессов, позволяя исследовать весьма тонкие детали явлений.

00-х годов на каждое предложение следовала неизменная реплика: «Важно сделать, а не предлагать». В последнее время популярность предложений вновь возросла, но их размах буквально поражает, и еще 10 лет назад они вызвали бы лишь скептические улыбки.

Сначала я рассмотрю предложение об использовании лазеров для создания тяги в летательных аппаратах. Идея состоит в том, чтобы энергия, необходимая для ускорения аппарата, поставлялась к нему в виде лазерного пучка. В этом случае наиболее громоздкое и тяжелое оборудование может находиться на Земле и аппарат освобождается от паразитного веса.

Обсуждаются два способа утилизации энергии, доставляемой летательному аппарату с помощью лазерного пучка. В первом способе мощное лазерное излучение фокусируется на тыльную сторону летательного аппарата, часть вещества его испаряется и выбрасывается в сторону Земли. В результате аппарат приобретает ускорение. По ряду соображений почти идеальным веществом для испарения оказывается графит. Расчеты, основанные на весьма детализированной теории, позволяют сделать следующие заключения. Для вывода на орбиту искусственного спутника Земли весом 100 кг нужно испарить 300 кг графита лазерным пучком мощностью  $10^9$  Вт в течение 10 с. При этом дальность действия принимается равной 100 км, расходимость пучка  $10^{-5}$  рад, диаметр мишени 1 м. В перечисленных условиях создается ускорение порядка  $10^2 g$  и сила тяги  $2 \cdot 10^4$  кг.

Другой способ создания «лазерной» тяги основан на явлении, получившем название лазерной искры. В лабораторных условиях оно выглядит так. При достаточно большой энергии импульса излучения в области его фокусировки возникает искра, объясняемая следующим образом. Электрическое поле света ускоряет свободные электроны, находящиеся в атмосфере или возникающие в результате многофотонной ионизации; образуется электронная лавина, которая и приводит к появлению искры, т. е. свечению создающейся плазмы. Если импульс излучения достаточно мощный и короткий, плазма нагревается лазерным излучением и возникает ударная волна, воспринимаемая как легкий хлопок. Ударную волну такого происхождения и предлагается использовать для создания тяги, соответственно увеличив мощность пучка излучения: тыльная сторона аппарата представляет собой зеркало, собирающее лазерный пучок в фокусе; ударная волна, образующаяся здесь по описанному механизму, попадает на то же зеркало и приводит его в движение. Оптимальная длительность импульса определяется временем развития плазмы и составляет около микросекунды. За время между импульсами рабочий объем должен заполняться новой порцией воздуха, чем определяется минимальная скважность последовательности импульсов ( $3 \cdot 10^2$ ). Итог: для создания силы тяги  $10^3$  кг нужна средняя мощность пучка порядка  $10^7$  Вт, пиковая мощность импульса  $3 \cdot 10^9$  Вт, энергия одного из импульсов 3 кДж.

Таким образом, скромные лабораторные исследования новых явлений (испарение вещества лазерным излучением, лазерная искра) привели к весьма грандиозным проектам.

4. Другим примером такого же ранга могут служить предложения о создании лазеров в рентгеновской области спектра ( $\lambda \sim 0,1$  нм). Сейчас оживленно обсуждается вопрос о возможностях создания рентгеновских лазеров и проводятся соответствующие поисковые работы. Среди многочисленных трудностей принципиальное значение имеет

резкое уменьшение времени радиационного распада уровней по мере продвижения в коротковолновую область спектра. Коэффициент Эйнштейна дается соотношением

$$A_{mn} = 8\pi^2 r_0 c \frac{f_{mn}}{\lambda^3} = 0,67 \cdot 10^{14} \frac{f_{mn}}{\lambda^3},$$

где  $r_0 = 2,8 \cdot 10^{-13}$  см — классический радиус электрона;  $c$  — скорость света;  $f_{mn}$  — сила осциллятора;  $\lambda$  — длина волны. В последнем равенстве длина волны выражена в нанометрах. Таким образом, вероятность спонтанного перехода обратно пропорциональна квадрату длины волны (силу осциллятора можно полагать мало зависящей от длины волны).

Для видимой области спектра ( $\lambda \sim 10^3$  нм) имеем  $A_{mn} = 10^8$  с<sup>-1</sup>. Если же  $\lambda = 0,1$  нм, то вероятность приобретает значение  $10^{15} - 10^{16}$  с<sup>-1</sup>.

Большая скорость распада возбужденных состояний требует очень энергичного возбуждения. В расчете на один возбужденный атом требуется мощность, равная

$$P \cong \hbar \omega A_{mn} = 16\pi^3 r_0 c^2 \frac{f_{mn}}{\lambda^3} \cong 10^{-2} \frac{f_{mn}}{\lambda^3}.$$

С укорочением длины волны величина мощности растет ( $\lambda^{-3}$ ) еще быстрее, чем  $A_{mn}$ . Например, для  $\lambda = 0,1$  нм нужна мощность около 1 Вт/атом, в то время как для видимой области спектра та же величина составляет  $10^{-10} - 10^{-11}$  Вт/атом. Отличие разительное.

Вторая непосредственно видимая трудность связана с малыми значениями коэффициентов отражения в рентгеновской области спектра, что препятствует достижению порога генерации. Как известно, условие порога генерации имеет вид

$$\alpha l > 1/r,$$

где  $\alpha$  — коэффициент усиления;  $l$  — длина усиливающей среды;  $r$  — коэффициент отражения зеркал резонатора. В видимой области спектра можно иметь  $r = 0,9 - 0,99$ ,  $l = 10 - 10^2$  см, и необходимое усиление составляет  $10^{-2} - 10^{-4}$  см<sup>-1</sup>.

Физический смысл условия порога генерации состоит, как известно, в том, что увеличение энергии поля внутри резонатора за время одного прохода превышает величину энергии, уходящей из резонатора за то же время. В результате величина энергии внутри лазера быстро нарастает и в течение нескольких проходов обуславливается перевод энергии, запасенной в активной среде, в энергию лазерного излучения. Ввиду малой величины  $r$  в рентгеновской области надеются на использование другого варианта, а именно: если коэффициент усиления достаточно велик, то и за время одного прохода активной среды может полностью «высвободиться» запасенная в ней энергия. По такому принципу работает обширный класс лазеров в видимой, ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра (так называемые лазеры на сверхсветимости), и соответствующие условия хорошо изучены. Оказывается, что нужно выполнить условие

$$\alpha l \cong 20. \quad (1)$$

Выполнение этого условия обеспечивает неплохую направленность излучения. Что касается временной когерентности (монохроматичности), то лазеры на сверхсветимости, как правило, ею не обладают, т. е. спектр их излучения относительно широк. Закроем глаза на это обстоятельство и выясним последствия условия (1).

Выражение для  $\alpha$  имеет вид

$$\alpha = \lambda^2 A_{mn} N / (4\Delta\omega),$$

где  $\Delta\omega$  — спектральная ширина линии,  $N$  — разность заселенностей уровней в расчете на  $1 \text{ см}^3$ . Итого, критерий сверхсветимости дает

$$N \cong \frac{20}{\alpha l} N = \frac{80}{\lambda^2 l} \frac{\Delta\omega}{A_{mn}} \cong 10^{16} \frac{\Delta\omega}{l A_{mn}} \frac{1}{\lambda^2},$$

причем в последнем равенстве  $\lambda$  выражена в нанометрах. Отношение  $\Delta\omega/A_{mn}$  всегда несколько больше 1, так что это отношение нецелесообразно выражать через другие величины. Мы видим, что концентрация возбужденных атомов должна быть очень высокой (не менее  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) и в случае полной плотности  $10^{22} \text{ см}^{-3}$  должна составлять заметную часть всех атомов ( $10^{-4}$ ).

Теперь выясним необходимый объем активной среды и мощность возбуждения. Примем во внимание распространение рентгеновского излучения, возможность концентрации энергии возбуждения на малой площади, разлет частиц активной среды и ряд других обстоятельств. Этот этап менее нагляден, и я его не буду воспроизводить. Результат таков: если в качестве источника возбуждающей энергии применить лазер (например, неодимовый), то необходимая мощность возбуждения ( $\lambda=0,1 \text{ нм}$ ) должна быть порядка  $10^{14}$ — $10^{15}$  Вт при длительности импульса  $10^{-10}$  с. Цифры огромные, хотя и не недостижимые. Такой лазер, обеспечивающий возбуждение рентгеновского собрата, будет занимать, наверное, не одну сотню квадратных метров. При КПД=1% световая энергия  $10^5$  Дж потребует батареи конденсаторов на 10 МДж.

Последние два примера (лазерная тяга и рентгеновский лазер) наглядно показывают уровень работ, проводимых в области лазерной физики, высоту полета фантазии работающих здесь людей, порождаемую исключительными успехами лазеров в науке и технике. Специалисты почувствовали свои возможности, всемогущество лазеров. Я думаю, что это самоутверждение и есть особая примета наших дней. Атмосфера сознания всемогущества лазеров и является, по моему мнению, основным успехом лазерной физики, что и оправдывает название моего сообщения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лазеры на красителях. Под ред. Шефера Ф. П. М., «Мир», 1976.
2. Богданкевич О. В., Дарзнец С. А., Елисеев П. Г. Полупроводниковые лазеры. М., «Наука», 1976.
3. Применения лазеров. Под ред. Тычинского В. П. М., «Мир», 1974.
4. Бункин Ф. В., Прохоров А. М. Использование лазерного источника энергии для создания реактивной тяги.— «УФН», 1976, т. 119, с. 425.
5. Петраш Г. Г. Импульсные газоразрядные лазеры.— «УФН», 1971, с. 105, с. 645.
6. Песин М. С., Фабелинский И. Л. Пикосекундная спектроскопия и изучение быстротекающих процессов.— «УФН», 1976, т. 120, с. 273.
7. Чаплин Дж., Вуд Л. Рентгеновские лазеры.— «УФН», 1977, т. 121, с. 331.

Поступила в редакцию 5 июля 1977 г.