

CERTAIN PROBLEMS OF LASER GAS DYNAMICS

Yu. Khlopkov, Doctor of Mathematical and Physical sciences,
Full Professor
V. Zharov, Candidate of Mathematical and Physical sciences,
Associate Professor
M.M. Zay Yar, Candidate of Mathematical and Physical sciences,
Doctoral Candidate
Moscow Institute of Physics and Technology, Russia

Usually the science dealing with the problem of creating coherent radiation is called quantum electronics. Studying the properties of laser radiation has opened new page in science - non-linear optics. It seems that both of these disciplines are very far from the gas dynamics that has no relation to the creation and application of lasers. The purpose of this paper to show that creation and use of lasers requires multiple solutions of gas dynamic problems which are the fundamental importance for the development of laser technology.

Keywords: laser technology, laser in gas dynamics, quantum electronics, gas dynamics problems.

Conference participants, National championship
in scientific analytics

Обычно науку, занимающуюся проблемами создания когерентного излучения, называют квантовой электроникой. Изучение свойств лазерных излучений открыло новую страницу в еще одной науке – нелинейной оптике. Кажется, что обе эти дисциплины очень далеки от газодинамики, что газодинамика не имеет никакого отношения к созданию и применению лазеров. Цель настоящей работы показать, что это не так, что создание и использование лазеров требует решения множества газодинамических проблем, имеющих фундаментальное значение для развития лазерной техники. Многие из этих проблем являются видоизменением проблем, в решении которых газодинамика накопили огромный опыт. В то же время лазерная техника выдвигает целый ряд новых газодинамических задач. Все их можно объединить общим названием – лазерная газодинамика [1, 2]. Многие газодинамики и целые коллективы, работавшие в области газодинамики, например, в AVCO, NASA, ONERA, ЦАГИ, МФТИ, различных авиационных фирмах внесли ощутимый вклад в эту науку.

Слово лазер состоит из первых букв английских слов, определяющих его сущность: LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Тот факт, что молекулы вещества могут наряду со спонтанным (самопроизвольным) излучением и поглощением квантов, испускать их под действием излучения, был установлен А. Эйнштейном еще в 1918 году. При поглощении кванта молекула переходит из некоторого энергетического состояния в состояние с энергией большей как раз на величину кванта $h\nu$, где h – постоянная Планка и ν – частота излучения. При испускании кванта происходит обратный переход с более высокого энергетического уровня на более низкий. Если квант света взаимодействует с молекулой, находящейся на нижнем уровне, то имеется определенная вероятность его поглощения. Если квант «встречается» с возбужденной молекулой, находящейся на верхнем энергетическом уровне, то имеется та же вероятность вынужденного испускания

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ

Хлопков Ю.И., д-р физ.-мат. наук, проф.
Жаров В.А., канд. физ.-мат. наук, доцент
Зей М.М., канд. физ.-мат. наук, докторант
Московский физико-технический институт, Россия

Обычно науку, занимающуюся проблемами создания когерентного излучения, называют квантовой электроникой. Изучение свойств лазерных излучений открыло новую страницу в еще одной науке – нелинейной оптике. Кажется, что обе эти дисциплины очень далеки от газодинамики, что газодинамика не имеет никакого отношения к созданию и применению лазеров. Цель настоящей работы показать, что это не так, что создание и использование лазеров требует решения множества газодинамических проблем, имеющих фундаментальное значение для развития лазерной техники.

Ключевые слова: лазерная техника, лазер в газодинамика, квантовая электроника, газодинамические проблемы.

Участники конференции, Национального первенства
по научной аналитике

нового кванта. Очевидно, что чем больше молекул находится на верхнем уровне, тем больше вероятность того, что при прохождении через вещество излучения (потока квантов) последнее усилится [3].

В равновесном состоянии при любой температуре, в любом веществе молекул, находящихся на верхнем уровне, всегда меньше, чем на нижнем. Поэтому обычно наблюдается поглощение света. Для того, чтобы произошло усиление, нужно создать «ненормальную» неравновесную ситуацию, в которой на верхнем уровне находится больше молекул, чем на нижнем или, как говорят, создать инверсию. Квантовая теория призвана определить молекулы, возбуждением которых можно создать инверсию между теми или иными ее уровнями, указать вероятности элементарных процессов, приводящих к возбуждению и дезактивации тех или иных уровней. Этим, в основном, ее роль и исчерпывается. Далее возникает вопрос: как осуществить те процессы, которые должны привести к инверсии?

Лазерные вещества могут быть твердыми, жидкими и газообразными. Для всех этих веществ способы создания инверсии или, как говорят, «накачки» достаточно разнообразны. Накачку можно осуществить светом, разрядом, электронным пучком, в химических реакциях и т.д. Среди методов накачки одно из ведущих мест занимают газодинамические методы. Но каков бы ни был способ накачки, он никогда не бывает идеальным: только часть затрачиваемой энергии идет непосредственно на возбуждение уровней, остальная затрачивается на нагревание вещества. Нагревание увеличивает заполнение нижнего лазерного уровня, т.е. уменьшает инверсию. Поэтому это паразитное тепло нужно отводить. Его можно отводить, например, теплопроводностью. Однако это процесс медленный и с его помощью можно отводить с единицы поверхности лишь сравнительно небольшие мощности. Для отвода больших мощностей целесообразно сменять рабочее тело. Очевидно, что менять рабочее тело с большой скоростью

легче всего путем прокачки газа через зону возбуждений. Сразу же вспоминаются аэродинамические трубы, в которых создаются высокоскоростные потоки газа. И действительно, первые лазеры значительной мощности были созданы, например в AVCO, путем сравнительно небольшой переделки сверхзвуковой аэродинамической трубы [4]. Таким образом, мы приходим к первой задаче лазерной газодинамики – к задаче смены рабочего тела, т.е. прокачки газа. Здесь возникают все привычные, но при специфических условиях, задачи нагрева газа в форкамере, разгона в соплах, восстановления давления в диффузоре и т.д.

В зоне накачки возбуждение молекул может происходить в результате столкновения с электронами. Эта проблема сродни проблемам подогрева газа в плазменных подогревателях, в аэродинамических трубах с электромагнитным разгоном или в магнитогидродинамических генераторах. Если инверсия возникает в химической реакции (химические лазеры), то здесь газодинамические проблемы выходят на передний план. Это проблемы смешения реагентов в нужных пропорциях и с определенной скоростью.

В указанных примерах газодинамика способствует процессу накачки, создаваемой разрядом или реакцией. Однако инверсия может быть получена чисто газодинамическим путем. Действительно, известно, что если газ разогреть, а затем быстро охладить, то разные степени свободы молекул (разные уровни) релаксируют к новому состоянию с разной скоростью. Поэтому оказывается возможным найти такие вещества, при быстром расширении (охлаждении) которых в верхнем возбужденном состоянии оказывается больше молекул, чем в нижнем, т.е. создается инверсия. Естественный путь быстрого охлаждения газа – это расширение нагретого в форкамере газа в сверхзвуковом сопле. На этом принципе основан так называемый газодинамический лазер.

Созданием инверсии, однако, не завершается создание лазера. Инвертированная активная среда позволяет усиливать излучение. Для того, чтобы лазер мог излучать самостоятельно, без задающего (усиливаемого) излучения, нужна обратная связь. Эта обратная связь создается системой зеркал – резонатором. Спонтанно возникшее излучение отражается от зеркал, многократно проходит через усиливающую среду. Если усиление оказывается больше потерь, то лазер начинает излучать. В соплах и резонаторе происходит сложный комплекс релаксационных процессов в прокачиваемой активной среде при наличии излучения. С релаксационными процессами, химическими реакциями и излучением в различного рода течениях газодинамики имеют дело уже давно в реактивных двигателях, в соплах гиперзвуковых аэродинамических труб, при обтекании тел, входящих в атмосферу Земли и других планет. Накопленный опыт может быть использован и при решении соответствующих задач лазерной газодинамики, обладающих в то же время существенной спецификой.

После того как излучение в лазере получено, его нужно из него вывести. В настоящее время еще нет «стекло», пропускающих мощное излучение. С другой стороны,

давление в окружающей среде, как правило, не равно давлению в резонаторе лазера и в то же время нельзя допустить перетекания окружающей среды в резонатор или наоборот. Здесь опять на помощь приходит газодинамика, так называемые газодинамические окна, т.е. течения газа, удерживающие поперечный перепад давления. Сейчас уже предложен ряд типов таких окон, при создании которых приходится искать компромисс между минимумом расхода, затрачиваемого на удержание перепада давления газа, и минимумом искажения потоком в окне выходящего луча [1, 5].

Основной характеристикой активной среды лазера является коэффициент усиления, определяемый следующим образом. Пусть монохроматическое излучение частоты ν падает на некоторую площадку, перпендикулярную к направлению его распространения x . Для бесконечно тонкого слоя газа dx изменение потока энергии пропорционально толщине этого слоя и интенсивности падающего излучения (закон Ламберта–Бугера). Поэтому в расчете на единичную площадь

$$dI_\nu = k_\nu I_\nu dx,$$

где I_ν – спектральная интенсивность излучения, распространяющегося в направлении x . Коэффициент k_ν называется коэффициентом усиления или поглощения в зависимости от характера взаимодействия излучения с веществом.

Привлекая представления об индуцированном излучении и поглощении и соответствующих коэффициентах Эйнштейна, можно показать, что

$$k_\nu = \frac{h\nu}{c} b_{nm} \left[\frac{g_n}{g_m} N_m - N_n \right],$$

где b_{nm} – спектральный коэффициент Эйнштейна для индуцированного поглощения; N_m и N_n – плотности атомов или молекул на m -ом и n -ом энергетических уровнях, причем $E_m - E_n = h\nu$ – квант излучения с частотой ν ; E_m – энергии m -го уровня; g_n и g_m – вырождение энергетических уровней n и m ; h и c – постоянная Планка и скорость света.

Спектральные коэффициенты Эйнштейна могут быть связаны с полными (интегральными) коэффициентами с помощью соотношений вида

$$b_{nm}(\nu) = B_{nm} \frac{g(\nu)}{\Delta\nu}, \quad \overline{\Delta\nu} = \int g(\nu) d\nu,$$

где B_{nm} – полный коэффициент Эйнштейна для индуцированного поглощения, $\overline{\Delta\nu}$ – ширина линии, контур которой определяется функцией $g(\nu)$.

Интенсивность излучения (или величина поглощаемой энергии) пропорциональна вероятности перехода и, следовательно, меняется в пределах линии так же, как и $g(\nu)$. Эта зависимость имеет обычно колоколообразный вид. Из всех причин уширения спектральных линий наиболее важными являются столкновения и тепловое движение атомов или молекул. Для того, чтобы свет усиливался при прохождении через газ, необходимо неравенство, которое указывает на наличие инверсии заселенностей, когда на верхнем уровне, обладающем большой энергией, атомов или моле-

кул больше, чем на нижнем (с учетом статистического веса или вырождения)

$$\frac{N_m}{g_m} > \frac{N_n}{g_n}$$

Для создания активной среды, т.е. среды, усиливающей проходящее через нее излучения, необходимо обеспечить выполнение этого неравенства. Нетрудно показать, что это невозможно осуществить в случае термодинамического равновесия, когда распределение атомов или молекул по уровням является бoльцмановским. Иными словами, усиления средой возможно только в существенно неравновесных ситуациях.

Способы накачки могут быть самыми разнообразными: оптическая накачка среды при воздействии на нее света; накачка электронным ударом в разряде. Широко используются также тепловой и химический способы накачки.

Существенно при этом то, что как процесс накачки активной среды, так и последующее излучение сопровождаются более или менее значительным теплоподводом в среду, вследствие чего может повышаться ее температура. Между тем возможность создания инверсно заселенной среды и поддержание этого состояния в течение достаточного времени (что необходимо для работы лазеров непрерывного действия), часто самым тесным образом связаны с уровнем температуры среды, которая для этого должна быть достаточно низкой. В связи с этим мощность лазера в значительной мере определяется используемым способом отвода тепла от активной зоны.

В тех газовых лазерах, где этот процесс контролируется теплопроводностью и диффузией, характерное время, определяющее теплоотвод, совпадает с временем диффузии T_{diff}

$$T_{diff} = \left(\frac{D}{l}\right)^2 \frac{l}{\bar{c}} = \frac{D^2}{l\bar{c}}$$

Здесь D – характерный размер, на котором происходят процессы теплопроводности и диффузии (совпадающий, очевидно, с характерным размером устройства), l – длина пробега молекулы, \bar{c} – средняя скорость их теплового движения, сравнимая со скоростью звука в газе.

В проточных системах, где газ движется со скоростью V , конвективно осуществляемый теплоотвод определяется характерным временем порядка D/V .

Таким образом, для одинаковых объемов активной среды и одинаковой плотности газа отношение мощностей излучения, которые могут быть получены от лазера проточной схемы и лазера с неподвижной средой, есть *просто* отношение характерных времен, определяющих теплоотвод, и имеет величину порядка $(D/l) \times (V/\bar{c})$. Для типичных условий работы газовых лазеров эта величина меняется в пределах от 10^3 до 10^5 . Данное обстоятельство объясняет как то, что именно на проточных лазерах получены рекордные мощности излучения, так и то, почему на рубеже 50-х и 60-х годов, когда начали появляться первые газовые лазеры, возникло тесное взаимодействие между техникой лазеров большой мощности и газовой динамикой. Это привело к появлению некоторых необычных

приложений газовых потоков и новых областей для исследований в газовой динамике, хотя и не потребовало создания каких-либо принципиально новых методов, а также привлечения принципиально новых физических образов и моделей.

Таким образом, на всех этапах (создание излучения, его распространение, использование) возникает большое число газодинамических задач, при решении которых неоценимую помощь может оказать огромный опыт, накопленный в авиации и космонавтике. С другой стороны, развитие лазерной техники открывает новые возможности для авиации и ракетостроения.

References:

1. Лосев С.А. Газдинамические лазеры – Изд. М.: Наука, 1977.
2. Gerry E.T. Gasdynamic lasers «IEEE Spectrum», 1970, November, pp.51-58.
3. Clark P.O. Design considerations for high power cavities - AIAA Paper, N 72-708, 1972.
4. Christiansen W.H., Russell D.A., Hertzberg A. Flow lasers - Ann. Rev. Fluid Mech. 1975, vol 7, pp. 115-139.
5. Тарасов Л.В. Физика лазера. Изд. 3, - 2011.

