**Лазерные системы отвода тепла**

Валентин Подвысоцкий

По виду используемой энергии космические двигатели подразделяются на четыре типа: термохимические, ядерные, электрические, солнечно-парусные. В последнее время появились данные о возможности создания нового пятого типа двигателей, использующих кинетическую энергию космического аппарата [1]. Каждый из указанных типов имеет свои преимущества и недостатки, и может применяться в тех или иных условиях.

При разработке всех космических двигателей общей проблемой является утилизация избыточного тепла. Основным, обсуждаемым в литературе методом отвода мощности, является лучистый теплоотвод с помощью радиаторов различного вида. Излучение теплового источника представляет собой суммарный эффект излучения всех атомов и молекул. Причём все они излучают спонтанно и независимо друг от друга. Это связано с независимостью, случайностью элементарных актов возбуждения, основной причиной которых являются столкновения атомов в нагретых телах.

Величина необходимой площади поверхности радиатора связана с мощностью по закону Стефана – Больцмана (излучаемая мощность пропорциональна площади излучающей поверхности и четвертой степени ее температуры). Допустим, при КПД 50% и удельном импульсе 10 000 с, космический двигатель развивает тягу 50 кг. При температуре радиатора 1000ºК, площадь его поверхности должна составлять около 4200 м2. Таким образом, радиатор если не самая массивная, то наиболее громоздкая часть двигательной установки космического аппарата.

При минимальной массе и объеме космические двигатели должны вырабатывать наибольшую мощность. За счет этого достигается улучшение их технических характеристик (увеличивается тяга и повышается удельный импульс). Возрастание мощности сопровождается увеличением размеров и массы радиатора. При достижении определенной мощности радиатор становится настолько большим и массивным, что его невозможно разместить на борту космического аппарата. Это обстоятельство является барьером на пути развития космических двигательных установок.

Суть предлагаемой разработки заключается в использовании принципиально иного метода высвечивания возбуждённых атомов. Это механизм вынужденного излучения, позволяющий получать очень высокую интенсивность излучения. Его применение позволит значительно уменьшить размеры и массу системы теплоотвода. Для утилизации избыточного тепла, получаемого в процессе работы космического двигателя, предполагается использовать лазеры с тепловой накачкой. Рассмотрим один из способов создания инверсии населенностей, за счет теплового нагрева, который реализуется в газодинамических лазерах.

В настоящее время газодинамические лазеры, работающие на колебательно-вращательных переходах молекул, являются наиболее мощными лазерами непрерывного действия. Принцип их действия можно понять, рассмотрев физическую схему происходящих процессов [2]. Вначале рабочий газ нагревается (обычно до 1000...3000 К), при этом происходит возбуждение колебательных степеней свободы его молекул.

Линейная симметричная молекула CO2 может совершать колебания трех типов. Колебания 1-го типа называются симметричными, 2-го типа – деформационными, 3-го типа – антисимметричными. В условиях термодинамического равновесия, чем больше энергия колебательного уровня, тем меньше его населённость. Для создания лазерного эффекта необходимо, чтобы населенность частиц верхнего уровня (3), превосходила населенности нижних уровней (1 и 2).

Предварительно нагретый в теплообменнике газ поступает в сопло, где расширяется и охлаждается. Если охлаждение газа происходит достаточно быстро, то в результате столкновений частиц, энергия антисимметричных (3) колебаний не успевает перейти в тепловую. Вместе с тем, энергия деформационных (2) и симметричных (1) колебаний очень быстро переходит в тепловую (особенно в присутствии воды и гелия). В результате, за счет антисимметричных колебаний (3), большая часть молекул охлажденного газа, будут иметь определенную избыточную энергию (такая ситуация называется инверсией населенностей).

Активная среда с инверсией населенностей обладает способностью усиливать световую волну. Усиление зависит от пути, проходимого волной в этой среде [3]. Чтобы увеличить этот путь, активная среда помещается между двумя параллельными отражателями (это могут быть плоские зеркала, сферические, комбинации плоских и сферических и др.). Одно из зеркал полупрозрачное, другое непрозрачное.

Такая система отражателей является резонатором. Волна, распространяющаяся вдоль его оси, попадает в наиболее благоприятные условия. Усиливаясь, она достигнет зеркала, отразится от него и пойдёт в обратном направлении, продолжая усиливаться, затем отразится от второго зеркала и т.д. Если усиление больше потерь, испытываемых волной при отражении, то с каждым проходом волна будет усиливаться, пока плотность энергии в волне не достигнет некоторого предельного значения.

Рост плотности энергии прекращается, когда выделяемая в результате вынужденных переходов энергия, не может компенсироваться энергией, затрачиваемой на возбуждение атомов. В результате между зеркалами устанавливается стоячая волна, а сквозь полупрозрачное зеркало выходит наружу поток когерентного излучения, которое характеризуется высокой направленностью и монохроматичностью.

Относительным конструктивным недостатком всех существующих лазеров является ограниченный рабочий объем отражателя (резонатора). Внутри этого объема невозможно разместить достаточно большое количество активной среды. В результате, мощность современных лазеров не превышает несколько десятков кВт. Кроме того, особенности создания инверсии населенностей в газодинамическом лазере, приводят к существенному несовпадению рабочего объема резонатора с объемом активной среды. В результате значительная часть активной среды не принимает участия в формировании лазерного луча и КПД газодинамического лазера не превышает 1%. Впрочем, если учитывать энергию лазерных квантов, которые уходят через открытые боковые поверхности резонатора, коэффициент преобразования тепловой энергии в энергию излучения оказывается значительно выше. Небольшая мощность и низкий КПД преобразования тепловой энергии в энергию излучения, могут значительно осложнить задачу создания лазерных систем отвода тепла.

Новизна разработки заключается в существенном изменении конструкции отражателя, которое позволит значительно увеличить мощность и повысить КПД лазера. Отражатель лазера можно выполнить в виде полупрозрачной трубы, внутри которой находится активная среда. Спонтанное излучение возбуждённых атомов вызывает вынужденные переходы других возбуждённых атомов, и вследствие этого усиливается. Светоотражающий слой пропускает наружу некоторую незначительную (1...2%) часть светового потока. Большая часть излученной энергии, отражаясь от светоотражающего слоя, возвращается в активную среду, вызывая новые и новые акты вынужденного излучения.

Предложенный отражатель можно выполнить в виде трубы переменного сечения. Это позволит организовать течение газа таким образом, чтобы на определенном участке трубы-отражателя в движущемся газе возникала инверсия населенностей. На этом участке, через полупрозрачную поверхность трубы-отражателя, наружу выходит интенсивный поток излучения. В результате газ теряет часть энергии и возвращается в теплообменник. Чтобы обеспечить непрерывное течение газа по замкнутому контуру дополнительно может понадобиться компрессор.

Лазерный отражатель указанной конструкции не сможет выполнять функции резонатора. Наличие боковых стенок значительно увеличивает число возможных типов колебаний (мод). Вместо усиления волны, движущейся вдоль его оси, будет происходить генерация новых и новых волн. В результате, через полупрозрачную поверхность отражателя наружу будет выходить поток немонохроматичного излучения, которое заполнит широкий интервал длин волн. Кроме того, это излучение будет некогерентным и расходящимся. Безвозвратно теряются практически все уникальные свойства лазерного луча.

Из всех полезных качеств лазера сохраняется лишь высокая интенсивность излучения, на несколько порядков превышающая интенсивность излучения поверхности тепловых радиаторов, при любых реально достижимых температурах. Изменение конструкции позволит увеличить рабочий объем лазерного отражателя в тысячи раз. В результате резко увеличивается пропускная способность, и соответственно возрастает мощность лазера. За счет этого можно попытаться решить проблему отвода большого количества избыточного тепла в космическом пространстве.

В отличие от классического открытого резонатора, такой лазерный отражатель можно заполнить излучением с практически равной интенсивностью. Форму и размеры отражателя можно подобрать таким образом, чтобы инверсия населенностей не распространялась за его пределы. Это обеспечит полное и равномерное использование всей активной среды. В результате не только увеличивается мощность газодинамического лазера, но и существенно повышается КПД преобразования тепловой энергии газа в энергию излучения. С учетом этого, преимущество предлагаемых отражателей для создания мощных лазерных систем отвода тепла становится очевидным.

**Список литературы**

Подвысоцкий В.В. Космические двигатели третьего тысячелетия. НиТ, 2003.

Осипов А.И. Неравновесный газ. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 1988.

Собельман И.И. Квантовая электроника. Маленькая энциклопедия. М.: Наука, 1969.