

К. т. н. Е. Б. МЕХАНЦЕВ, к. т. н. Е. Т. ЗАМКОВ,  
А. В. ПАЛИЙ

Россия, Таганрогский гос. радиотехнический университет  
E-mail: kes@fer.tsure.ru

Дата поступления в редакцию  
13.01 2006 г.

Оппонент д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК  
(ЧО ИПМ, г. Черновцы)

## КОНДЕНСОР ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНОГО РЕФРИЖЕРАТОРА

*Приводится теоретическое обоснование использования лазерного рефрижератора с газодинамической накачкой в качестве оптимизированного конденсора тепловой трубы.*

Тепловая труба является эффективной системой теплоотвода. Ее эффективность определяется прежде всего скоростью движения рабочего вещества в испарительно-конденсационном цикле внутри полости паропровода.

Ранее описывалась возможность оптимизации паропровода классической тепловой трубы гравитационного типа (термосифона) исполнением его в виде сверхзвукового сопла Лавала [1]. В данной работе предлагается использовать в этих целях лазерный рефрижератор с газодинамической накачкой соплом Лавала.

Известно, что воздействие света на вещество приводит к передаче ему энергии и импульса, приносимых световой волной. Обнаружение в 1928 г. антистоксового и стоксового режимов рассеивания света показало принципиальную возможность охлаждения вещества. Идею механического действия лазерного излучения на свободные атомы можно объяснить следующим образом [2].

Доля медленных атомов в максвелловском распределении атомов по скоростям в пучке очень мала. Больше всего атомов со среднетепловой скоростью. Допустим, что лазер настроен в резонанс с этими атомами. Фотонный пучок направлен навстречу атомному пучку. Тогда если частоту лазерной волны отстроить в красную сторону от центра атомного резонанса на величину полуширины доплеровской линии, то группа атомов вблизи резонансной скорости будет испытывать трение в потоке встречных фотонов, их скорость будет уменьшаться.

$$|kv - (v_{\text{доп}} - v_{\text{лаз}})| < \Gamma, \quad (1)$$

где  $v$  — скорость атомов;

$v_{\text{доп}}$  — частота центра доплеровски-уширенного перехода;

$v_{\text{лаз}}$  — частота лазера;

$2\Gamma$  — однородная ширина атомного перехода.

При этом условие резонанса нарушаться не будет, если частоту поля повышать так, чтобы отстройка частоты отслеживала изменение доплеровского сдвига группы этих атомов, испытывающей действие силы светового трения. С энергетической точки зрения атомы поглощают низкоэнергетические фотоны, а затем

в среднем изотропно излучают фотоны так, что испущенный свет уже не имеет доплеровского сдвига и, как следствие, большей частоты. Эта разница в энергиях фотонов представляет собой то количество теплоты, которое отбирается у атомов.

Рассмотрим возможность выполнения конденсора для тепловой трубы гравитационного типа в виде лазерного рефрижератора с газодинамической накачкой.

Все многообразие лазеров, создаваемых для различных целей, обычно классифицируется по виду активной лазерной среды и принципу создания инверсной заселенности (по принципу энергетической накачки). Для решения нашей задачи следует использовать газодинамические лазеры, описанные в [3].

В лазерах с газодинамической накачкой инверсная заселенность создается нагревом активной смеси до больших температур и последующим резким охлаждением за счет быстрого расширения в сверхзвуковом сопле (например, сопле Лавала). Рассмотрим этот процесс на примере широко распространенной схемы газодинамического лазера (рис. 1).

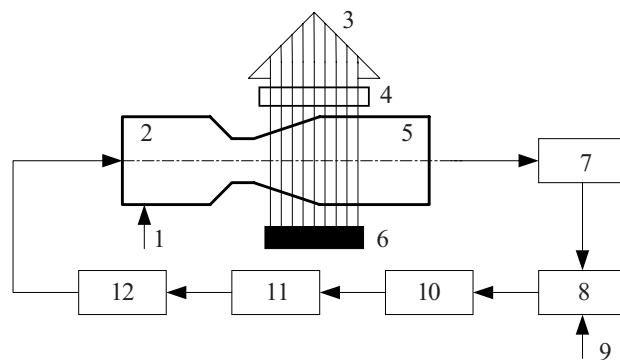


Рис. 1. Схема газодинамического лазера:

1 — подача топлива; 2 — камера сгорания; 3 — лазерный луч; 4, 6 — зеркала резонатора; 5 — камера резонатора; 7 — диффузор; 8 — регенератор; 9 — клапан подачи газа; 10, 12 — теплообменники; 11 — компрессор

Активная смесь под давлением нагревается в камере сгорания 2, проходит через сопловой блок и быстро расширяется в камере резонатора 5. Температура смеси при этом падает. Затем рабочий газ проходит через диффузор 7, систему регенерации 8, теплообменник 10 и компрессор 11. Пополнение газа предусматривается через клапан 9. Вместо камеры сгорания с системой подачи топлива могут использоваться различные нагревательные устройства.

Возбуждение колебательных уровней молекул газа происходит путем нагрева смеси и, кроме того, за счет резонансной передачи энергии от возбужденных молекул.

При нагревании смеси заселяются все уровни, в том числе и лазерные уровни молекул. Заселенность уровней является равновесной и определяется соотношением Больцмана. При истечении через сверхзвуковое сопло происходит резкое адиабатное расширение и охлаждение смеси. Заселенность лазерных уровней приходит в равновесие с новой температурой не мгновенно, а за время колебательной релаксации молекул газа. Так как время релаксации  $t_p^B$  верхнего лазерного уровня газа значительно больше времени релаксации нижнего лазерного уровня  $t_p^H$ , то через интервал времени  $\approx t_p^H$  в активной среде возникает инверсная заселенность  $n_B > n_H$ . Это и означает, что происходит снижение температуры газа.

Эффективность такого способа отведения тепла зависит от КПД лазера. КПД газодинамических лазеров можно представить как отношение энергии лазерного излучения  $E_L$  к энергии нагрева  $E_H$  рабочей смеси:

$$\eta_L \approx \frac{E_B \eta_p \eta_{kv}}{kT_H} \exp(-E_2/kT_H), \quad (2)$$

где  $E_B$  — энергия верхнего лазерного уровня молекул газа;  
 $\eta_p$  — КПД резонатора;  
 $\eta_{kv}$  — квантовый КПД;  
 $T_H$  — температура нагрева рабочей среды.

Газодинамические лазеры замкнутого цикла имеют КПД  $\eta_L \approx 0,1 \dots 0,16$ , а КПД лазеров открытого цикла —  $\eta_L \approx 0,02 \dots 0,08$  [3, с. 452—454]. Значения температуры нагрева  $T_H$  активной среды ограничены процессами диссоциации молекул рабочего газа. Это ограничение можно устранить непосредственной подачей газа в сопло.

Мощность газодинамического лазера можно записать так:

$$N_L = h\nu_L N' \eta_c \eta_p, \quad (3)$$

где  $h\nu_L$  — энергия квантов генерации;  
 $N'$  — секундный расход молекул газа;  
 $\gamma$  — число колебательных квантов;  
 $\eta_c$  — КПД эффективности сопла.

По сути рассмотренные газодинамические лазеры — устройства, обеспечивающие прямое преобразование тепловой энергии в энергию когерентного электромагнитного излучения.

Схема действия тепловой трубы с оптимизированным конденсором при помощи использования лазерного рефрижератора с газодинамической накачкой сверхзвуковым соплом Лавала может быть представлена следующим образом (рис. 2).

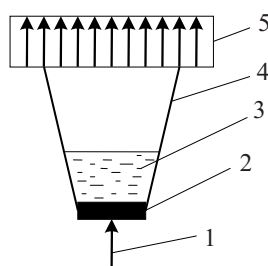


Рис. 2. Схема действия тепловой трубы с оптимизированным конденсором:  
 1 — направление теплового потока; 2 — источник тепла; 3 — рабочее вещество; 4 — паропровод в виде сопла Лавала; 5 — излучение

Как было отмечено выше, КПД газодинамических лазеров довольно низкий, из-за чего эффективность конденсора тепловой трубы на основе лазерного рефрижератора тоже невысокая. Однако решение представляет интерес как с точки зрения самой принципиальной возможности увеличения эффективности охлаждения, так и с позиций перспектив ее повышения.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Замков Е. Т., Механцев Е. Б., Палий А. В. Пути усовершенствования характеристик тепловых труб // Известия ТРТУ.— 2005.— № 9.— С. 118—121.
2. Петрушкин С. В., Самарцев В. В. Лазерное охлаждение твердых тел.— М.: Физматлит, 2005.
3. Архаров А. М., Афанасьев В. Н. Теплотехника.— М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Наноструктурированные пленки ZnO для устройств микроэлектроники и оптики. (Россия, г. Москва, г. Йошкар-Ола)
- Кремниевый термостабирированный *p-i-n*-фотодиод. (Украина, г. Черновцы)
- Измерительная система усилия—перемещения с использованием сенсоров на основе нитевидных кристаллов кремния. (Украина, г. Львов)
- Источник питания для контактной микросварки с программируемой формой сварочного импульса. (Украина, г. Алчевск)
- Ультразвуковой пьезокерамический преобразователь. (Азербайджан, г. Баку)
- Вопросы создания системы контроля выбросов токсичных газов. (Украина, г. Киев)



- Требования к материалам — преобразователям электромагнитной энергии в тепловую. Пути улучшения их качества. (Украина, г. Одесса)
- Нестационарные электронные процессы в барьерных структурах и разработка новых приборов на их основе. (Азербайджан, г. Баку)
- Диффузный излучатель переменной яркости на основе оптически сопряженных интегрирующих сфер (Украина, г. Киев)
- Предлагаемые пути перехода от аналоговых к цифровым системам ВЧ-связи для высоковольтных линий электропередачи. (Украина, г. Одесса)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции