

О КОНСТРУКЦИИ ПРОТОЧНОГО ГАЗОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Несмотря на широкое использование газовых преобразователей в спектроскопии, для контроля состава излучения, широкого применения при измерении энергетических параметров они не получили. Между тем отмечается перспективность их использования в этом направлении [1]. Такие преобразователи имеют преимущества перед традиционными средствами контроля энергетических параметров лазерного излучения: возможность создания широкодиапазонных, с легко изменяемыми характеристиками преобразователей, относительная простота конструкции, высокий верхний предел контролируемой мощности излучения. Наиболее разработаны конструкции оптико-акустических и оптико-термических преобразователей (ОАП и ОТП), которые можно легко приспособить и для измерения мощности лазерного излучения. Но применение их при сверхвысоких плотностях потока мощности излучения затруднительно, поскольку, как правило, они выполняются с входными окнами, подвергающимися лучевому, тепловому или иного рода разрушению. Кроме того, ОАП (ОТП) работают с импульсным или модулированным излучением, поэтому их использование для контроля параметров непрерывного мощного лазерного излучения требует применения модуляторов, обладающих низкой лучевой стойкостью и нестабильностью параметров. Указанные недостатки отсутствуют в проточных газовых преобразователях, позволяющих достичь предельных плотностей контролируемой мощности, однако конструктивные их особенности, а также вопросы выбора параметров поглотителя пока не отражены в литературе.

Рассмотрим конструктивные особенности проточных газовых калориметрических преобразователей мощности лазерного излучения, проводя, где это возможно, сравнение их с ОАП и ОТП.

Особенности оптико-термического эффекта определяются давлением газа в ячейке. Когда оно велико, преобладает безызлучательная релаксация возбужденных молекул в результате их столкновений между собой, поглощенная энергия выделяется в объеме газа, что приводит к повышению поступательной энергии молекул и в конечном счете к общему нагреву газа. При малых же давлениях возбужденные молекулы непосредственно передают энергию возбуждения стенкам ячейки при столкновении с ней. Температура стенки повышается. В основном ОТП работают при малых давлениях. В этом случае ячейка (обычно цилиндрического типа) имеет внутреннюю поверхность из термочувствительного материала, выходной сигнал которого позволяет судить о поглощенной мощности, а следовательно, и о мощности контролируемого излучения. Поглощенная мощность определяется законом Бугера—Ламберта: $P_n = P(1 - e^{-\alpha L}) \sim \alpha PL$ при $\alpha L \ll 1$, где P — мощность излуче-

ния на входе ячейки; L — длина области взаимодействия; α — коэффициент поглощения на единицу длины. Выходной сигнал, а следовательно, и чувствительность ОАП и ОТП определяются геометрией ячейки, эффективным объемом газа, заключенным в ней, и соотношением ее размеров с параметрами контролируемого пучка [1]. Чувствительность повышается при уменьшении объема ячейки. Одновременно на поперечное сечение ячейки налагается дополнительное условие $r_{эф}/W_L = q$ (1), связывающее эффективный радиус камеры $r_{эф} = (V/(\pi L))^{1/2}$ (V — объем ячейки, L — ее длина) с характерным размером лазерного пучка W_L через коэффициент q . Величина q находится из допустимого фонового сигнала, возникающего при попадании излучения на боковые стенки ячейки, и выбирается в пределах от 2 до 5. Для минимизации фоновых сигналов от окон ячейку выполняют из материала с высокой теплопроводностью (медь, алюминий). Наконец, чувствительность ОАП зависит от параметров поглощающего газа, в частности от его теплопроводности. При низких частотах модуляции замена газа может изменять ее в десятки раз. Существенным оказывается и влияние мольной теплоемкости. Если влиянием теплопроводности можно пренебречь при достаточно больших частотах модуляции излучения, то влияние теплоемкости необходимо учитывать всегда [2].

В отличие от ОАП и ОТП проточные газовые калориметрические преобразователи мощности лазерного излучения, как правило, работают при высоких и относительно постоянных давлениях поглощающего газа. Лазерное излучение, в частном случае с гауссовым профилем, распространяется вдоль ячейки, через которую прокачивается поглотитель. Температура последнего на выходе ячейки контролируется одним из доступных методов (например, болометрами) и позволяет судить о поглощенной в потоке и, следовательно, контролируемой мощности излучения. В отличие от ОАП и ОТП в проточных газовых калориметрических преобразователях информативной величиной обычно является установившееся значение температуры, которое определяется не только значением времени тепловой релаксации в газе, а и (или) скоростью потока. Кроме того, если в ОАП (ОТП) пренебрегают зависимостью параметров газа от приращения температуры, которое невелико, то в проточных калориметрических преобразователях этого делать нельзя, поэтому необходимо принять во внимание нелинейности характеристики преобразования, определяющие выбор режимов работы и параметров поглотителя. На эффективный радиус луча также следует наложить условие (1), однако величина q требует своего уточнения.

Очевидно, что с некоторым приближением процессы в проточных газовых калориметрических преобразователях можно описать нелинейным уравнением теплопроводности с учетом эффекта движения среды, которое совместно с граничными условиями представляет их математическую модель. Анализ такой модели возможен лишь численными методами, например разностными. Выделим

для исследования следующие конструктивные характеристики преобразователя:

соотношение радиуса приемной ячейки и эффективного радиуса пучка в случае гауссового распределения мощности в его поперечном сечении, влияние указанного распределения на коэффициент преобразования; влияние теплопроводности стенки и теплоотдачи на границе на коэффициент преобразования; зависимость коэффициента преобразования от эффективной длины области взаимодействия при заданной скорости потока поглотителя, а также влияние параметров потока; коэффициент поглощения; теплопроводность газа при заданной скорости потока.

Степень влияния соотношения радиуса приемной ячейки и эффективного радиуса луча в наиболее важном случае гауссовых пучков рассмотрим при поглощении излучения на стенках ячейки и без него. Первый случай отражает влияние собственно распределения мощности на характеристику преобразования, второй — влияние фонового сигнала из-за поглощения на стенках. Пусть распределение мощности описывается гауссовым профилем, однако с постоянной амплитудой максимума P_0

$$P = P_0 e^{-\frac{(X-X_0)^2}{W^2}},$$

где P_0 — амплитуда максимума мощности излучения; W — полуширина распределения на уровне $1/e$; X_0 — центр распределения. Распределение меняется от гауссового с радиусом W до равномерного с амплитудой P_0 . Результаты анализа показали, что коэффициент преобразования нелинейно зависит от полуширины распределения W . На соответствующей характеристике можно выделить две области: $r_{эф}/W > 4$ — коэффициент преобразования практически не зависит от распределения мощности, однако, если скорость потока равна нулю, он составляет лишь 30 % от максимально возможного, достигаемого при равномерном распределении; когда $r_{эф}/W < 4$ (2), коэффициент преобразования экспоненциально возрастает и асимптотически стремится к своему максимальному значению. В случае $r_{эф}/W \sim 1,6$ отличие этих значений составляет не более 17 %.

Без принятия специальных мер обеспечить условия (2) на практике невозможно из-за наличия поглощения на стенках ячейки. Пусть на границе приемной ячейки выполняются условия полного поглощения попадающего на него излучения и удовлетворяются условия второго рода, т. е. задан тепловой поток в виде

$$\kappa_{ст} \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha J,$$

где $\kappa_{ст}$ — теплопроводность стенки ячейки; αJ — плотность поглощенной на боковой поверхности ячейки мощности. Проведенный анализ показал, что в случае, когда поглощаемое на стенках излучение равномерно распределено по их поверхности, зависимостью

от распределения мощности можно пренебречь при $r_{\text{эф}}/W > 4$. Дальнейшее уменьшение последнего соотношения вызывает скачкообразное повышение температуры в установившемся режиме, связанное с появлением фонового сигнала. Учитывая возможные «блуждания» луча, можно рекомендовать выбор величины $r_{\text{эф}}/W \sim 5 \dots 7$, что практически совпадает с соответствующими значениями для ОАП.

Влияние теплопроводности стенки, а также теплоотдачи на границе на коэффициент преобразования рассматривалось при определении на боковой поверхности ячейки граничных условий третьего рода

$$\kappa_{\text{ст}} \frac{\partial T}{\partial y} = \gamma T,$$

где γ — коэффициент теплоотдачи с боковой поверхности. Установлено, что влияние указанных параметров зависит от теплопроводности непосредственно самого поглотителя. В наиболее важном случае теплопроводности поглотителя, близкой к теплопроводности воздуха, увеличение теплопроводности стенки приводит к изменениям второго порядка малости в величине коэффициента преобразования. Отсюда следует, что выбор материала приемной камеры не изменяет характеристики проточного газового калориметрического преобразователя мощности лазерного излучения. Это подтверждено экспериментально.

Проточные газовые калориметрические преобразователи мощности лазерного излучения часто используются с газами, обладающими малым коэффициентом поглощения. Повысить коэффициент преобразования таких устройств можно в результате увеличения эффективной длины L области взаимодействия излучения с поглотителем, что при постоянной скорости потока связано с увеличением времени взаимодействия. Согласно исследованиям при нелинейности параметров поглотителя зависимость от длины L области взаимодействия также носит нелинейный характер. На рис. 1 приведены указанные характеристики при изменении величины L от 0,05 до 1,25 м с обозначением штриховыми линиями зависимостей, соответствующих постоянному и равному $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$ коэффициенту поглощения. Для удобства сравнения характеристики нормированы относительно коэффициента преобразования при величине $L = 0,05 \text{ м}$. При постоянном коэффициенте поглощения чувствительность (K_2) преобразователя линейно возрастает с увеличением длины области взаимодействия L . Повышение скорости потока, как и следовало ожидать, снижает коэффициент преобразования. Если же коэффициент поглощения зависит от температуры, в экспериментах принималась экспоненциальная зависимость [3], соответствующие характеристики имеют существенно нелинейный характер (сплошные линии на рис. 1). Здесь коэффициент преобразования (чувствительность) уменьшается более чем в 6 раз. Вид нелинейности определяется видом температурной зависимости коэффициента поглощения.

Рассматривалось также влияние теплопроводности поглотителя. Характер ее обуславливается преобладающими механизмами диссипации энергии в преобразователе — вынужденной конвекцией либо теплопроводностью. На рис. 2 представлена зависимость относительного коэффициента преобразования от теплопроводности поглотителя, которая изменялась от 0,01 до 0,101 Вт/(м · К). Существенное влияние теплопроводность оказывает при малых скоростях потока (менее 0,40 м/с). В этом диапазоне зависимость имеет резко спадающий экспоненциальный характер, преобладает диссипация энергии в основном теплопроводностью. Наибольшая погрешность от замены поглотителя возникает именно здесь. Влияние скорости потока показано на рисунке.

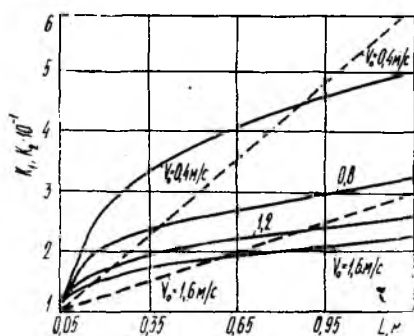


Рис. 1

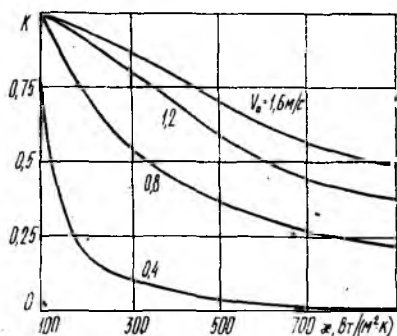


Рис. 2

Таким образом, на характеристики проточного газового калориметрического преобразователя мощности лазерного излучения существенное влияние оказывает род поглотителя, зависимость его параметров от температуры. Характеристики в больших пределах варьируются выбором соответствующей скорости потока. Проведенные исследования позволили определить требования к конструкции преобразователя, выбору параметров потока. Полученные результаты можно использовать при оценке погрешностей, возникающих в проточных газовых калориметрических преобразователях мощности лазерного излучения.

Список литературы: 1. Жаров В. П., Летохов В. С. Лазерная оптико-акустическая спектроскопия. М., 1984. 320 с. 2. Оптико-акустический метод в лазерной спектроскопии молекулярных газов / А. Б. Антипов, В. А. Капитанов, Ю. Н. Пономарев, В. А. Сапожникова. Новосибирск, 1984. 128 с. 3. Исследование поглощения излучения перестраиваемого CO_2 лазера водяным паром в диапазоне 9—11 мкм / В. Н. Арефьев, Б. Н. Погадаев, Н. И. Сизов и др. // Квантовая электроника. 1983. Т. 10, № 3. С. 496—502.

Поступила в редколлегию 20.04.87