

КАЛОРИМЕТР СРЕДНИХ УРОВНЕЙ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСНЫХ ОКГ

В. М. Кузьмичев, Н. И. Зинченко

Х а р ь к о в

Калориметрические измерители энергии импульсов оптических квантовых генераторов с конусной нагрузкой нашли широкое применение [1—4]. Использование металлического конуса позволяет довольно легко обеспечить необходимое поглощение и рассеять оптическую энергию на большой поверхности без дополнительных оптических линз и тем самым значительно уменьшить, плотность поглощенной энергии, предотвратить разрушение поверхности нагрузки.

При создании конусных калориметров переменной температуры необходимо уделять внимание следующим основным вопросам:

- 1) обеспечению необходимого поглощения нагрузкой;
- 2) учету распределения плотности поглощенной оптической энергии по поверхности конусной нагрузки;
- 3) выбору геометрии профиля стенки конусного калориметрического тела совместно с распределением индикаторов повышения температуры;
- 4) рассмотрению тепловых процессов, протекающих в самом калориметрическом теле и в поверхностном слое при поглощении энергии оптических импульсов различной длительности;
- 5) осуществлению калибровки прибора;
- 6) экспериментальному определению систематической и случайной погрешностей измерителя.

Принципиальная схема приемной калориметрической головки для средних уровней энергии импульсных ОКГ приведена на рис. 1. Основными ее элементами являются конусное калориметрическое тело 1; батарея термопар 2, горячие спаи которой располагаются на калориметрическом теле, а холодные — на специальной медной пластинке 3; манганиновый подогреватель 4, имеющий хороший тепловой контакт с конусом;

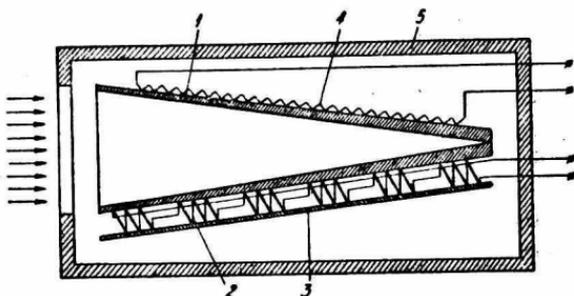


Рис. 1.

пассивный тепловой экран 5 с отверстием для входа измеряемого излучения.

Принцип действия прибора заключается в следующем. Измеряемое оптическое излучение поступает в конусную нагрузку и после многократных отражений почти полностью поглощается, приводя к нагреву калориметрического тела. Повышение температуры калориметрического тела регистрируется батареей термопар. Отсчет показаний прибора производится по максимуму электродвижущей силы термобатареи, который пропорционален выделившейся тепловой энергии. Калибровка прибора осуществляется методом замещения путем выделения известной электрической энергии в манганиновом подогревателе за промежуток времени значительно меньший постоянной времени охлаждения калориметрического тела.

Угол раскрыва конусной нагрузки выбирался в соответствии с расчетами [5], учитывающими зависимость коэффициента отражения от угла падения и направления поляризации напряженности электрического поля. С целью уменьшения длины конусной нагрузки при фиксированном диаметре входной апертуры прибора и более равномерного распределения поглощенной оптической энергии по поверхности нагрузки внутреннюю поверхность медного конуса покрывали слоем никеля. С диаметром основания 60 мм и высотой 250 мм конусная нагрузка обеспечивала поглощение $(98 \pm 1,5)\%$ оптической энергии при различных диаметрах параллельно с конусом лазерного луча и лю-

бом месте попадания в плоскости входной апертуры в диапазоне длин волн (0,4—1,06) мкм. Экспериментальная проверка проводилась с помощью интегрирующей сферы и излучения неодимового ОКГ.

Учитывая неравномерное распределение поглощенной оптической энергии вдоль конусной нагрузки [6], следует производить интегрирование тепла по всему объему калориметрического тела. Это выполнимо при условии, что на равные порции теплоемкости нагрузки будет приходиться одинаковое количество идентичных термодатчиков, регистрирующих усредненное повышение температуры. Конусные нагрузки можно брать с постоянной толщиной стенки или с постоянным поперечным сечением материала конуса. В первом случае площадь поперечного сечения будет линейно уменьшаться к вершине и плотность размещения термодатчиков вдоль образующей конуса следует линейно уменьшать от основания к вершине. Если выбирать постоянной площадь поперечного сечения материала конуса, толщина стенки $\delta(x)$ будет изменяться по выражению

$$\delta(x) = \sqrt{2R\delta_0 + \delta_0^2 + x^2\left(\frac{R}{l}\right)^2} - x\frac{R}{l}, \quad (1)$$

где R — радиус основания конуса; l — высота конуса и x — координата, отсчитываемая вдоль оси конуса от вершины. Размещение термодатчиков в этом случае должно быть равномерным вдоль образующей конуса.

Применяя в качестве термодатчиков батареи терморезисторов, лучше использовать конусы с постоянной площадью поперечного сечения для получения меньшей погрешности измерений. В исследуемом макете прибора использовались четыре ряда идентичных терморезисторов вдоль образующей конусной нагрузки с общим количеством порядка 3000 спаев медь—константа. Каждый ряд был разбит на 11 участков и, все участки соединены последовательно по винтообразной кривой. Холодные спаи терморезисторов располагались на медных пластинках, тепловые постоянные времени которых были близки к тепловой постоянной калориметрического тела, что позволяло получить дифференциальную схему измерений приращения температуры. При весе конуса 91 грамм чувствительность головки составила 1,12 мВ/дж. Между рядами терморезисторов размещены четыре манганиновых подогревателя, соединенных последовательно и позволяющих довольно равномерно рассеять калибровочную электрическую энергию по калориметрическому телу.

Для конусной нагрузки с постоянным поперечным сечением и постоянным коэффициентом теплообмена вдоль конуса решена нестационарная тепловая задача при экспоненциальном распределении тепловых источников вдоль нагрузки, что до-

вольно близко соответствует реальным распределениям поглощения оптической энергии. После воздействия на калориметрическую систему короткого теплового импульса, длительность которого значительно меньше тепловой постоянной времени системы τ , переходная характеристика $h_{\text{имп}}(x, t)$ имеет вид

$$h_{\text{имп}}(x, t) = e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{2\eta^2}{1-e^{-\eta}} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{e^{-\eta} \cos n\pi \frac{x}{l} - \cos n\pi \left(1 - \frac{x}{l}\right)}{(n\pi)^2 + \eta^2} \times \\ \times e^{-\left[\frac{1}{\tau} + \left(\frac{a n \pi}{l}\right)^2\right] t}, \quad (2)$$

где η — показатель экспоненты в распределении поглощенной энергии;

a — коэффициент температуропроводности материала нагрузки.

Из решения видно, что переходный процесс зависит от места расположения индикатора повышения температуры. Анализ выражения (2) показывает, что размещение одиночных термодатчиков в верхней половине части конуса способствует завышению показаний калориметра. При расположении же их в нижней части конуса показания калориметра занижаются, причем завышение и занижение показаний сильно зависит от величины η . В верхней части конуса начальная стадия остывания проходит довольно быстро из-за утечки тепла через теплопроводность материала к основанию, а в нижней части — довольно медленно из-за притока тепла от вершины. Вблизи основания температура воздействия оптического импульса может повышаться, проходить через пологий максимум и потом спадать. Тепловой регулярный режим устанавливается после интервала времени, равного приблизительно 2τ после воздействия оптического импульса. Переходный тепловой процесс для средней температуры $h_{\text{имп}}(t)$ не зависит от распределения источника тепла:

$$h_{\text{имп}}(t) = \frac{1}{l} \int_0^l h_{\text{имп}}(x, t) dx = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

и тепловой регулярный режим начинается сразу после воздействия оптического импульса. Измерение средней по длине образующей конуса температуры позволяет свести к минимуму систематическую погрешность измерений.

На рис. 2 приведены экспериментально снятые распределения поглощенной оптической энергии вдоль конусной нагрузки с различными диаметрами входных пучков. Из них видно, что

путем использования локальных термоиндикаторов приращение температуры можно получить большие систематические ошибки измерений.

При анализе погрешности измерений особое внимание уделялось систематическим погрешностям использования метода

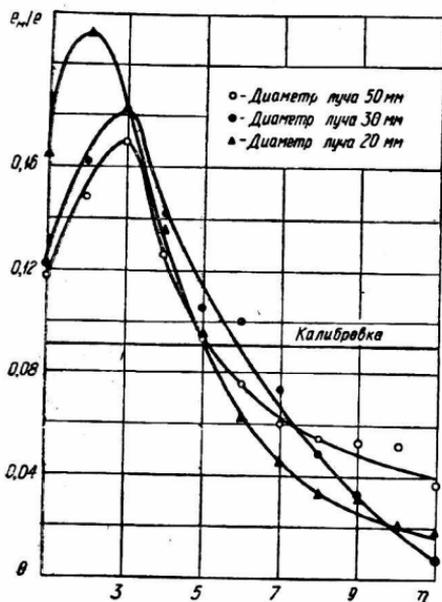


Рис. 2.

малась зависимость распределения конусной нагрузки при различных диаметрах аксиальных с ко-

замещения и неэквивалентности тепловых потерь. Неэквивалентность тепловых потерь определяется с помощью неравномерности зональной характеристики, одна из которых для диаметра оптического луча 12 мм приведена на рис. 3. Крайние точки соответствуют неполному попаданию луча в конус. Максимальная среднеквадратическая погрешность неравномерности зональной характеристики составляет $\pm 3\%$.

Систематическая погрешность метода замещения в каждой головке определялась отдельно. Сначала определялась неидентичность термпар с учетом неточности механического изготовления конусного калориметрического тела. Потом сни-

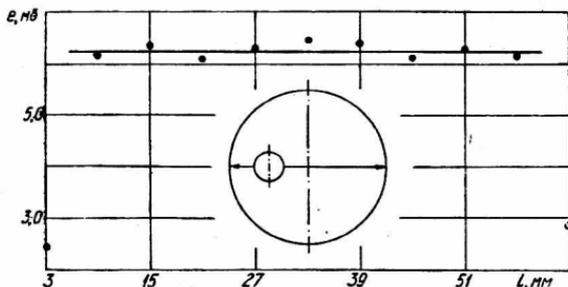


Рис. 3.

нусом оптических пучков. Узкий аксиальный пучок дает наиболее неравномерное распределение поглощенной энергии.

С помощью известной неидентичности термобатарей и распределения поглощенной энергии определяется систематическая погрешность метода замещения. Рассчитанные по экспериментальным данным, приведенным на рис. 2, систематические погрешности метода замещения составляют — 3,8, — 3,0, — 3,6% для диаметров оптических пучков 50, 30 и 20 мм.

Остальные максимальные случайные погрешности прибора следующие: погрешность определения нагрузки $\pm 1,5\%$; погрешность определения электрической энергии калибровки $\pm 1,5\%$; погрешность отсчета при измерениях и калибровке $\pm 1,5\%$; погрешность выполнения делителя к микроамперметру $\pm 1,0\%$; погрешность за счет дрейфа нуля системы за время измерения $\pm 1,0\%$. При входной плотности оптической энергии не более 100 Дж/см^2 в режиме свободной генерации поверхность нагрузки не разрушается и дополнительной погрешности не будет.

Предельная суммарная случайная погрешность измерения энергии импульсов ОКГ в диапазоне (30—3000) джоулей в режиме свободной генерации не превышает $\pm 5\%$.

Прибором можно пользоваться в более широком спектральном диапазоне, вводя поправку на коэффициент отражения нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Neill A. H. High-energy light detector for use with pulsed ruby and glass lasers. «Appl. Opt». 1970, v. 9, № 10, 2392—2394.
2. В. М. Нестеренко. Измеритель энергии миллисекундных импульсов ОКГ типа ИЭК-1 и методы определения погрешности измерений. Сб. «Импульсная фотометрия», изд-во «Машиностроение», М., 1969, 29—36.
3. Bigku M. M. Calorimeter for laser energy measurements. «Appl. Opt». 1970, 10, № 1, 132—135.
4. С. И. Боровицкий. Макет калориметрического прямопоказывающего измерителя энергии импульсов и средней мощности ОКГ. Сб. «Импульсная фотометрия», изд-во «Машиностроение», М., 1969, 48—51.
5. Е. Я. Говорун, В. М. Кузьмичев, В. И. Полевой. О поглощательной способности круговых конусов. «Электронная техника, серия контрольно-измерительная аппаратура», 1969, вып. 1 (10), 90—96.
6. Е. Я. Говорун, Н. И. Зинченко, В. М. Кузьмичев. Распределение поглощенной энергии в конусных нагрузках оптических калориметров. Сб. «Радиотехника», вып. 19, Изд-во Харьковск. ун-та, 1971.