

ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ОКГ КАЛОРИМЕТРОМ С ДВУМЯ ЗЕРКАЛЬНО ОТРАЖАЮЩИМИ СЕКЦИЯМИ

Р. А. Валитов, Ю. А. Калинин

Москва

Развитие техники оптических квантовых генераторов привело к необходимости создания точных методов измерения энергетических характеристик когерентного излучения в широком диапазоне рабочих длин волн оптического спектра. Наиболее высокую точность позволяют получить калориметрические измерители мощности и энергии излучения ОКГ [1, 2].

Для увеличения верхнего предела измерения в большинстве известных калориметров с сухой поглощающей нагрузкой измеряемое излучение поглощается в нагрузке, выполненной в виде полости — полового конуса, сферы с отверстием, комбинации полового цилиндра и конуса и пр. [1, 3—5]. В таких измерителях может быть достигнута высокая поглощательная способность в широком спектральном и динамическом диапазонах.

Однако при точных измерениях энергетических параметров излучения ОКГ возникает необходимость в определении доли энергии, отраженной от измерителя. Для этого в разных спектральных диапазонах применяют различные методы [6, 7]. Как недостаток калориметров с поглощающей нагрузкой в виде полости можно назвать невозможность достижения равномерного распределения плотности энергии по нагрузке. Ввиду сложности расчета процессов теплопередачи в телах сложной формы и технологических трудностей при их изготовлении погрешность калориметров с нагрузкой в виде полости в лучшем случае составляет 3—5% [1].

Дальнейшее повышение точности, по-видимому, может быть достигнуто в калориметрах с наиболее простой формой поглощающей нагрузки. Разработчики прецизионной и образцовой аппаратуры в метрологических организациях зарубежных стран идут в этом направлении [2, 8, 9].

В работе [10] предложено в качестве поглощающей нагрузки калориметра использовать зеркально отражающий диск из метал-

ла с высокой отражательной способностью. В зеркальном калориметре [10] удалось примерно на порядок повысить верхний предел измерения энергии импульсов неодимового и рубинового ОКГ. Недостатком этого прибора является необходимость его калибровки на каждой рабочей длине волны ввиду зависимости отражательной способности металла от длины волны излучения.

Калориметрический способ измерения отражательной способности металлических зеркал был развит в работе [11]. Преимущество предложенного способа состоит в том, что он позволяет получить высокую точность измерения значений отражательной способности, близких к единице. Метод пригоден для измерения спектральной отражательной способности во всем оптическом диапазоне, включая субмиллиметровый, а также в миллиметровом и сантиметровом диапазонах СВЧ при наличии в них достаточно мощных источников излучения.

В 1969 г. авторами был предложен широкодиапазонный калориметрический измеритель средней мощности ОКГ с двумя зеркально отражающими секциями [12]. В этом измерителе отражательная способность нагрузки в широком спектральном диапазоне измеряется самим прибором. В НБЭ США в последние годы разработан прецизионный измеритель энергии импульсов ОКГ, выполненный по такой же схеме [13].

Исследования калориметров с двумя зеркально отражающими секциями, проведенные в работах [12, 13], показывают ряд преимуществ этой конструкции. Основные из них следующие:

1. Калориметр с зеркально отражающими секциями является абсолютным измерителем мощности или энергии излучения проходного типа. Применение его в поверочных схемах позволит упростить методику и повысить точность передачи значения мощности или энергии от образцовых измерителей высокого разряда к приборам низшего разряда и к рабочим измерителям.

2. Величина мощности, поступающей на вход калориметров, величина проходящей мощности и поглощательная способность в широком диапазоне длин волн измеряются самим калориметром путем одновременного отсчета показаний с двух калориметрических секций. В измерителе с двумя идентичными секциями при сохранении высокой точности измерения существенно снижаются требования к стабильности уровня мощности непрерывных и импульсно-модулированных ОКГ.

3. При изготовлении нагрузки калориметра из металла с высокой отражательной способностью и большой температуропроводностью значительно повышается допустимый предел плотности мощности излучения на входе прибора. Варьируя материалом и размерами нагрузки, можно создать серию измерителей, перекрывающих широкий динамический диапазон и пригодных для измерения энергии импульсов в пучках различного диаметра [13].

4. Для поглощающей нагрузки в форме диска может быть более точно выполнен расчет и экспериментальное исследование

тепловых процессов в режиме измерения и при калибровке. Высокая точность определения тепловых и оптических параметров измерителя позволяют повысить точность измерения энергетических параметров излучения квантовых генераторов.

В настоящей работе приводится описание конструкции, принципа работы и результатов исследования калориметрического измерителя средней мощности ОКГ с двумя зеркально отражающими секциями.

Конструкция и принцип работы калориметра

Принципиальная схема калориметра показана на рис. 1. Прибор состоит из двух калориметрических секций 1 и 2, помещенных в пассивном термостате, образованном массивным дюралюминиевым корпусом 3 с пенополистироловым наполнением 4. Термостат с кожухом 5 установлен на юстировочном столике, который обеспечивает возможность юстировки по азимуту и углу места, а также перемещение в поперечном направлении и поворот на 180° относительно центра прибора, отмеченного на рис. 1 звездочкой.

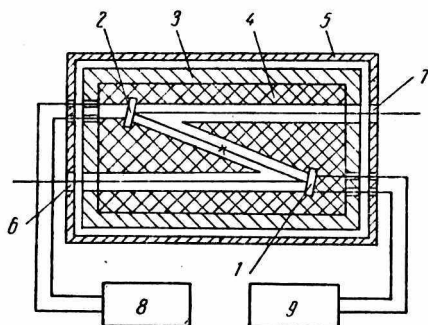


Рис. 1. Принципиальная схема калориметра:

1, 2 — калориметрические секции; 3 — дюралюминиевый корпус; 4 — пенополистироловое наполнение; 5 — кожух калориметра; 6, 7 — входное и выходное окна калориметра; 8, 9 — блоки индикации калориметрических секций.

В кожухе и термостате имеются входное и выходное окна 6 и 7. Пучок ОКГ, мощность которого необходимо измерить, подается на секцию 1. Часть мощности излучения поглощается в секции, другая часть зеркально отражается и попадает на секцию 2. Во второй секции часть падающей мощности поглощается, а часть — зеркально отражается и выходит из прибора. Угол падения пучка составляет около 4° . Сигналы с термобатарей секций, пропорциональные величинам поглощенной мощности, регистрируются двумя блоками индикации 8 и 9, в качестве которых использовались микровольт-микроамперметры Ф116/1 или гальванометры М195/1.

Было разработано и исследовано два варианта конструкций калориметрических секций, отличающихся в основном типом использованных термобатарей (рис. 2). В обоих случаях поглощающая нагрузка (рис. 3) выполнена в виде диска из кремния 1 толщиной 0,25 мм диаметром 20 мм. Поверхности диска полированы с чистотой обработки по 14 классу. Кремниевая пластина окислена в атмосфере [кислорода, в результате чего на по-

поверхностях создана электроизолирующая пленка двуокиси кремния 2 толщиной около 0,5 мкм. На переднюю поверхность диска методом испарения в вакууме нанесена пленка нихрома 3 в форме круга диаметром 15 мм с удельным сопротивлением $\rho \sim 20 \text{ ом/см}^2$. К нихромовой пленке через контакты 4, изготовленные на основе токопроводящей серебряной пасты, подведены токовые и потенциальные выводы 5. Через нихромовую пленку пропускается постоянный ток при калибровке секции методом замещения. В ней же поглощается часть мощности измеряемого излучения. Толщина пленки выбрана таким образом, чтобы слой нихрома был полностью непрозрачен для излучения с длиной волны до 25 мкм. На заднюю поверхность диска испарением в вакууме нанесена пленка алюминия.

Термобатарея первого типа изготавливалась путем намотки на фторопластовое кольцо константановой ленты и последующего меднения константана таким образом, что граница слоя меди проходит посредине торцовых поверхностей кольца. Во втором варианте термобатарея изготовлена точечной сваркой чередующихся константановой и медной ленточек с последующим отжигом в атмосфере инертного газа для снятия механических напряжений.

Тепловой контакт термобатареи 5 и поглощающей нагрузки 6 в первом варианте конструкции осуществлялся поджатием резьбовой гайкой 3 через шайбу 4. Таким способом удалось получить разборную конструкцию калориметрической секции, в которой испытывались нагрузки из различных материалов. Недостаток этой конструкции — невозможность избежать деформации зеркальной поверхности, которая приводит к искажению пучка излучения на выходе прибора. Этот недостаток устранен во втором варианте конструкции, где ленточная термобатарея приклеивалась по периметру нагрузки.

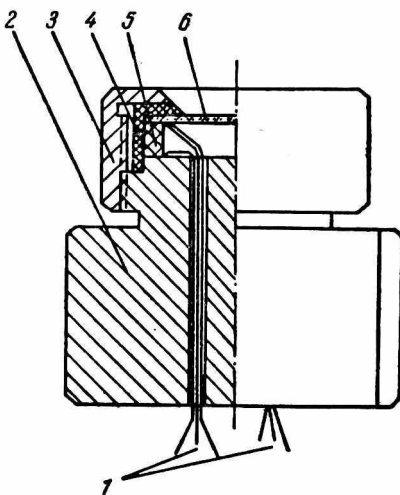


Рис. 2. Принципиальная схема калориметрической секции:

1 — выводы термобатареи и нихромового нагревателя; 2 — медный корпус калориметрической секции; 3 — прижимная гайка; 4 — фторопластовая шайба; 5 — термобатарея; 6 — поглощающая нагрузка.

Расчетные соотношения для калориметра

Поглощающие нагрузки калориметра имеют плоскую зеркальную поверхность, характеризующуюся отражательной способностью τ . Предполагается, что отражательная способность постоянна

для всей рабочей поверхности секции. Технология обработки пластин и напыления нихромовой пленки обеспечивает, кроме того, практически одинаковое значение r и для разных поглощающих нагрузок, изготовленных в одной партии. Величина отражательной способности зависит, главным образом, от длины волны излучения, а также от состояния поляризации и угла падения пучка на поверхность поглощающей нагрузки θ .

Рассмотрим сначала случай, когда обе секции в калориметре одинаковые. Предположим, что состояние поляризации пучка излучения после отражения от первой секции не изменяется. Последнее предположение справедливо для p -поляризованного пучка либо в случае малых углов падения θ .

Если на вход измерителя подается пучок излучения с мощностью P , для величин отсчетов мощности с блоков индикации калориметрических секций P_1 и P_2 справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} P_1 &= (1 - r) P; \\ P_2 &= (1 - r) r P, \end{aligned} \quad (1)$$

из которых легко определяются

$$r = \frac{P_2}{P_1}, \quad P = \frac{(P_1)^2}{P_1 - P_2}, \quad P_{\text{вых}} = \frac{(P_2)^2}{P_1 - P_2}, \quad (2)$$

где $P_{\text{вых}}$ — проходящая мощность.

Для относительной погрешности измерения мощности из формул (2) следует

$$\delta P = 2\delta P_1 + \frac{\delta P_1}{1 - P_2/P_1} + \frac{\delta P_2}{P_1/P_2 - 1}, \quad (3)$$

т. е. погрешность заметно возрастает с приближением r к единице.

Если отражательные способности секций различны, необходимо произвести калориметром два измерения, при которых излучение подается на прибор последовательно с двух противоположных сторон. Величины отсчетов мощности в этом случае удовлетворяют системе уравнений:

$$\begin{aligned} P_1^1 &= (1 - r_1) P^1; \\ P_2^1 &= (1 - r_2) r_1 P^1; \\ P_1^2 &= (1 - r_1) r_2 P^2; \\ P_2^2 &= (1 - r_2) P^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где r_1 и r_2 — отражательные способности секций, P^1 и P^2 — мощность излучения на входе прибора при первом и втором измерении.

Система уравнений (4) имеет единственное решение

$$r_1 = \frac{1 + P_1^2/P_2^2}{1 + P_1^1/P_2^1}, \quad r_2 = \frac{1 + P_2^1/P_1^1}{1 + P_2^2/P_1^2}, \quad (5)$$

$$P_1 = \frac{P_1^1 + P_2^1}{1 - r_1 r_2}, \quad P_2 = \frac{P_1^2 + P_2^2}{1 - r_1 r_2}; \quad (6)$$

$$P_{\text{вых}} = \frac{(P_1^1 + P_2^1) r_1 r_2}{1 - r_1 r_2}, \quad (7)$$

где

$$r_1 r_2 = (P_2^1/P_1^1) (P_2^2/P_1^2). \quad (8)$$

Учет изменения состояния поляризации после первого отражения, который существенен в конструкции прибора с большим углом падения пучка на поглощающую нагрузку, приведен в работе [12].

Формулы (2), (5)—(8) являются основными расчетными соотношениями калориметра.

Экспериментальное исследование калориметра

Исследование оптических и тепловых параметров калориметра производилось на фиксированных длинах волн ОКГ УФ, видимого и ближнего ИК-диапазонов. В экспериментах использовались: ОКГ на азоте с $\lambda = 0,33$ мкм, работающий в импульсно-модулированном режиме; аргоновый ОКГ типа ЛГ-106, генерирующий на двух линиях 0,488 и 0,514 мкм; перестраиваемый по длинам волн неон-гелиевый ОКГ типа ЛГ-126 с $\lambda = 0,633, 1,15$ и 3,39 мкм и ОКГ на основе CO_2 с $\lambda = 10,6$ мкм. Были приняты меры по стабилизации уровня мощности генератора ЛГ-126. После прогрева генератора в течение трех часов нестабильность уровня мощности не превышала 0,3% за час. Все измерения, кроме особо оговоренных, производились с первым вариантом конструкции калориметрической секции на этом генераторе при $\lambda = 0,633$ мкм.

Калибровался измеритель методом замещения постоянным током. Измерение электрической мощности замещения осуществлялось путем измерения тока и напряжения на нихромовых нагревателях секций посредством потенциометра типа ППТВ класса 0,015 и образцовых катушек сопротивления класса 0,01.

Основные параметры калориметрических секций: сопротивление нихромового нагревателя около 30 ом; сопротивление термобатарей 40 и 80 ом (для первого и второго вариантов конструкции соответственно); время установления показаний по уровню 0,997—45 и 70 сек; диаметр входной апертуры прибора в обоих вариантах 10 мм.

Измерение зависимости показаний калориметрических секций от диаметра пучка и от юстировки узкого пучка (зонная характеристика) производилось по методике работы [6]. Результаты измерений представлены на рис. 4.

Коэффициент теплового преобразования измерялся методом двойного калориметра [8] для излучения с $\lambda = 10,6$ мкм на уровне мощности около 1 вт. Величина коэффициента преобразования оказалась равной $K_1 = 1,012 \pm 0,7\%$ и $K_2 = 1,019 \pm 0,6\%$.

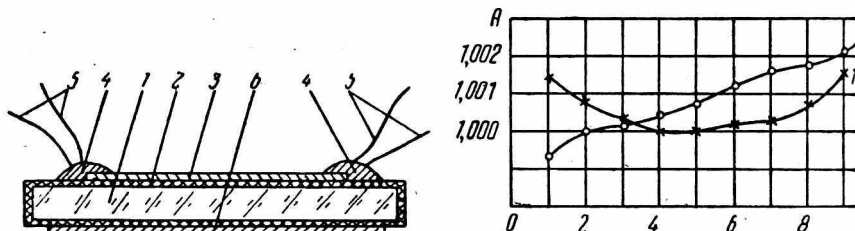


Рис. 3. Поглощающая нагрузка калориметрической секции:

1 — кремниевый диск; 2 — электроизолирующий слой; 3 — нихромовая пленка; 4 — электрический контакты; 5 — токовые и потенциальные выводы; 6 — алюминиевая пленка

Рис. 4. Зонная характеристика калориметра:

A — относительные показания калориметрической секции; 1 — зависимость показаний от места попадания пучка ОКГ диаметром 2 мм (по оси абсцисс отложено расстояние до оси пучка, отсчитываемое от края входной апертуры калориметрической секции); 2 — зависимость показаний от диаметра пучка ОКГ (по оси абсцисс — диаметр пучка ОКГ, сформированного линзой с $f = 250$ мм).

Указанная погрешность представляет собой случайную среднеквадратичную погрешность рядов из 10 измерений. Ввиду плохой стабильности уровня мощности применявшегося ОКГ, при измерениях производился контроль уровня мощности путем отвлечения части пучка на контрольный измеритель, постоянная времени которого была такой же величины, как у исследуемого.

Измерение отражательной способности калориметра с двумя одинаковыми секциями производилось в соответствии с (2). Результаты измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

λ , мкм	P , вт	r	$\Delta r/r$, %
0,33	1,8	0,428	$\pm 1,4$
0,488 \rightarrow 0,514	360	0,574	$\pm 0,7$
0,633	11,4	0,609	$\pm 0,3$
1,15	8,0	0,655	$\pm 0,5$
3,39	3,5	0,765	$\pm 0,8$
10,6	920	0,890	$\pm 0,7$

Отражательная способность секций для излучения с длиной волны 0,633 мкм измерялась тремя независимыми способами: непосредственно калориметром, в соответствии с формулами (2)

и (5) и с использованием образцового измерителя мощности типа ОИМ. Во всех трех случаях излучение было p -поляризованным. Результаты измерений сведены в табл. 2.

Таблица 2

$\lambda = 0,633 \text{ мкм}$		$P = 10,6 \text{ ватт}$	
1	2	3	
r^1	$r^2 = \sqrt{r_1^2 r_2^2}$	r_1^3	r_2^3
$0,609 \pm 0,003$	$0,599 \pm 0,005$	$0,597 \pm 0,008$	$0,602 \pm 0,007$

При исследовании материала с высокой температуропроводностью для использования в калориметре проведено измерение отражательной способности зеркально полированной пластинки из алюминия марки АМЦ, обработанной анодным оксидированием с последующей полировкой. Определение отражательной способности производилось по формуле (5). Предварительно определялся калибровочный коэффициент секции с исследуемой пластинкой при использовании стабилизированного по мощности квантового генератора.

Если в уравнениях (4) считать $P^1 = P^2$, получается следующее выражение для калибровочного коэффициента второй секции:

$$k_2 = \frac{A_2^2 - A_1^2}{P_1^1 - P_1^2} \quad (9)$$

где A_2^1 и A_2^2 — отсчеты в делениях шкалы по блоку индикации второй секции.

Результаты измерений приведены в табл. 3.

Таблица 3

$\lambda, \text{ мкм}$	0,33	0,488 \pm 0,514	0,633	1,15	3,39
r	0,031	0,043	0,047	0,047	0,0825

Из табл. 3 видно, что пластинка имеет поглотительную способность менее 0,05 на спектральном участке до 1,2 мкм. Сочетание с высокой температуропроводностью делает этот материал перспективным при использовании в качестве поглощающей нагрузки в измерителях средней мощности ОКГ. Пластинка выдерживает без изменения величины отражательной способности многократные экспозиции излучения с $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ и плотностью мощности до 40 вт/см^2 .

Оценка погрешности калориметра и результаты сличения с образцовым измерителем

При определении суммарной погрешности калориметра были учтены следующие источники погрешности:

а) погрешность измерения электрической мощности замещения P ; систематическая погрешность — $\delta_P = \pm 0,03\%$; случайная среднеквадратичная погрешность серии измерений $\sigma_P = \pm 0,15\%$;

б) погрешность определения коэффициента теплового преобразования k : $\delta_k = \pm 0,2\%$; $\sigma_k = \pm 0,7\%$;

в) неисключенный остаток систематической погрешности за счет неравномерности зонной характеристики для пучков диаметром от 2 до 10 мм составляет $\delta_z = 0,15\%$;

г) случайные погрешности измерения отражательной способности для излучения различных длин волн приведены в табл. 1;

д) случайная погрешность, обусловленная зависимостью показаний прибора от состояния поляризации $\sigma_n \leq \pm 0,1\%$;

е) случайная погрешность за счет дрейфа нуля калориметра для уровня мощности порядка 10 мвт в нормальных лабораторных условиях не превышает $\sigma_0 = 0,1\%$.

Суммарная погрешность калориметра оценивалась по формуле [14]

$$\Delta_{\Sigma} = \pm \left(\sum_i \delta_i + 3 \sqrt{\sum_i \sigma_i^2} \right). \quad (10)$$

Для излучения с $\lambda = 0,633$ мкм и уровня мощности $P \sim 10$ мвт $\Delta_{\Sigma} = \pm 3\%$.

Сличение с образцовым измерителем мощности типа ОИМ производилось на неон-гелиевом ОКГ с $\lambda = 0,633$ мкм путем одновременного отсчета показаний с секций калориметра и измерения проходящей мощности образцовым измерителем.

Результаты сличения:

$$P_{\text{ОИМ}} = (4,21 \pm 0,04) \text{ мвт}, \quad P_{\text{вых}}^{\text{калор}} = (4,15 \pm 0,06) \text{ мвт},$$

$$\Delta = 1 - \frac{P_{\text{калор}}}{P_{\text{ОИМ}}} = -1,5\%.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Измерение характеристик оптических квантовых генераторов, под ред. Р. А. Валитова, А. В. Кубарева. Изд-во Стандартов, Москва, 1969.

2. NBS Technical Note 382 issued October 1969, «Laser Power and Energy Measurement».

3. Р. А. Валитов, Ю. А. Калинин, В. М. Кузьмичев, Г. Н. Татаринев. «Электронная техника», сер. КИА, вып. 1, 1968.

4. Б. К. Севастьянов, И. Е. Лифшиц, С. Б. Дохиновский. Сб. «Методы и приборы для контроля качества стержней рубина». Изд-во «Наука», 1968.

5. Р. А. Казарян, Э. С. Варданян, Ф. П. Садарян. ПТЭ, № 3, 1964.

6. Ю. А. Калинин, В. М. Кузьмичев. «Электронная техника», сер. КИА, вып. 1, 1968.
7. Р. А. Валитов, Ю. А. Калинин. Сб. «Исследования в области квантовой радиофизики», вып. 112(172), 1971.
8. K. Sakurai, Y. Mitsuhashi, T. Honda. IEEE Trans on Instr. and Meas., v. IM-16, № 3, 1967, p 212—219.
9. R. Nowicki. Pomiaru Energii Promienistej, Warszawa, WNT, 1969.
10. Н. И. Алексеев, Л. М. Шестопалов. ПТЭ, № 1, 1968.
11. А. И. Барчуков, В. К. Конюхов. ЖПС, т. IX, вып. 4, 1968.
12. Р. А. Валитов, Ю. А. Калинин. Доклады научно-технического семинара «Метрология в радиоэлектронике» (тезисы), часть I, Москва, 1970.
13. A. L. Rasmussen. Rev. Sci. Instr., v. 41, № 10, 1970, p. 1479—1484.
14. Б. Е. Рабинович. «Вопросы радиоэлектроники, сер. Радиоизмерительная техника», вып. 4, 1961.