

# ИЗМЕРИТЕЛЬ ВЫСОКИХ УРОВНЕЙ ИМПУЛЬСНОЙ ЭНЕРГИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ОКГ С БОЛЬШИМИ ДИАМЕТРАМИ ПУЧКОВ

*В. К. Николаев, Ю. В. Химичев, Р. А. Валитов*

Москва

*Ю. М. Надежкин*

Саратов

В последние годы разработаны и серийно выпускаются мощные твердотельные и жидкостные лазеры, работающие в импульсном режиме. Энергия одиночных импульсов светового излучения таких ОКГ достигает 10 кдж и более, а диаметры генерируемых пучков—100 мм [1]. Приборов, пригодных для непосредственного измерения энергетических параметров таких измерений, в настоящее время нет. Отметим для сравнения серийно выпускаемый калориметр ИКТ-1М, разработанный во ВНИИФТРИ [2]. Этот прибор с апертурой 50 мм позволяет измерять с ослабителем

энергию до 1000 дж в спектральном диапазоне 0,3 — 5 мкм. Погрешность прибора  $\pm 20\%$ ; время, необходимое для проведения одного измерения, составляет 6—8 мин.

В связи с этим разработан измеритель высоких уровней импульсной энергии проходящего излучения. Диапазон длин волн измеряемого излучения 0,4—2 мкм, который определяется только полосой пропускания входного и выходного окон и приемного элемента измерителя. Диапазоны измеряемых энергий — 1000, 3000, 10000 дж при длительности измеряемых импульсов  $10^{-4}$  —  $10^{-2}$  сек. Возможно измерение и более коротких по длительности импульсов, если плотность мощности на оптических деталях прибора не превосходит  $10^7$  вт/см<sup>2</sup>. Диаметр пучка измеряемого излучения при расходимости излучения не более 3° равен 60 мм. Энергия излучения, отраженная от измерителя, составляет 21,1%, энергия на выходе — 78,9% ( $\lambda = 1,06$  мкм). Время, необходимое для проведения одного измерения, — не более 20 сек. Средняя квадратичная погрешность измерителя — не более 8%. Потребляемая мощность от сети 220 в  $\pm 10\%$  частотой  $50 \pm 1$  гц составляет 200 вт. Вес измерителя около — 30 кг.

Принцип работы прибора основан на пондеромоторном действии светового излучения. Измеритель выполнен в виде автоматических компенсационного типа электростатических крутильных микровесов. Крутильный маятник, состоящий из горизонтального коромысла, несущего с одной стороны приемный элемент, непосредственно воспринимающий измеряемое излучение, и с другой стороны — металлический электрод, подвешен на ленточных растяжках в металлическом герметичном корпусе. В корпусе имеются входное и выходное окна для измеряемого излучения, расположенные параллельно и соосно с приемным элементом. Последний выполнен в виде диска из стекла  $K = 8$  диаметром 80 мм и толщиной 0,2 мм, входное и выходное окна — толщиной 1 мм.

Применение для измеряемого излучения прозрачных оптических материалов в сочетании со специальным образом сконструированной приемной камерой позволяет отказаться от традиционного вакуумирования приемного элемента и проводить измерение пондеромоторных сил излучения при атмосферном давлении окружающего приемный элемент воздуха [3,4]. Присутствие воздуха уменьшает восприимчивость измерителя к механическим шумам, снижает технологические трудности изготовления, повышает его транспортабельность и превращает в прибор типа гальванометра.

Для индикации малых углов поворота крутильного маятника под действием измеряемого излучения применена оптико-фотоэлектрическая система как наиболее простая в схемном отношении, имеющая высокую чувствительность и усиление, большую помехозащитность, надежность и небольшие габариты. В рабочем состоянии световой поток лампочки накаливания Л этой системы, отражаясь от зеркала З, на оси крутильного маятника освещает равные поверхности двух фоторезисторов, включенных в мостовую схему (рис. 1).

При этом в диагонали мостовой схемы ток отсутствует и крутильный маятник удерживается в состоянии равновесия так, что его металлический электрод, расположенный между двумя неподвижными электродами, находится от них на одинаковом расстоянии. На неподвижные электроды приложены равные по величине и противоположные по знаку напряжения «возбуждения».

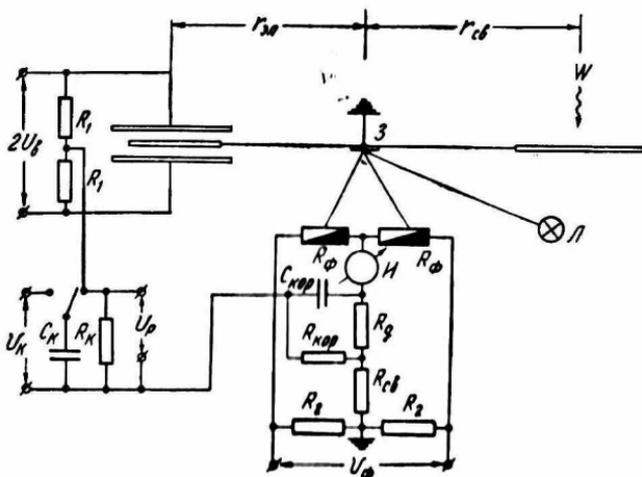


Рис. 1. Упрощенная принципиальная схема измерителя.

При силовом воздействии крутильный маятник закручивается, баланс мостовой схемы нарушается и через резистор обратной связи  $R_{св}$  — и индикатор И, включенные в диагонали моста, протекает ток. Падение напряжения с резистора обратной связи подается через корректирующую цепочку  $R_{кор}$  —  $C_{кор}$  на неподвижные электроды. Потенциал электрода, к которому приближается подвижный электрод, уменьшается, а потенциал другого электрода увеличивается. Величина управляющего напряжения выбирается с учетом параметров крутильного маятника и схемы так, что отклонение крутильного маятника носит аperiodический характер.

Электростатическая компенсационная система управления колебаниями крутильного маятника позволяет в широких пределах регулировать чувствительность прибора и динамику движения крутильного маятника. Выбор электростатической системы определяется также возможностью при соответствующей геометрии электродов производить точную калибровку измерителя. Система калибровки и управления выполнена в виде дифференциального плоского емкостного датчика соединением двух конденсаторов с «охранным» кольцом [5].

Подвижный электрод этой системы является элементом крутильного маятника и представляет собой два электрически и механически связанных металлических диска, расположенных в

плоскости своего охранного кольца, которые являются частями электростатических экранов, полностью охватывающих неподвижные электроды.

Такая система позволяет аналитически учесть влияние краевых эффектов при расчете. Калибровка производится путем разряда конденсатора известной емкости  $C_k$  через калибровочное сопротивление  $R_k$ , напряжение с которого подается на неподвижные электроды. Для описанной системы выражение момента количества движения, сообщаемого крутильному маятнику электростатическими силами взаимодействия электродов, имеет вид

$$M_{эл} = 2r_{эл}R_kC_kU_BU_k\frac{dC_0}{dx}, \quad (1)$$

где  $r_{эл}$  — плечо действия электростатических сил;

$U_B$  — постоянное напряжение «возбуждения»;

$U_k$  — напряжение, до которого заряжен конденсатор  $C_k$  (напряжение калибровки);

$C_0$  — емкость между подвижным и неподвижным электродом;

$x$  — зазор между электродами.

Емкость конденсатора с «охранным» кольцом может быть определена по формуле Максвелла

$$C_0 = \frac{\epsilon S}{4\pi x} \left[ 1 + \frac{h}{a} + \frac{1}{2} \frac{h^2}{a^2} \right], \quad (2)$$

где  $S$  — площадь внутреннего (подвижного) электрода;

$h$  — зазор между внутренним электродом и охранным кольцом;

$a$  — радиус внутреннего электрода;

$\epsilon$  — диэлектрическая постоянная.

Уравнение (1) получено в предположении равенства расстояний между подвижным и неподвижными электродами. Для контроля этого равенства используется синусоидальное напряжение  $U_p$ , подаваемое на неподвижные электроды с калибровочного сопротивления. В этом случае среднее значение результирующей силы, действующей на подвижный электрод, определяется смещением его от центрального положения  $z$ :

$$F_{ср} = \frac{2xz}{(x^2 - z^2)^2} (2U_B^2 + U_p^2). \quad (3)$$

Для установки равенства расстояний в конструкцию микровесов введены механизм, обеспечивающий одновременное перемещение неподвижных электродов относительно подвижного, и корректор для закручивания нити подвеса крутильного маятника.

Импульс светового излучения с энергией  $W$ , падающей на приемный элемент, сообщает крутильному маятнику момент количества движения

$$M_{св} = \frac{W}{c} K(\lambda) r_{св}, \quad (4)$$

Где  $r_{\text{св}}$  — плечо действия силы светового давления;

$c$  — скорость света в вакууме;

$K(\lambda)$  — коэффициент, определяемый отражающими и поглощающими свойствами приемного элемента, входного и выходного окон.

Если пренебречь влиянием поглощения излучения и интерференционными явлениями в пластиках и между ними, то с учетом многократных отражений [6]

$$K(\lambda) = \frac{4r}{1+5r}, \quad (5)$$

где  $r$  — коэффициент отражения по интенсивности для поверхностей, вычисляемый по формуле Френеля через показатель преломления  $n$ :

$$r = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2. \quad (6)$$

Влиянием интерференционных явлений в приемной камере измерителя можно пренебречь, если в качестве приемного элемента, входного и выходного окон использовать, например, пластины с небольшой клиновидностью [4].

Из уравнений (1), (4) получаем основное соотношение между измеряемой энергией и величиной напряжения калибровки:

$$W = \frac{c}{K(\lambda)} \frac{r_{\text{эл}}}{r_{\text{св}}} 2R_{\kappa} C_{\kappa} U_{\kappa} U_{\kappa} \frac{dC_0}{dx}. \quad (7)$$

Постоянная времени цепи разряда  $R_{\kappa} C_{\kappa}$  выбирается порядка длительности измеряемых импульсов излучения ОКГ. Общая погрешность измерителя зависит не только от точности определения параметров, входящих в уравнение (7), но и ряда других параметров, оценка которых приведена ниже.

Погрешность, обусловленная шероховатостью поверхностей приемного элемента, входного и выходного окон для классов обработки PIV не превосходит 1% [7].

Погрешность, обусловленная тепловыми эффектами, как показано в работах [8, 9], не превышает 2%.

Погрешность, обусловленная влиянием внешних условий (температура, влажность, давление, механические шумы и пр.) оценивается по величине дрейфа нуля крутильных микровесов на шкале 1000 дж и не превосходит 2%.

Оптические оси измерителя и измеряемого излучения должны быть совмещены с точностью  $\pm 1$  мм и по углу с точностью  $\pm 1^\circ$ . Возникающая при этом погрешность — не более 1,5%.

При неравномерном распределении интенсивности в пучке погрешность измерений определяется только смещением центра тяжести силы светового давления на приемном элементе относительно вертикальной оси, проходящей через центр приемного элемента. В случае чистых мод излучения эта погрешность отсутствует. В многомодовом режиме работы твердотельных ОКГ обычно

более 80% всей энергии распределяется в среднем во времени по поперечному сечению луча равномерно и менее 20% — случайным образом [10]. Погрешность в этом случае не превосходит 2% при диаметре пучка 60 мм. Общая среднеквадратичная погрешность измерителя не превышает  $\pm 7 - 8\%$ .

Сравнивались показания разработанного пондеромоторного измерителя с образцовым калориметрическим прибором типа ИЭК-1, аттестованным в Саратовской межобластной лаборатории государственного надзора за стандартами и измерительной техникой, при

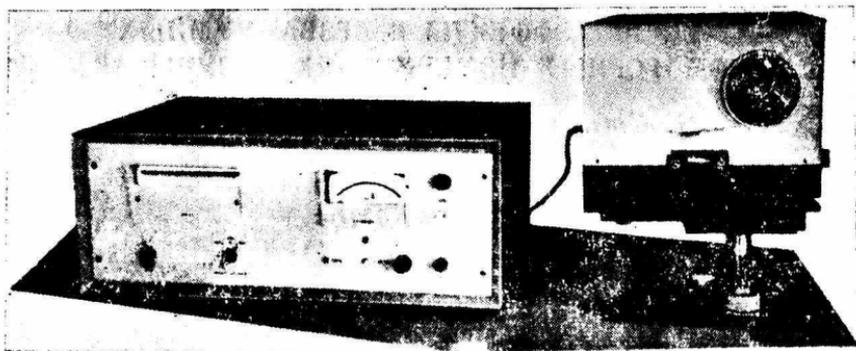


Рис. 2. Общий вид прибора.

одновременном измерении излучения ОКГ ГОР-100 м. Отклонение отношения показаний приборов от среднего не превосходило  $\pm 7\%$ , что находится в пределах точности обоих измерителей.

Разработанный прибор найдет широкое применение для контроля энергетических параметров импульсных ОКГ и в различного рода экспериментальных исследованиях. Прибор удобен для проведения сличений и калибровки по нему других измерителей, датчиков и т. п. Внешний вид прибора приведен на рис. 2.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Батанов, Б. В. Ершов, Л. П. Максимов, В. В. Савранский, В. Б. Федотов. Лазерная установка с энергией излучения до 10 кДж для исследования взаимодействия мощных световых потоков с веществом. Сб. «Краткие сообщения по физике», № 4, ФИАН СССР, 1970.
2. Рекламный проспект завода «ЭТАЛОН», Волгоград, 1971.
3. Р. А. Валитов, Н. Г. Кокодий. Невакуумный пондеромоторный измеритель импульсной энергии ОКГ. Сб. «Радиотехника», вып. 11. Изд-во ХГУ, Харьков, 1969.
4. Измерение характеристик оптических квантовых генераторов (под ред. Р. А. Валитова, А. В. Кубарева). Комитет стандартов, 1969.
5. В. К. Николаев. Вопросы калибровки крутильных электростатических микровесов. «Электронная техника», серия 8, вып. 10, 1972.
6. В. К. Николаев, Ю. В. Химичев. К расчету светового давления и потерь на поглощающие в пондеромоторных измерителях энергетических характеристик ОКГ. «Электронная техника», серия 11, вып. 2, 1971.

7. В. С. Лисицин, В. К. Николаев. Влияние шероховатости поверхностей диэлектрических пластин на расчет пондеромоторных сил. «Электронная техника», серия 8, вып. 10, 1972.

8. А. А. Антоненко, Г. П. Стародубцев, С. А. Чекушин. Влияние тепловых эффектов на погрешность безвакуумного пондеромоторного измерителя излучения ОКГ. «Электронная техника», серия 11, вып. 2, 1971.

9. Г. П. Стародубцев. Тепловые эффекты в безвакуумных пондеромоторных измерителях излучения. «Электронная техника», серия 11, вып. 3, 1971.

10. А. Л. Микаэлян, М. Л. Тер-Микаэлян, Ю. Г. Турков. Оптические квантовые генераторы на твердом теле. Изд-во «Советское радио», 1967.