

УДК 533.9.16:621.317.794

## БОЛОМЕТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ НА ТОРСАТРОНЕ «УРАГАН-3М»

**В.И. Коваленко, В.Д. Коцубанов, И.К. Никольский, Ф.И. Ожерельев, С.А. Цыбенко**

*Институт физики плазмы Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,*

*ул. Академическая, 1, Харьков 61108, Украина*

*E-mail: volkov@ipp.kharkov.ua*

Поступила в редакцию 25 марта 2005 г.

При учете специфических особенностей работы торсатрона «Ураган-3М», для болометрических измерений был выбран датчик типа "термозонд". Рабочим телом такого датчика является металлическая фольга толщиной 2,5 мкм, нагреваемая до температур  $\sim 800 \div 1000^\circ\text{C}$ . В эксперименте на У-3М болометрический датчик был расположен на обращенной к плазме поверхности магнитного полюса. Это обусловило минимальную высоту устройства  $\sim 28$  мм. Максимальный угол приема излучения плазмы –  $155^\circ$ . Применен импульсный нагрев фольги прямоугольным импульсом тока, длительность импульса – 5 с. Калибровка болометра осуществлялась наложением на нагревающий импульс дополнительного токового импульса прямоугольной формы длительностью  $1 \div 40$  мс. Подавление помехи на частоте генератора ( $f \sim 8,5$  МГц) составило 55 дБ, ослабление "пьедестала" полезного сигнала – 60 дБ. Временное разрешение системы равно  $10^{-3}$  с, минимальный уровень детектируемого сигнала соответствует 10 кВт излучаемой плазмой мощности.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** плазма, торсатрон, радиационные потери, болометрия.

Основными факторами, затрудняющими проведение болометрических измерений на установке «Ураган-3М» (У-3М), являются следующие: 1) очень высокий уровень ВЧ-помех в разрядной камере, 2) магнитная конфигурация трехзаходного торсатрона, 3) высокий уровень жесткого рентгеновского излучения, 4) невозможность доступа к датчику в течение измерительной кампании. В современных экспериментах по магнитному удержанию радиационные потери обычно измеряются при помощи болометрических датчиков (БД), чувствительным элементом которых служит тонкая металлическая фольга. Поглощаемое чувствительным элементом излучение плазмы приводит к росту температуры фольги. Изменение температуры пропорционально количеству энергии, излучаемой плазмой и поглощенной фольгой. Изменение температуры фольги обычно измеряется с помощью находящихся в тепловом контакте с чувствительным элементом пирозлектрическим детектором [1], металлическим сопротивлением [2], термопарой [3]. При этом возникают два противоречивых требования: 1) максимальный тепловой контакт между чувствительным элементом и термодетектором, обеспечивающий необходимую чувствительность и быстродействие БД, 2) минимальная емкостная связь между этими частями БД для обеспечения достаточной помехозащищенности болометрической системы.

Целью настоящей работы является создание болометрического датчика, конструктивные и схемотехнические решения которого обеспечили бы стабильное проведение измерений в условиях установки У-3М.

### УСТРОЙСТВО БОЛОМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

Учитывая изложенное, для конструкции БД нами был использован принцип "термозонда", предложенный в работе [4 с.274-285] и усовершенствованный в [5]. Термозонд отличается от обычного БД тем, что металлическая фольга чувствительного элемента нагрета до температуры  $\sim 1100^\circ\text{K}$ . Тепловое излучение фольги принимается приемником ближнего ИК диапазона. Как и в обычном БД, поглощенное нагретой фольгой излучение плазмы вызывает повышение температуры чувствительного элемента. В свою очередь это повышение температуры увеличивает интенсивность теплового излучения и смещает его спектр в коротковолновую область (в сторону повышения спектральной чувствительности ближнего ИК фотоприемника). Возникающее при этом увеличение сигнала фотоприемника является полезным сигналом БД.

Конструкция БД, разработанная на основе изложенного принципа и удовлетворяющая условиям и задачам эксперимента на установке У-3М, изображена на рис. 1. Чувствительным элементом БД является титановая фольга (5) толщиной 2,5 мкм, изготовленная методом плазменного напыления. Фольга находится между токоподводящими электродами (4). Излучение нагретой фольги при помощи полого конического медного световода (6) поступает на иммерсионный фотодиод (3) Д-263. Диаметр входного отверстия световода – 4 мм, выходного – 6 мм. Вся конструкция размещена на тефлоновом основании (1) и закрыта черной изнутри крышкой (2), выполненной из нержавеющей стали. Так как основной задачей болометрической системы установки У-3М является измерение полной величины радиационных потерь плазмы, конструкция БД обеспечивает угол акцепции принимаемого излучения  $\approx 155^\circ$ .

Окончательное подавление ВЧ помехи и помех более низкочастотного диапазона осуществляется широкополосным дифференциальным усилителем (4), выполненным на микросхеме AD830. Из принципа работы термозонда следует, что полезный сигнал БД находится на пьедестале, напряжение которого примерно на два по-

рядка превосходит собственно полезный сигнал. Для разделения полезного сигнала и пьедестала служит узел, собранный на микросхемах (5 - 7).

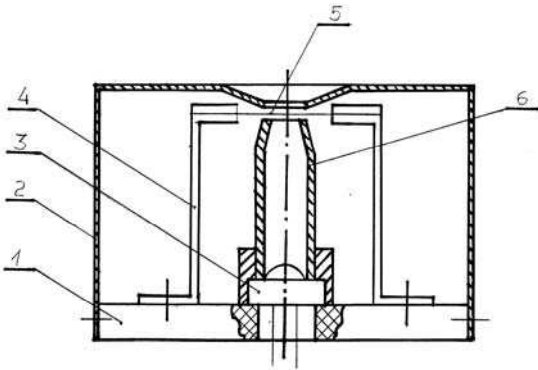


Рис.1 Устройство болометрического датчика.

- 1 – тефлоновое основание датчика, 2 – крышка,
- 3 – фотодиод Д-263, 4 – токоподводящие электроды,
- 5 – титановая фольга, 6 – световод.

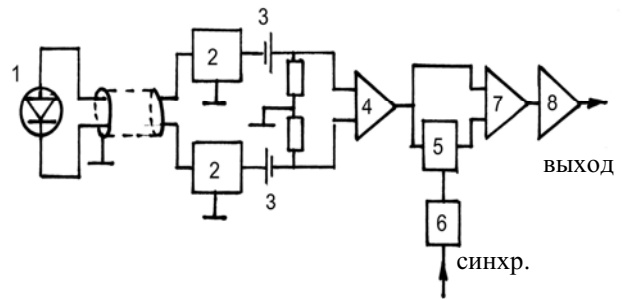


Рис.2. Блок-схема цепей приема и предварительной обработки сигнала БД.

- 1 – фотоприемник, 2 – фильтры Н4,
- 3 – литиевые элементы, 4 – дифференциальный усилитель,
- 5, 6, 7 – микросхемы, 8 – буферный каскад

На рис.2 приведена блок-схема приемных цепей и устройства предварительной обработки сигнала БД. Сигнал с выхода дифференциального усилителя (4) подается одновременно на неинвертирующий вход дифференциального усилителя (7) (К140УД17) и на вход микросхемы выборки-хранения (5) (КР1100СК2). Выход (5) соединен с инвертирующим входом (7). Микросхема (5) переводится из режима выборки в режим хранения таймером (6) (КР1006ВИ1) за 10 мс до включения ВЧ генератора на время  $\approx 1$  с. Стабилизировавшийся к этому времени сигнал пьедестала запоминается (5) и подается на инвертирующий вход (7). На неинвертирующий вход с началом разряда начинает поступать вместе с пьедесталом полезный сигнал. Сигнал пьедестала, таким образом, подавляется, и на выходе дифференциального усилителя (7) появляется усиленный на 10 дБ полезный сигнал. Через буферный каскад (8) (К157УД1) полезный сигнал подается для дальнейшей обработки.

Форма сигнала на выходе БД определяется динамикой тепловых процессов в чувствительном элементе. Максимально возможное временное разрешение такого датчика определяется скоростью распространения скачка температуры через толщину чувствительного элемента. Как показано в [6 с.101], такой скачок температуры проходит толщину чувствительного элемента за время

$$t = \frac{C \cdot \delta^2}{\lambda}, \tag{1}$$

где  $C$  – объемная теплоемкость материала чувствительного элемента,  $\delta$  – толщина чувствительного элемента,  $\lambda$  – теплопроводность. Для титана  $C = 2,27 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}$ ,  $\lambda = 0,22 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  и  $\delta = 3 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ , что приводит к значению  $t < 10^{-6} \text{ с}$ .

Другим важным параметром, определяющим свойства БД, является скорость охлаждения чувствительного элемента. Если пренебречь упомянутым выше быстрым процессом, то тепловой баланс чувствительного элемента можно описать следующим уравнением [2]:

$$\frac{d\Delta T}{dt} = -\frac{\Delta T}{\tau} + \frac{P(t)}{C \cdot \delta}, \tag{2}$$

где  $C$  – объемная теплоемкость чувствительного элемента,  $\delta$  – толщина чувствительного элемента,  $P$  – плотность потока излучения плазмы на чувствительном элементе,  $\tau$  – постоянная времени охлаждения чувствительного элемента.

Из уравнения (2) следует, что если  $\tau \gg \tau_{пл}$  – характерного времени исследуемого плазменного процесса, то БД работает как интегрирующее устройство и функция  $P(t)$  может быть получена просто дифференцированием выходного сигнала БД. Если  $\tau \ll \tau_{пл}$  – выходной сигнал БД пропорционален мощности поглощаемого им излучения. Если  $\tau \sim \tau_{пл}$ , то экспериментально определив  $\tau$ , можно путем аналоговой или цифровой обработки выходного сигнала получить выполнение условия  $\tau \gg \tau_{пл}$  или  $\tau \ll \tau_{пл}$ . Реальные пределы корректировки  $\tau$  определяются как полосой пропускания приемного тракта, так и его шумовыми характеристиками.

Калибровка БД производится с помощью дополнительного токового импульса длительностью  $10 \div 40$  мс, накладываемого на ток накала фольги. Обычно при токе накала фольги порядка  $0,8 \div 0,9 \text{ А}$ , амплитуда тока калибровочного импульса составляет величину  $\sim 80 \div 90 \text{ мА}$ . Как показывают оценки, остывание приемной площадки чувствительного элемента происходит практически только за счет лучеиспускания. Этот факт значительно упрощает как обработку самих сигналов, так и интерпретацию результатов калибровки. Калибровочный коэффициент, с учетом изложенного выше, имеет вид:

$$K = 2 \cdot U \cdot \Delta U \cdot R_{\delta}^{-1} \cdot S^{-1} \cdot F \cdot A^{-1} \text{ [Вт} \cdot \text{В}^{-1}], \tag{3}$$

где  $U$  - напряжение на чувствительном элементе,  $\Delta U$  - амплитуда калибровочного импульса,  $R_s$  - сопротивление чувствительного элемента в нагретом состоянии,  $S$  - площадь чувствительного элемента,  $F$  - геометрический фактор,  $A$  - амплитуда выходного сигнала устройства обработки. На рис. 3 приведен сигнал болометрического датчика при использовании прямоугольного импульса нагрева.

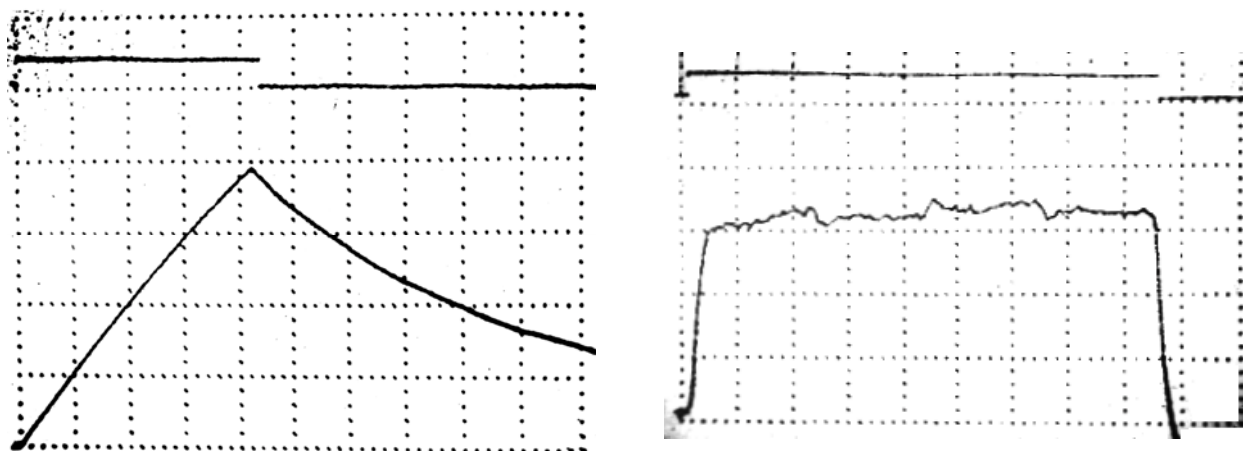


Рис.3. Сигнал болометрического датчика при использовании прямоугольного импульса нагрева.

а) Отклик БД (нижний луч) на калибрующий импульс длительностью  $\sim 20$  мс и амплитудой, соответствующей общей мощности радиационных потерь плазмы 45 кВт. Постоянная времени  $\tau = 52$  мс. Масштаб по оси  $x$ : 5 мс/дел.

б) Отклик БД (нижний луч), обработанный аналоговым устройством, понизившим  $\tau$  до 1 мс.

Масштаб по оси  $x$ : 5 мс/дел

### ВЫВОДЫ

Проведенные стендовые и рабочие испытания датчика, а также пробная эксплуатация датчика на установке У-3М показали, что датчик устойчиво работает в магнитном поле до 2 Тл, при этом сигнальные цепи датчика обеспечивают достаточное подавление ВЧ-помех, производимых системой ВЧ-нагрева плазмы.

Авторы выражают свою глубокую признательность сотрудникам группы О.М. Швеца за проведение поисковых работ по методике изготовления тонких титановых фольг.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.Г. Алексеев, В.Б. Лазарев, С.В. Мирнов Датчик пристеночного потока энергии в токамаке // Физика плазмы. –1992. – Т.18., –С. 205-207.
2. G. Miller, J.G. Ingraham, L.S. Schrank. Bolometer for use in a noisy electromagnetic environment // Rev. Sci. Instrum.. –1988. – Т.59. –С. 700-708.
3. G. Sharp, L. Holmes, P. Stott, D. Aldcroft A thin film thermopile for Neutral Particle Beam Measurements // Rev. Sci. Instrum. – 1974. –Т.45. –С. 378-381.
4. Ю.Г. Прохоров. Измерение энергии плазмы во времени. В сб.: Диагностика плазмы. М.: Атомиздат, 1963. –302с.
5. М.Г. Каганский, С.И. Лашкул, К.Г. Шаховец. Болометр с высоким временным разрешением для исследования энергетических потерь на установках токамак // Физика плазмы. –1977. –Т.3. –С. 681-685.
6. Г. Карслоу, Д. Егер. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. –487с.

### A BOLOMETRIC SENSOR FOR RADIATION LOSS MEASUREMENTS IN THE URAGAN-3M TORSATRON

V.I. Kovalenko, V.D. Kotsubanov, I.K. Nikol'skii, F.I. Ozherel'yev, S.A. Tsybenko

*Institute of Plasma Physics, National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology",*

*1, Akademicheskaya st., Kharkov 61108, Ukraine*

*E-mail: volkov@ipp.kharkov.ua*

With the account of specifics of Uragan-3M (U-3M) torsatron operation, a thermoprobe type sensor has been chosen for bolometric measurements. The sensor is installed on the plasma facing surface of an U-3M magnetic pole, the minimum height of the apparatus being 28 mm. As a working body, a 3  $\mu\text{m}$  titanium foil heated up to 1100<sup>0</sup> K is used. The maximum reception angle of plasma radiation is 155<sup>0</sup>. The foil is heated by a 5 s long rectangular current pulse. The calibration of the bolometer is made by superposition of an additional rectangular 1÷40 ms long heating current pulse. A suppression of the  $\sim 8.5$  MHz interference produced by the plasma heating oscillator is 55 dB. A reduction of the useful signal pedestal is 60 dB. The temporal resolution of the system is 10<sup>-3</sup> s, the minimum level of the recorded signal corresponds to the power of  $\sim 10$  kW radiated by the plasma.

**KEY WORDS:** plasma, torsatron, radiation losses, bolometry.