

УДК 621.3.095.4+53.082.63

DOI: 10.17223/00213411/62/7/153

А.И. КЛИМОВ

**ШИРОКОАПЕРТУРНЫЕ ЖИДКОСТНЫЕ КАЛОРИМЕТРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ \***

Выполнен обзор эффективных устройств, предназначенных для измерения энергии мощных импульсов электромагнитного излучения релятивистских СВЧ-источников – жидкостных калориметров с широкоапертурными поглощающими нагрузками. Описаны конструкции и характеристики калориметров и особенности их работы.

*Ключевые слова:* СВЧ-калориметр, широкоапертурная поглощающая нагрузка, мощные СВЧ-импульсы, релятивистские источники СВЧ-излучения.

Исследования в области получения мощных наносекундных импульсов СВЧ-излучения [1] остаются актуальными на протяжении последних десятилетий. Важной характеристикой таких импульсов является амплитуда мощности СВЧ-излучения. Общеизвестно, что наиболее надежный метод ее определения связан с измерением энергии и формы огибающей импульса (зависимости его мощности от времени). Энергия СВЧ-импульса измеряется с помощью специальных калориметров [2–19], а для измерения зависимости мощности СВЧ-излучения от времени могут использоваться СВЧ-детекторы, включенные в схему измерений. Действие СВЧ-калориметра основано на поглощении энергии СВЧ-излучения его рабочим телом и измерении этой поглощенной энергии тем или иным способом. В практике релятивистской СВЧ-электроники нашли применение два типа калориметров: «сухие» [2–6] и «жидкостные» [7–19]. В конструкции сухого калориметра используется рабочее твердое тело с оптимальными для поглощения СВЧ-излучения размерами и формой. Для определения поглощенной энергии измеряется прирост его температуры. В конструкции жидкостного калориметра в качестве рабочего тела применяется радиопрозрачный диэлектрический объем с оптимальными геометрическими характеристиками, заполненный жидкостью, чаще всего этиловым спиртом или водой, и измеряется или прирост температуры, или увеличение объема жидкости вследствие поглощения СВЧ-энергии. Рабочее тело входит в состав поглощающей нагрузки калориметра. Калориметры могут быть как широкополосными, так и узкополосными – рассчитанными на использование в узком диапазоне длин волн.

Широкое применение получили сухие [2–4] и жидкостные [7–10] калориметры с поглощающими нагрузками волноводной конструкции, подключающиеся непосредственно к выходному волноводу источника СВЧ-излучения. С ростом излучаемой мощности во избежание СВЧ-разряда произошел переход к конструкциям калориметров с нагрузками, имеющими поперечные размеры, существенно превышающие длину волны [5, 6, 11–19]. Среди них особый интерес представляют жидкостные калориметры [11–19], имеющие широкоапертурные поглощающие нагрузки, которые могут подключаться либо непосредственно к выходу источника СВЧ-излучения [15, 16, 19], либо устанавливаться перед раскрытием его передающей антенны [11–14, 17–19]. Эти калориметры выгодно отличаются тем, что не требуют калибровки с помощью дополнительного источника СВЧ-излучения. Измерение поглощенной СВЧ-энергии  $\Delta W$  в таких калориметрах основано на эффекте увеличения объема рабочей жидкости  $\Delta V$  в соответствии с соотношением  $\Delta V = (\beta/\rho c)\Delta W$ , где  $\beta$ ,  $\rho$  и  $c$  – коэффициент объемного расширения, плотность и удельная теплоемкость жидкости соответственно. Таким образом, увеличение объема жидкости не зависит от самого объема, а только от поглощенной энергии. Это значит, что можно конструировать поглощающие нагрузки различного объема, в том числе и достаточно большие. Сравнение величины  $\beta/\rho c$  для этилового спирта и для воды показывает, что спирт обеспечивает значительно большее расширение объема, чем вода при одинаковой поглощенной энергии, а значит, и более высокую чувствительность калориметра. Тем не менее при определенных условиях вода все же находит применение в качестве рабочей жидко-

\* Работа выполнена при частичной поддержке грантом РФФИ № 18-42-700012-п\_а.

