

## Измерение плотности ВЧ и СВЧ энергии методом лазерной интерференционной термометрии

Н.В. Гусева<sup>1</sup>, М.М. Киселёв<sup>2</sup>, П.В. Дородов<sup>2</sup>, Г.М. Михеев<sup>1</sup>, В.А. Морозов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики Уральского отделения РАН, г. Ижевск, Удмуртия

<sup>2</sup>Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, г. Ижевск, Удмуртия

В настоящее время метод лазерной интерференционной термометрии (ЛИТ) наиболее часто (по сравнению с другими) применяется для дистанционного контроля температуры полупроводниковых и диэлектрических подложек в микроэлектронике. Метод ЛИТ имеет высокую разрешающую способность по температуре (не хуже 0,05 К) в широком диапазоне измеряемых температур [1]. Основываясь на этом методе, нами разработано и создано устройство для бесконтактного контроля мощности высокочастотного (ВЧ) или сверхвысокочастотного (СВЧ) поля, поглощенного прозрачной средой [2]. Однако в технологических процессах пищевой промышленности, в которых используется диэлектрический нагрев, обрабатываемые материалы, как правило, не прозрачны и не имеют жестких геометрических размеров. Поэтому прямое применение ЛИТ для контроля мощности, поглощенной материалами, не представляется возможным.

Необходимо отметить, что качественная обработка материала в камерах ВЧ или СВЧ нагрева допустима только в том случае, если плотность распределения энергии электромагнитного поля (ЭМП) в них практически равномерна [3]. На ВЧ это условие достаточно просто обеспечивается расчетным путем [4]. На СВЧ существуют сложности с определением типа волн, возбуждаемых в камере нагрева. Поэтому в этом диапазоне длин волн плотность ЭМП определяют экспериментально с помощью измерителя плотности потока мощности, а также СВЧ ваттметра в сочетании с измерительной антенной [5, 6].

Данная работа посвящена разработке методики, позволяющей контролировать распределение плотности энергии ВЧ или СВЧ поля с помощью разработанного нами устройства [2]. Схема этого устройства показана на рис. 1.

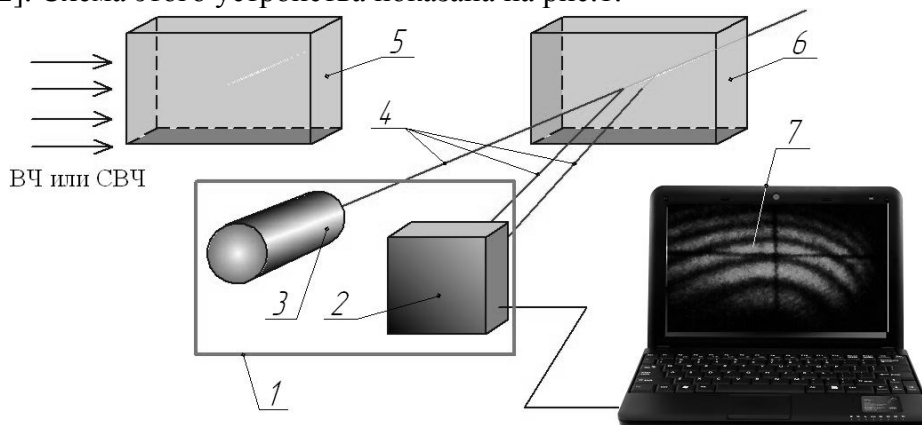


Рис. 1. Схема лазерного интерферометра: 1 – измерительный блок; 2 – видеокамера; 3 – полупроводниковый лазер; 4 – лучи лазера; 5 – датчик мощности, помещенный в камеру нагрева; 6 – тот же датчик, но за пределами камеры нагрева; 7 – монитор компьютера с изображением интерференционной картины

Датчик в форме параллелепипеда из оптически прозрачного материала с размерами много меньше длины волны электромагнитного излучения помещают в камеру СВЧ нагрева. Мощность, поглощаемая датчиком, определяется по формуле [3]:

$$P = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta E^2 V, \quad (1)$$

где  $\omega$  – угловая частота колебаний ЭМП,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\varepsilon_r$  и  $\operatorname{tg} \delta$  – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь

материала датчика,  $E$  – эффективная величина напряженности электрического поля (ЭП) в материале датчика и  $V$  – объем датчика.

Мощность  $P$  расходуется на изменение температуры и энергии упругих деформаций датчика, а также на компенсацию тепловых потерь при взаимодействии датчика с окружающей средой в камере нагрева. В то же время, если датчик находится в ЭМП в течение времени, значительно меньшем постоянной времени нагрева датчика, то мощность, поглощаемую датчиком, можно определить по формуле:

$$P = c_p m \frac{T - T_0}{\Delta \tau}, \quad (2)$$

где  $T$  и  $T_0$  – температуры датчика и окружающей среды в камере нагрева,  $m$  – масса датчика,  $c_p$  – удельная теплоемкость материала датчика,  $\Delta \tau$  – время нагрева.

Ориентация силовых линий ЭМП зависит от типа возбуждаемой в камере электромагнитной волны [7]. Известно, что для диапазона СВЧ волн граничные условия по полю таковы, что силовые линии ЭП, примыкающие к металлическим стенкам камеры нагрева, перпендикулярны или параллельны им. Поэтому, располагая датчик на минимальном расстоянии от стенок и ориентируя его большую грань параллельно им, можно обеспечить перпендикулярность или параллельность силовых линий ЭП большим граням датчика. Если силовые линии перпендикулярны, то напряженность ЭП для точек, находящихся в воздухе около больших граней датчика, рассчитывается по формуле  $E_0 = \varepsilon_r E$ , если линии поля параллельны, то  $E_0 = E$  [8].

Прогретый в камере нагрева датчик извлекают из камеры и помещают в интерферометр. Отраженные от противоположных граней датчика пучки лазерного излучения интерферируют. Интерференционная картина регистрируется видеокамерой. В результате изменения коэффициента преломления и толщины датчика при его нагреве происходит смещение интерференционных полос. В методе ЛИТ температура датчика в процессе измерения находится так [1]:

$$T' = T'_0 + \frac{\lambda \Delta N}{2n_0 h_0 (\beta_0 + \beta)}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения,  $\Delta N = |N - N_0|$ ,  $N$  и  $N_0$  – номера полос интерференции для прогретого и охлажденного до температуры воздуха в лаборатории  $T'_0$  датчика,  $n_0$  и  $h_0$  – показатель преломления материала датчика и его толщина при температуре  $T'_0$ ,  $\beta_0$  и  $\beta$  – температурные коэффициенты показателя преломления и линейного расширения материала датчика.

Приравнивая (1) и (2), учитывая (3) и зависимости между  $E_0$  и  $E$ , полагая, что  $T \approx T'$  и  $T_0 \approx T'_0$ , а так же выделяя из полученного равенства плотность энергии ЭМП в вакууме в соответствии с формулой  $w = \varepsilon_0 E_0^2$ , получаем

$$w \approx \frac{\xi c_p \rho \lambda \Delta N}{2n_0 h_0 \omega \operatorname{tg} \delta (\beta_0 + \beta) \Delta \tau}, \quad (4)$$

где  $\xi = \varepsilon_r$ , если силовые линии ЭП перпендикулярны большим граням датчика и  $\xi = 1/\varepsilon_r$ , если они параллельны,  $\rho$  – плотность материала датчика.

Отсюда следует, что плотность энергии ЭМП в пространстве камеры нагрева свободном от обрабатываемого материала пропорциональна  $\Delta N$ , т.е.  $w \approx K \Delta N$ . Коэффициент пропорциональности  $K$  зависит от физических свойств материала и размеров датчика, длины волны лазерного излучения, ориентации силовых линий ЭП относительно датчика, частоты колебаний генератора ВЧ или СВЧ энергии в камере нагрева. Генераторы, применяемые в промышленности, вырабатывают, как правило, высокостабильную по частоте колебаний электромагнитную энергию. Таким образом, при обеспечении постоянства коэффициента  $K$ , основные сложности определения плотности энергии будут связаны с измерением  $\Delta N$ . Особенности измерения этого параметра (в том

числе определение дробной части интерференционной полосы) подробно рассмотрены в статье [9], а типичная интерференционная картина, получаемая на экране компьютера, приведена на рис. 1.

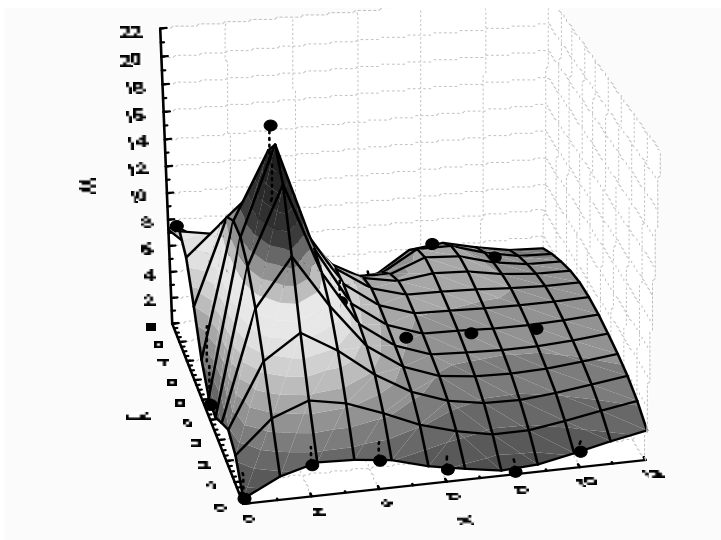


Рис. 2. Распределение плотности электромагнитной энергии на высоте 10 мм от дна камеры СВЧ печи (точки – экспериментальные значения)

Результаты исследования распределения плотности электромагнитной энергии  $w$  в камере СВЧ печи с применением полупроводникового лазера марки HLDPM12-655-25 показаны на рис. 2.

В заключение укажем, что описанный выше метод нахождения распределения плотности ЭМП можно применять в лабораторных исследованиях, а также в опытно-конструкторских работах с целью оптимизации камер ВЧ или СВЧ нагрева.

### Литература

1. Магунов А.Н. Лазерная термометрия твердых тел. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 224 с.
2. Дородов П.В., Гусева Н.В., Киселёв М.М. Устройство для бесконтактного определения мощности СВЧ-излучения // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 6. – С. 32 – 33.
3. Рогов И.А., Некрутман С.В., Лысов Г.В. Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 200 с.
4. Морозов В.А. Расчёт характеристик рабочего конденсатора с прямоугольными электродами // Электротехника. – 2002. – № 11. – С. 41 – 44.
5. Билько М.И., Томашевский А.К. Измерение мощности на СВЧ. – М.: Радио и связь, 1986. – 168 с.
6. Морозов В.А., Михеев Г.М., Зонов Р.Г. Ваттметр для высокочастотной системы с плазменной нагрузкой // Харьковская нанотехнологическая ассамблея. Том I. Вакуумные нанотехнологии и оборудование / Под общ. ред. И.М. Неклюдова, В.М. Шулаева. – Харьков: ННЦ «ХФТИ»: ИПП «Контраст», 2006. – С. 41 – 45.
7. Федоров Н.Н. Основы электродинамики: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1980. – 399 с.
8. Парселл Э. Электричество и магнетизм. Пер. с англ. – М.: Наука, Глав. ред. физ.-мат. литературы, 1971. – 448 с.
9. Беркутов В.П., Гусева Н.В., Дородов П.В., Киселев М.М. Интерферометр для определения нормальных напряжений в плоских прозрачных моделях // Датчики и системы. – 2009. – № 2. – С. 26 – 29.