

УДК 621.372: 621.365

Исследование процессов СВЧ-нагрева жидких полимеров в многомодовой резонаторной камере

В. В. Комаров

Саратовский государственный технический университет, г. Саратов, Россия

E-mail: vkom@mail.saratov.ru

Проведены экспериментальные исследования процессов распространения и поглощения электромагнитных волн СВЧ-диапазона в образцах жидких полимеров. Измерения тепловых полей в многомодовом резонаторе выполняли с помощью видеокамеры и термочувствительной плотной бумаги с жидкокристаллическим покрытием для двух частот — 2,45 и 5,8 ГГц, предназначенных для промышленного, медицинского и научного применения.

PACS: 41.20.Jb, 81.05.-t, 84.40.-x

Введение

Полимерные материалы широко применяются в современной микроэлектронике, электротехнике, авиастроении и других отраслях. Они представляют собой высокомолекулярные соединения, получаемые путем объединения молекул сравнительно простых по своему составу мономеров [1]. В качестве катализатора химической реакции образования полимера из мономера (полимеризации) может быть успешно использовано СВЧ-излучение. При этом различают два типа полимеризации: для полярных и неполярных диэлектриков.

Конденсационная поляризация полярных диэлектриков наилучшим образом управляется СВЧ-энергией [2]. Примером полярных полимеров могут служить полиамиды, имеющие молекулы линейного типа, образованные комплексами из 4—8-метильных групп CH_2 в совокупности с пептидными группами CO—NH .

К неполярным полимерам относятся, к примеру, полиэтилен, фторопласт, полистирол, имеющие низкую диэлектрическую проницаемость $\epsilon' \sim 2,05$ — $2,4$ и низкие потери $\text{tg } \delta_e \sim 10^{-4}$, где $\text{tg } \delta_e$ — тангенс угла диэлектрических потерь.

Использование СВЧ-энергии для термообработки полимеров позволяет не только ускорить технологический процесс, но и устранить нежелательные градиенты температур, возникающие из-за низкой теплопроводности этих материалов. В ходе полимеризации вещество может изменить свое агрегатное состояние, например перейти из жидкого в твердое, как это происходит при вулканизации эпоксидных резин [1].

Большинство работ, в которых анализируются те или иные аспекты реализации СВЧ-полимеризации, посвящены изучению либо твердых сред, либо аморфных или жидких веществ с высокой вязкостью, для которых с помощью СВЧ-энергии осуществляется затвердевание (curing) [3—5]. В то

же время процессы взаимодействия электромагнитных (ЭМ) волн с жидкими полимерами, сохраняющими свое агрегатное состояние, вплоть до отключения источника СВЧ-излучения, пока остаются малоизученными. Такого рода полимеры находят применение в фундаментальных и прикладных научных исследованиях микроволнового нагрева в качестве заменителей пищевых продуктов [6], биологических тканей [7], а также в нанотехнологиях [8].

Измерить температуру (T , °C) в объекте, нагреваемом СВЧ-полем, можно с помощью видеокамеры для регистрации инфракрасного (ИК) излучения [5] или оптических сенсоров [9]. Однако ИК-видеокамера дает изображение только на поверхности образца, а сенсоры позволяют измерить температуру в фиксированных точках внутри его объема. Для определения тепловых полей в области взаимодействия ЭМ-волн с твердыми диэлектриками иногда используют специальную тонкую термобумагу для факсов [10], но ее адаптация для жидких сред весьма проблематична.

В данной работе впервые проведены экспериментальные измерения тепловых полей в образцах жидких полимеров, нагреваемых СВЧ-полем в многомодовой резонаторной камере.

Исследования проводили с привлечением нового измерительного инструмента — термочувствительной плотной бумаги с жидкокристаллическим покрытием для двух ISM частот: 2,45 и 5,8 ГГц.

Экспериментальные системы

Для исследований были выбраны шесть образцов жидких полимеров, выпускаемых компанией Bayer AG (Германия). В соответствии со спецификацией на эти материалы их диэлектрическая проницаемость варьируется в интервале $2,5 \leq \epsilon' \leq 6,7$; коэффициент потерь $0,4 \leq \epsilon'' \leq 2,4$; динамическая

вязкость $1,4 \leq \mu, \text{Па}\cdot\text{с} \leq 28$; плотность $1 \leq \rho, \text{г}/\text{см}^3 \leq 1,2$. Все шесть веществ представляют собой вязкие прозрачные жидкости, сохраняющие свое агрегатное состояние до температур порядка 200°C .

В настоящее время наиболее востребованными в системах СВЧ-нагрева различного назначения являются две ISM-частоты: 915 МГц и 2,45 ГГц. Еще одна частота 5,8 ГГц, выделенная для технологических, научных и медицинских целей, применяется гораздо реже.

Анализ процессов взаимодействия ЭМ-волн с жидкими полимерами на частоте 2,45 ГГц проводился в данной работе с использованием бытовой СВЧ-печи DAEWOO KOR 6D07 с магнетронным источником, расположенном на боковой стенке резонатора, как показано на рис. 1, а. Из нее был удален вращающийся столик, а образец жидкого материала в стеклянной кювете с толщиной стенок 1 мм и объемом 400 мл размещали вблизи с источником излучения. Комплексная диэлектрическая проницаемость кюветы: $\epsilon' = 5,7$, $\epsilon'' = 0,0513$ (NaCl — 9%; SiO₂ — 91%).



а



б

Рис. 1. Экспериментальные СВЧ-системы с рабочей частотой:

а — 2,45 ГГц; б — 5,8 ГГц;

1 — резонатор; 2 — элемент возбуждения; 3 — образец

Для проведения аналогичных исследований на частоте 5,8 ГГц в верхней стенке резонатора был установлен волновод 35×17 мм, в котором на этой частоте распространяется волна Н₁₀. Возбуждение камеры размером $X \times Y \times Z = 290 \times 286 \times 216$ мм осу-

ществлялось уже не магнетроном, а клистроном. Вращающийся столик и магнетрон СВЧ-печи DAEWOO KOR 6D07 были удалены, а образец размещен в то же место, что и ранее. При нагреве поддерживался непрерывный режим работы электронных приборов с мощностью 800 Вт.

Измерения тепловых полей внутри объема жидкого полимера проводили с помощью термочувствительной плотной бумаги, имеющей с одной стороны жидкокристаллическое покрытие (www.omega.com). Этот новый инструмент имеет ряд недостатков, ограничивающих его функциональные возможности, в частности, он предназначен для узких тепловых диапазонов: 20—25, 30—35, 40—45 °С.

Фиксируемое распределение поля в узком температурном интервале в большинстве случаев нестабильно, и при отключении источника нагрева изображение на бумаге быстро исчезает. Кроме того, плотная термобумага имеет необычную цветовую гамму: от оранжевой ($T_{\text{max}}^\circ\text{C}$) до красной, зеленой и синей ($T_{\text{min}}^\circ\text{C}$).

При выходе за пределы температурного диапазона цвет термобумаги становится черным. Наконец, гладкая поверхность термобумаги сильно отражает свет, что затрудняет получение фото- и видеоизображений.

В ходе предварительных исследований удалось решить все эти проблемы. Лист плотной бумаги с жидкокристаллическим покрытием, размеры которого были выбраны по размерам (диаметр и высота) стеклянной кюветы, помещали строго в плоскости симметрии образца, как показано на рис. 2. Обе СВЧ-камеры были оборудованы цифровыми видеокамерами, соединенными с персональным компьютером для снятия изображений в автоматическом режиме. Ориентация образца внутри резонатора выбиралась исходя из удобства получения двумерных изображений теплового поля. Кроме того, было установлено, что тонкий слой плотной термобумаги не вносит существенных искажений в структуру теплового поля в образце, и ее влиянием можно пренебречь.



Рис. 2. Стеклянная кювета с жидким полимерным образцом и термочувствительной бумагой

Результаты измерений

На рис. 3 представлены результаты измерений температуры в плоскости симметрии образца XZ , установленные в интервале температур $30 \leq T^{\circ}\text{C} \leq 35$ для обеих указанных ранее частот (2,45 и 5,8 ГГц). Здесь светлые пятна соответствуют максимальной зафиксированной температуре T_{max} , а темные — минимальной T_{min} . Ряд темно-серых пятен в центре светлых (см. рис. 3, *a, б*) показывает, что темпера-

тура в этой области превышает 35°C . Небольшие яркие пятна на оси симметрии в центре изображения (см. рис. 3, *б, е*) являются результатом отражения света от гладкой поверхности. Фотоизображения были получены по прошествии 7 с (см. рис. 3, *a—e*) и 3 с (см. рис. 3, *ж—м*) с момента включения СВЧ-источника. В экспериментах использовались листы плотной термобумаги размером 76×100 мм ($X \times Z$), толщиной менее 200 мкм.

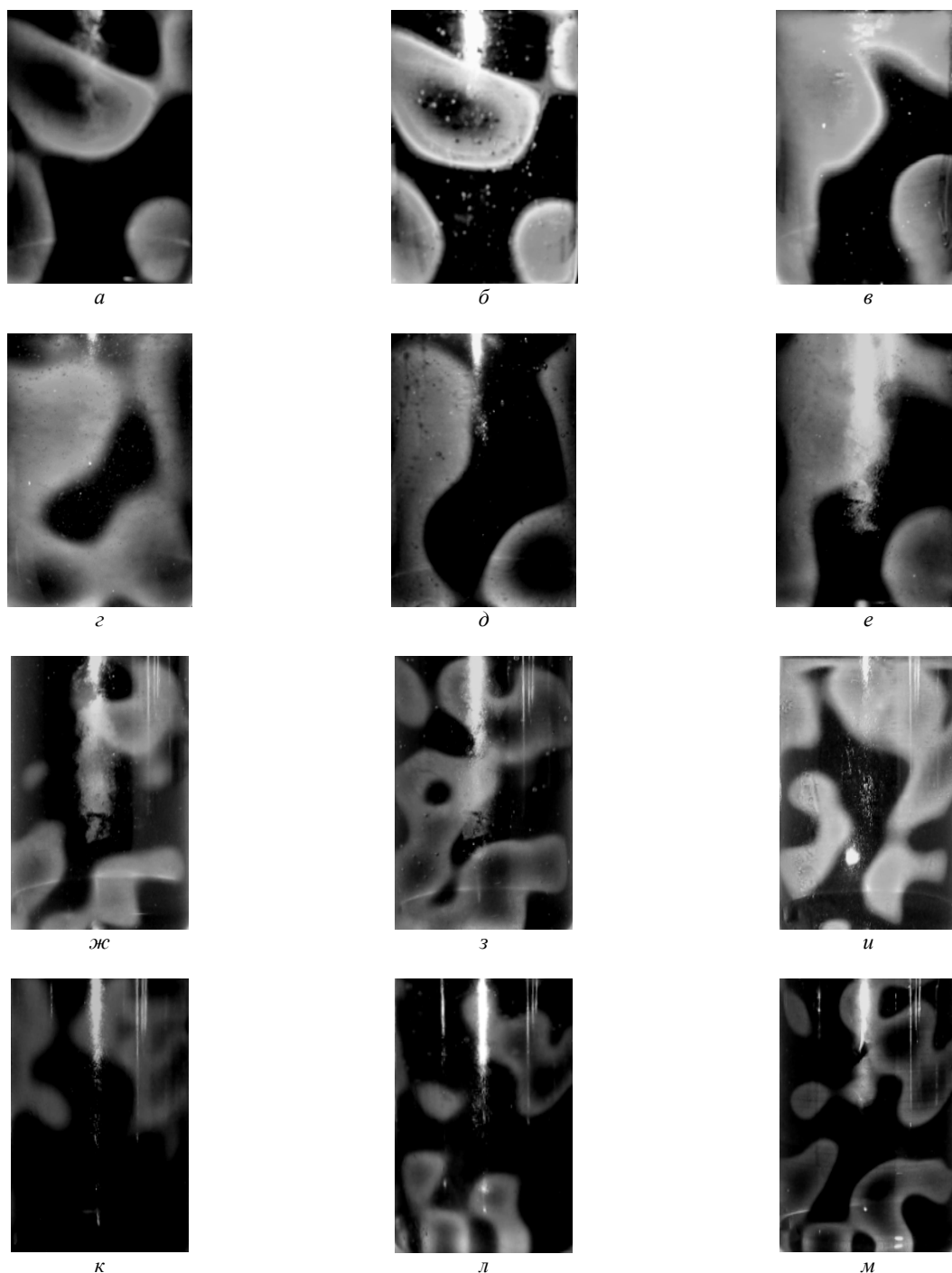


Рис. 3. Распределение тепловых полей в жидких полимерах: образец 1 (*a, ж*); образец 2 (*б, з*); образец 3 (*в, и*); образец 4 (*г, к*); образец 5 (*д, л*); образец 6 (*е, м*) на частотах 2,45 ГГц (*a—e*) и 5,8 ГГц (*ж—м*)

Полученные данные (см. рис. 3) продемонстрировали, что увеличение рабочей частоты СВЧ-излучения приводит к перераспределению функции плотности тепловых источников в образцах жидких полимеров и интенсификации процесса нагрева. При этом в ряде случаев наблюдается взаимная компенсация зон максимального и минимального нагрева при переходе от частоты 2,45 к частоте 5,8 ГГц. Тем не менее добиться полного выравнивания тепловыделения, даже при одновременном использовании этих двух частот, по всей видимости, не удастся, так как практически для всех рассмотренных образцов, независимо от частоты, в центре области взаимодействия формируется зона с T_{\min} .

Сравнительный анализ полученных результатов показывает, что для частоты 2,45 ГГц структура поля для всех шести материалов оказывается достаточно стабильной: формируются четыре максимума на периферийных участках кюветы (см. рис. 3, а—е). На частоте 5,8 Гц поведение поля менее предсказуемо при переходе от одного образца материала к другому (см. рис. 3, ж—м). Этот эффект объясняется вариациями диэлектрических свойств жидких полимеров. В частности, зависимости $\epsilon'(T)$ и $\operatorname{tg}\delta_e(T)$ образца 1 (см. рис. 3, а, ж) и образца 2 (см. рис. 3, б, з), а также образца 5 (см. рис. 3, д, л) и образца 6 (см. рис. 3, е, м) примерно совпадают.

Известно [11], что с ростом частоты ЭМ-излучения ϵ' большинства полярных диэлектриков снижается, а $\operatorname{tg}\delta_e$ — возрастает. Одновременно, согласно теории, должна уменьшаться глубина проникновения ЭМ-поля в диссипативную среду. Однако, как видно из рис. 3, этого не происходит, и тепловые источники распределены по всему объему. Исключение составляет лишь образец 4, имеющий максимальные потери: $\epsilon' = 5,3$; $\operatorname{tg}\delta_e = 0,415$ при $T = 35$ °С на частоте 2,45 ГГц.

Заключение

В данной работе с помощью нового измерительного инструмента — термочувствительной плотной бумаги с жидкокристаллическим покрытием — впервые проведены исследования процессов облучения СВЧ-энергией жидких прозрачных полимеров в прямоугольном резонаторе. Показа-

но, что в отличие от ИК-видеокамеры и оптических сенсоров, термобумага позволяет найти распределение поля внутри объема жидкого образца. Экспериментальные данные, полученные для двух частот (2,45 и 5,8 ГГц), позволили более детально оценить динамику поведения поля в области взаимодействия СВЧ-излучения с полимерными веществами. Результаты измерений, представленные в данной работе, могут быть использованы для тестирования трехмерных численных алгоритмов компьютерного моделирования устройств микроволнового нагрева.

Техническая поддержка работы осуществлялась ИММ Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Германия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (грант РНП.2.1.1.8014) и германской службы академических обменов DAAD.

Литература

1. Тареев М., Короткова Н. В., Петров В. М., Преображенский А. А. Электрорадиоматериалы/Под ред. Б. М. Тареева. — М.: Высш. шк., 1978.
2. СВЧ-энергетика/Под ред. Э. Окресса. В 3-х т. — М.: Мир, 1971. Т. 1 — 464 с; Т. 2 — 272 с, Т. 3 — 248 с.
3. Jow J., Hawley M. C., Finzel M., Asmussen J., Lin H., Manring B // IEEE Trans. 1987. V. MTT-35. No. 12. P. 1435.
4. Outifa L., Delmotte M., Jullien H.//Ibid. 1997. V. MTT-45. No. 8. P. 1154.
5. Soriano V., Devece C., de los Reyes E.//Int. J. Microwave Power and Electromagnetic Energy. 1998. V. 33. No. 2. P. 67.
6. Ma L., Paul D. L., Potheary N., Railton C., Bows J., Barratt L., Mullin J., Simons D.//IEEE Trans. 1995. V. MTT-43. No. 11. P. 2565.
7. Nikawa Y., Chino M.//Proc. Intern. EMC Symposium. Japan. 1994. P. 564.
8. Müller A., Neukam M., Willert-Porada M.//Microwave and HF Heating. Proc. 10th Int. Conf. — Modena. Italy. 2005. P. 334.
9. Catala-Civera J. M., Giner-Maravilla S., Sanchez-Hernandez D., de los Reyes E.//Int. J. Microwave Power and EM Energy. 2000. V. 35. No. 2. P. 92.
10. George J., Bergman R.//Microwave and Optical Technology Letters. 2006. V. 48. No. 6. P. 1179.
11. Хунпель А. Р. Диэлектрики и их применение. — М.: Госэнергоиздат, 1959.

Статья поступила в редакцию 7 августа 2008 г.

Investigation of processes of microwave heating of liquid polymers in multimode resonator cavity

V. V. Komarov

Saratov State Technical University, Saratov, Russia

E-mail: vkom@mail.saratov.ru

Processes of microwaves propagation and dissipation in liquid polymers are investigated experimentally. Thermal fields in multimode resonator are measured using video camera and thermal sensitive liquid crystal sheets at two frequencies 2.45 and 5.8 GHz intended for industrial, medical and scientific applications.

PACS: 41.20.Jb, 81.05.-t, 84.40.-x

УДК 621.382

Устройство определения критического уровня тока на эффекте генерации шума p - n -переходом

В. Ю. Холкин

Северо-Западный государственный заочный технический университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: office@nwpi.ru

Рассмотрена возможность создания устройства, позволяющего определять критический уровень тока, возникающего в цепи микросхемы. Принцип работы устройства основан на эффекте генерации шума в прямой ветке p - n -перехода при определенных электрических нагрузках.

PACS: 85.30.-z

Введение

Развитие электронной техники с всевозрастающим многообразием исполняемых ею функций, а также предъявление к разработчикам более жестких требований по микроминиатюризации аппаратуры заставляют искать принципиально новые способы решения функциональных задач, решаемых электронными приборами.

Одним из решений вышеозначенной проблемы является создание устройств функциональной электроники, решающих схемотехнические задачи на основе ранее неиспользуемых физических явлений.

Одна из задач, решаемых при разработке электронной техники, — создание устройства определения критического уровня тока.

Для того чтобы устройство определения критического уровня тока могло быть выполнено на одном кристалле микросхемы вместе со всей схемой, оно должно быть сделано по полупроводниковой технологии, т. е. при работе должно использоваться свойство полупроводниковой структуры.

Функциональный блок

Одним из способов решения вышеуказанной схемотехнической задачи может быть использование эффекта генерации шума в прямой ветке p - n -перехода при определенных электрических нагрузках.

Выбор прямой ветки p - n -перехода обусловлен тем, что установка диода в прямосмещенном состоянии практически не влияет на работоспособность схемы и, соответственно, не усложняет схемотехническое решение.

Информация о том, что в полупроводниковых приборах может возникать генерация шумового напряжения достаточно высокого уровня, было известно давно [1—3], однако шум в полупроводниках воспринимается как отрицательное явление.

Использовать генерацию шумового напряжения как полезный информативный сигнал для проектировщиков электронных средств было проблематично, так как большинство работ по изучению закономерностей поведения низкочастотного шума в полупроводниковых приборах не являются достаточными, чтобы разрабатывать на их основе