

Инновационные методы коррекции свойств RR- и PC-материалов электронными устройствами – генераторами волн СВЧ-диапазона частот

Вадим Экземплярский

Современную жизнь затруднительно представить без СВЧ-энергии, как в быту, так и в научных исследованиях, которые не перестают нас удивлять своими открытиями. В статье проанализированы инновационные разработки изменения свойств некоторых материалов с помощью электронных устройств, функционирующих в СВЧ-диапазоне частот. Изменение материалов с помощью новейших электронных технологий в области СВЧ даёт огромные перспективы развитию и безопасности человека.

Светоотражение как способ выживаемости

Явление, известное как эффект урбанизма, или «городская проблема сохранения света и тепла» (УНИ), распространяется по всему миру. В основном – из-за непрекращающейся миграции жителей из сельской местности в города. Это приводит к увеличению количества транспортных средств, систем кондиционирования воздуха, электрических обогревателей, светофоров, уличных фонарей и других устройств современной электроники, выделяющих тепло при работе. Строительство домов, предприятий, дорог также способствует эффекту УНИ, ибо при этом активно используются асфальт, бетон, металлы и кирпичная плитка, которые, с одной стороны, хорошо поглощают тепло, а с другой – не отражают световую (в том числе солнечную) энергию. Так, густонаселённые районы и территории (конгломерации и мегаполисы) потребляют около 75% вырабатываемой во всём мире электроэнергии, хотя занимают всего 2% поверхности Земли [1]. К проблематике постоянно приковано внимание не только специалистов в области экологии и защиты окружающей среды, но и разработчиков РЭА, поскольку результативность совместных исследований зависит от всестороннего вклада неравнодушных людей в свою жизнь и будущее своих детей.

С этой целью разрабатывается несколько стратегий для смягчения эффекта УНИ. В целом их можно

классифицировать как планирование городских конструкций с учётом экологического обеспечения (зелёные насаждения, устройства вентиляции и циркуляции для воздушного потока, зелёные крыши) и разработка систем пассивного энергосбережения в инновационном формате (стены с «солнечными панелями», модули «сбора» солнечной энергии на большой площади, поля с ровным (однородным) ландшафтом, фенестрация, теплоизоляция, аккумулялирование и преобразование электроэнергии, энергосбережение и др.).

В соответствии с обозначенным трендом в стратегии пассивного энергосбережения больше внимания уделяют «холодным» поверхностям отделочных материалов, в основном пигментам, керамике, стеклу и стеклокерамическим материалам, а также световозвращающим материалам (RR) и материалам с изменённой фазой (PCM). RR и PCM обладают высокой отражательной способностью, особенно в видимом и инфракрасном диапазонах. Их использование снижает температуру воздуха в среднем на 2°C, хотя каждое инженерное решение оптимизируют для конкретной городской зоны из-за её особенностей расположения, климата, среднегодовой солнечной активности и иных характеристик.

Так, например, изготовили образцы из шеелитовых и циркононовых стёкол; изменения формы их кристаллов обусловили возможность создания новых эмалированных покрытий. Оказалось,

что высокая преломляющая способность циркона препятствует кристаллизации шеелита, поэтому смесь двух стёкол приводит к возникновению некристаллизованных областей, которые, в свою очередь, влияют на оптические свойства (отражательную способность) поверхности. В некристаллизованных областях выявлено условно большое количество свободного кислорода, что привело к уменьшению коэффициента отражения солнечного света.

Первая СВЧ-печь

Довольно много споров идёт о том, как правильно называть вещи: «микроволновая печь» или «СВЧ-установка»? Свет на этот вопрос может пролить сама история изобретения бытовой СВЧ-печи. В 1945 году американский инженер из штата Мэн Перси Спенсер был принят в компанию Raytheon Technologies Corporation разработчиком активных радаров для военной промышленности. Занимаясь созданием прообраза современного магнетрона, мужчина заметил, что микроволны от экспериментального аппарата расплавили шоколадный батончик в кармане. Как нередко бывает, практический побочный эффект изобретения заинтересовал исследователя сильнее, чем результат выполнения поставленной задачи. Продолжая экспериментировать, Перси расположил рядом с трубкой магнетрона зёрна кукурузы, и те разогрелись настолько, что превратились в попкорн. Положил яйцо – и вскоре оно взорвалось [8]. При нагреве куриного яйца происходит денатурация белков, внутримолекулярная перегруппировка молекул: внутренняя структура вещества нарушается, а частицы протеинов собираются в более крупные – белок становится белым и твёрдым. Вместе с ассистентом Роли Хэнсоном инженеры сделали металлический ящик размерами 35×65 см, поместили туда магнетрон и,



Рис. 1. Первая в мире бытовая СВЧ с водяным охлаждением (США, 1975 год)



Рис. 2. СВЧ-установка Raytheon RadaRange на борту атомного грузового корабля NS Savannah (США)

сами того не осознавая, дали старт первой в мире бытовой микроволновке. Очередное изобретение – одно из тех, которые люди делают иногда случайно, – получило название «Speedy Weenie» («Быстрая сосиска») [8]. Первая бытовая СВЧ и её счастливая обладательница представлены на рис. 1.

Разумеется, открытие Спенсера обусловило проведение множества экспериментов-исследований в сфере разогрева подключённым магнетроном сырых и готовых блюд. Интересно, что есть и такие результаты исследований по теме изменения свойств материалов под воздействием СВЧ-волн: оказывается, некоторые расщеплённые СВЧ органические материалы вполне можно восстановить. В 2015 году опубликована статья о том, как учёные из Калифорнийского университета в Ирвайне вернули приготовленное в СВЧ-устройстве яйцо в исходное состояние [10].

Известно, что волнами СВЧ можно провести термообработку при температуре, обеспечивающей безопасность употребления продукта человеком, даже сырое мясо. Для этого вовсе не обязательно строить ящик с металлическим экраном, потому что пища подогрется и вблизи открытого магнетрона, а экранированный корпус камеры СВЧ-печи бытового назначения нужен лишь для безопасности человека (уменьшения влияния радиоволн). Частотный выбор конкретного участка микроволнового диапазона определили опытным путем при многих исследованиях и экспериментах по



Рис. 3. Вид современной бытовой СВЧ-печи, установленной в интерьере кухни

уменьшению потерь энергии при тех же характеристиках импульсов, тока и напряжения, воздействующих на магнетрон. Тем не менее первые микроволновки делали размером с газовую печь и подключали к водопроводу – жидкостному охлаждению. Только в 1965 году разработчики придумали, как сбрасывать температуру магнетрона с помощью воздуха. В 1975 году изобретение произвело фурор, и микроволновки в США обогнали по продажам газовые плиты. Таков пример условной конверсии, когда на потребительском рынке технология в итоге оказывается более востребованной и прибыльной, чем на оборонном.

В качестве иллюстративного примера на рис. 2 показана СВЧ-установка Raytheon RadaRange на борту атомного грузового корабля NS Savannah (США), 1961 год. На рис. 3 представлен вид на современную бытовую СВЧ-печь, установленную в интерьере кухни.

Возможности современных СВЧ-печей крайне обширны. Например, в микроволновке можно приготовить



Рис. 4. Вид на магнетрон бытовой современной СВЧ-печи

даже эспрессо. Правда, для этого нужна специальная гейзерная кофеварка, сделанная из устойчивого к воздействию СВЧ-волн материала. Именно преобразование материалов обсудим в следующем разделе статьи. Микроволновая печь может использоваться в быту как замена духовому шкафу для производства выпечки, обеззараживания губок для мытья посуды; как водяная баня для продуктов, пароварка и способ приготовления яйца-пашот; для производства «облака мыла» для детей, а также во многих иных случаях. Магнетрон бытовой микроволновой печи выглядит так, как показано на рис. 4.

Мгновенное микроволновое спекание диоксида циркония с использованием новой каскадной стратегии

В области мгновенной обработки материалов микроволновая энергия представляет интересный способ уплотнения сложной формы благодаря бесконтактному объёмному нагреву. Достижение быстрого и равномерного

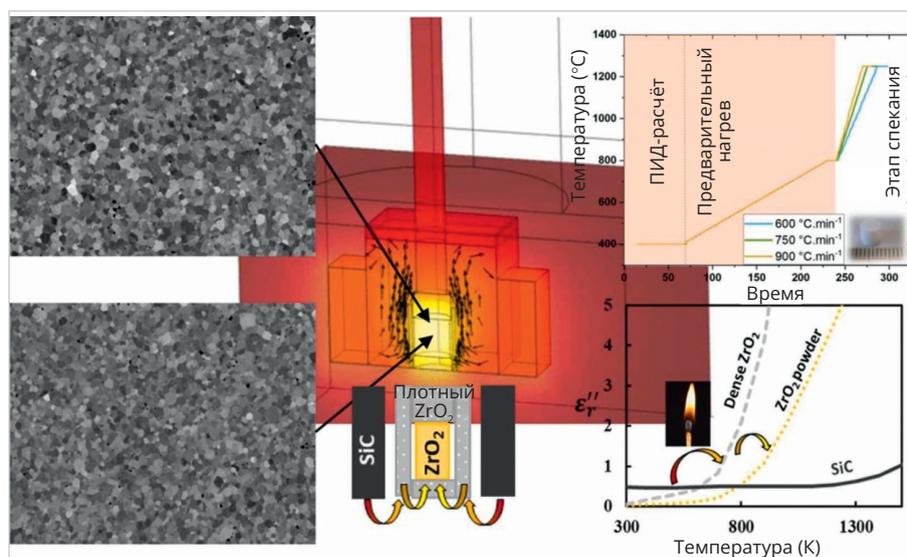


Рис. 5. Иллюстрация работы установки для мгновенного спекания материалов под воздействием энергии СВЧ-волн

нагрева до сих пор является проблемой во многих исследованиях. До последних пор в лабораторных разработках использовался гибридный нагрев керамики с использованием токоприёмников из карбида кремния. Однако новая стратегия (метод SiC) одновременного нагрева множественных элементов с помощью СВЧ при высоких скоростях нагрева до 1000 К/мин приводит к высокой стабильности воздействия на поверхность и мгновенному гибриднему нагреву. Этот метод стали называть «методом мгновенного спекания», а уточнённые результаты появились недавно, в сентябре 2023 года [3, 6].

Мгновенное микроволновое спекание впервые позволило получить плотные (относительная плотность 97%) микроstructures в течение 45 с во время импульсного воздействия микроволнового излучения. На рис. 5 представлена иллюстрация работы установки для мгновенного спекания материалов под воздействием энергии СВЧ-волн.

Мгновенное спекание – сверхбыстрый процесс уплотнения частиц материала за несколько секунд. Впервые о явлении заговорили в Колорадском университете в работе Cologna et al – подробнее в [3, 5], по результатам научных экспериментов. Особенность типичной конфигурации лабораторной установки в том, что электрическое поле и мгновенное воздействие создают с помощью электродов из платины, приложенных к образцу в форме собачьей кости. При определённых полевых и температурных условиях отрицательный температурный коэф-

фициент (ОТК) удельного сопротивления керамики, как и диоксида циркония, способствует резкому увеличению процесса Джоулева нагрева [9]. Чтобы избежать плавления образца, температурный разгон управляется регулятором тока. На рис. 6 представлен график зависимости изменения свойств разных составов (материалов) от температурного воздействия в СВЧ.

Так, стекло ZG является наиболее тугоплавким стеклом с более высокой температурой спекания, в то время как SG спекается при относительно низкой температуре. Смеси SG-ZG демонстрируют промежуточные температуры спекания, хотя они аналогичны температуре спекания SG. Кроме того, стекло SG также имеет более низкую температуру начала растекания по подложке (площадь 30%), а более высокая температура соответствует смеси 25/75-SZ. Согласно рис. 6, смесь 75/25-SZ устойчива к воздействию широкого диапазона температур без изменения площади материала (870...1070°C). То же проявляется и для других смесей, хотя диапазон температур уменьшается с увеличением концентрации ZG. Область, где площадь материала не испытывает изменений под воздействием температуры, соответствует формированию сферической формы в ВСМ. Эффект указывает на то, что из-за высокой тугоплавкости ЗГ частицы обоих типов стекол могут взаимодействовать в интервале температур без уменьшения формы образца, и тогда для начала растекания необходимо приложить дополнительный СВЧ-нагрев.

Таблица 1. Зависимость и характеристики зоны отражения эмали, полученной под воздействием СВЧ-волн

Эмаль	Длина волны отсечки (нм)	Eg (эВ)	
		Прямой	Косвенный
100 с	302	3,97	3,43
75/25-С3	316	3,85	3,28
50/50-С3	326	3,76	3,15
25/75-С3	318	3,90	3,20
100Z	310	3,93	3,24

Изменения в свойствах материалов определяются и оригинальной структурой стёкол SG и ZG. В табл. 1 представлены сведения зависимости и характеристик зоны отражения эмали, полученной под воздействием СВЧ-волн. К примеру, в силикатных стёклах в сравнении с металлами (и металлокерамикой) щелочные катионы и ионы по-разному взаимодействуют в химическом процессе.

Известно, что кристаллизация циркона начинается примерно при 1000°C и очень быстро увеличивается между 1100°C и 1200°C. Согласно кривым, суспензии обжигали при температуре 1170°C – выше температуры сферы, когда вязкость достаточна для «растекания». В результате воздействия эмаль становилась «непрозрачной», что свидетельствовало о кристаллизации шеелита и циркона. На рис. 7 представлен график зависимости облучения СВЧ для разных типов эмалей.

Значения Eg 4,09 и 5,69 эВ получены для кристаллов шеелита, тогда как из экспериментальных УФ-видимых ИК-спектра зарегистрированные значения Eg варьировались от 4,2 до 6,8 эВ [11]. Для металлических сплавов, а также для огнеупорной или крайне огнеупорной керамики применяют метод электроискрового плазменного спекания – ИПС (SPS). Отличительные особенности: высокое давление (>100 МПа) и регулируемая сила тока в установке для воздействия на проводников – материалов с положительным температурным коэффициентом удельного сопротивления (РТС). Ещё одна особенность метода в том, что используется графитовая фольга для предварительного нагрева образца. С помощью мгновенного SPS изготовлены образцы огнеупорной керамики ZrB₂, HfB₂, TiB₂, SiC, MnO₄ и др. Используя установку СВЧ, можно контролировать изменение формы образца при

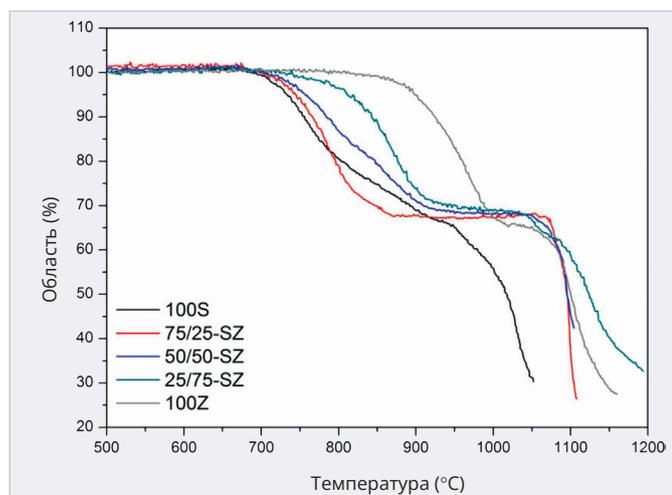


Рис. 6. Зависимость изменения свойств разных составов (материалов) от температурного воздействия в СВЧ

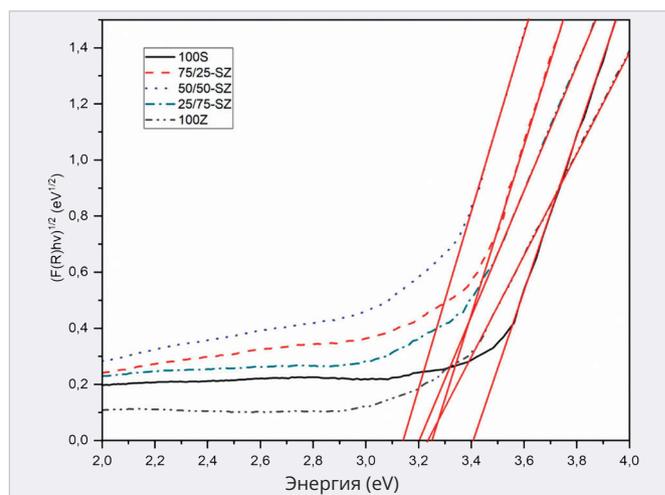


Рис. 7. Графики зависимости облучения СВЧ для разных типов эмалей

нагреве, в том числе чтобы обеспечить сверхбыстрое уплотнение материалов с различными электрическими характеристиками, таких как Ni, ZrO₂, а также MoSi₂, SiC или даже сложных химических соединений, как CaCu₃Ti₄O₁₂.

Микроволновое импульсное воздействие изучалось на частоте гиротрона 24 ГГц и частоте магнетрона 2,45 ГГц. Волны СВЧ, создающие электромагнитное поле, позволяют сверхбыстро изменять свойства разных материалов и их сплавов, в том числе соединений полупроводника и диэлектриков за счёт биполярного взаимодействия.

Особенности мгновенного спекания для получения прикладного результата

Воздействие на изменение свойств материалов посредством микроволновой энергии потенциально перспективно для мгновенного спекания металлических порошков и изменения свойств различных материалов, причём не только содержащих металлы (и сплавы на их основе), но даже каменные породы, образованные много веков назад естественными природными процессами. При определённых температурных условиях в вакууме охлаждающие заготовки потоки создают температурные градиенты и для материалов NTC, что даёт большие перспективы развития науки и инженерной мысли. В качестве простых примеров можно привести изменения свойств горных пород (в области добычи полезных ископаемых и драгоценных металлов), повышение степени защиты людей и производств, электроустановок в шахтах и в условиях сейсмической опасности в районах возмож-

ного извержения вулканов. Ещё один практический вариант – горноспасательные работы, а также строительные работы в районах, насыщенных гранитом, в том числе при строительстве дорог и тоннелей. Разумеется, сфера применения полезных разработок шире: можно спекать даже глинозём (что в перспективе позволит осушать болота и труднопроходимые места, дороги в межсезонную распутицу).

К слову, необычные камни автор встречал в центральных и южных районах Румынии. Их называют тровантами и условно наделяют чертами живых существ. Расщеплять эту породу также удаётся с помощью СВЧ. Строение камня далеко от волшебного. Если аккуратно распилить тровант пополам, то можно увидеть отличающиеся по толщине и цвету кольца, как на древесном спиле. В самом центре находится небольшое твёрдое ядро. Слои эти состоят не только из песка. Оттенки разных цветов им придаёт высокое содержание разных минеральных солей. Поэтому, когда камень намокает, он расширяется и «растёт». Увеличение размеров трованта связано с последовательной цементацией песка на его поверхности столетие за столетием, слой за слоем. Так и появляются новые трованты: сначала на поверхности глыбы появляется новый бугорок, увеличивается в размерах, а затем отпадает от материнского камня. Иллюстрация минералов представлена на рис. 8.

Попытки и результаты расщепления тровантов с помощью СВЧ говорят о том, что мы имеем дело с не описанным ранее геологическим процессом. В Румынии трованты используют в

качестве строительного и отделочного материала. Кроме того, на деревенских кладбищах юга страны шарообразные глыбы устанавливают в качестве памятников. Самые большие трованты под открытым небом достигают 10 метров в высоту. Камни, похожие на трованты, есть и в других местах планеты: в Казахстане, России и даже Лаосе. Они отличаются от румынских по химическому составу и цвету, но очень схожи своими свойствами [4]. Вот и ещё одна идея прикладного применения технологии СВЧ: расщепление камней и каменных пород с помощью микроволн. На рис. 9 представлена иллюстрация расщепления минерального состава камня под воздействием СВЧ.

Чтобы добиться успеха в гибридном нагреве, используются токоприёмники из материалов для микроволновой связи, таких как SiC, помогающие стабилизировать температурное поле и инициировать нагрев диэлектриков; последние соединяются (изменяют свою структуру – мгновенно спекаются) только при сверхвысоких температурах.

Мгновенное спекание посредством СВЧ-волн контролируется управлением электронного контроллера установки СВЧ. Для нагрева диоксида циркония используется система ПИД-регулирования и каскадная конфигурация с несколькими токоприёмниками, специально разработанная для гомогенизации температурного поля [3]. Нагрев индуцируется SiC-приёмниками, а флеш-гибридный нагрев образца обеспечивается плотными 3D-печатными приёмниками из диоксида циркония. Исследования



Рис. 8. Вид трованта – особого «размножающегося» минерального камня



Рис. 9. Иллюстрация расщепления минерального состава камня под воздействием СВЧ

микроволнового спекания путём увеличения ramпы нагрева проводились в лабораторных условиях. Данные по мощности микроволн в термическом цикле воздействия и относительной усадке представлены для экспериментов при температурном режиме 600, 750 и 900°С/мин. (воздействие соответствующей температурой в течение 1 минуты) на рис. 5. Рассеиваемая мощность лабораторной СВЧ-установки – в пределах 100 Вт при высокой скорости охлаждения материалов.

Мгновенное микроволновое спекание образцов материалов исследуют в лабораторных масштабах с использованием оригинальной каскадной стратегии (применяют устройства с несколькими токоприёмниками) [1, 3]. Несмотря на высокую температуру в ядре материала из-за объёмного СВЧ-нагрева, в результате получают и высокую стабильность гибридного нагрева. Причём разница температур внутри образца не оказывает существенного влияния на свойства материала, так как спекание посредством воздействия волн СВЧ происходит за очень короткое время – от доли секунд до минуты.

Что касается металлов, керамики, стекла, камня и даже пигментов, известных как холодные материалы, для них основной характеристикой является высокая отражательная способность солнечного света в видимом и инфракрасном диапазонах. Из новых разработок уместно привести в пример керамические пигменты с широким спектром поглощения тепла (красный, синий, розовый, жёлтый и др.). Уже разрабатываются керамические материалы для износостойких покрытий – черепица и даже плитка, элементы дорожного покрытия и, в частности, тротуара – с высокой видимой отражательной способностью, что

особенно востребовано в регионах с высокой солнечной активностью и бесснежными зимами. Именно там широко используются белые или цветные поверхности (плитка), состоящие из глиняной подложки с тонким слоем ангоба и внешним (поверхностным) слоем с высокой механической устойчивостью с добавлением «холодных» керамических пигментов. Ангобный слой содержит концентрации силиката циркония ($ZrSiO_4$) и производных циркония, обладающих высокой белизной для обеспечения высоких оптических свойств верхнего слоя.

Верхний слой – прозрачный, непрозрачный матовый или глянцевый – в основном состоит из стекла или стеклокерамического материала, известного как глазурь или эмаль. Для непрозрачных белых верхних слоёв основным компонентом является циркон из-за высокого показателя преломления (1,94–1,96), что приводит к высокой солнечной отражательной способности, составляющей около 80–90%. Поэтому циркон добавляют в виде нанометрических частиц в процессе кристаллизации во время обжига, когда верхний слой уже сформирован. Тогда образуются кристаллы в субмикрометровом диапазоне (малых размеров) сферической и/или игольчатой формы.

Из-за колебаний цен на цирконий для экономии производства отражающих материалов применяют метод «отбеливания». В последнее время шеелит признан стратегическим материалом для получения плиток с высокой белой поверхностью из-за высокого показателя преломления света (1,90–1,93) и особого характера кристаллизации в виде бипирамид менее 1 мкм. Шеелит легко кристаллизовать с помощью широкого спектра синтети-

ческих процедур, таких как химическое растворение, совместное осаждение, золь-гель, гидротермальный синтез, метод Чохральского и других. Однако доказано, что лучший метод получения бипирамидальных кристаллов заключается в зародышеобразовании-кристаллизации из матрицы кварцевого стекла, содержащего оксиды кальция и вольфрама. Тем не менее результаты свидетельствуют об отсутствии какой-либо композиционной тенденции. Оба стекла с близкими показателями преломления света (1,90–1,93 для шеелита и 1,94–1,96 для циркона) почти не изменяют свойства (характеристики), такие как цвет, блеск и SR, не зависят от концентрации SG, а это говорит о том, что оптические свойства в основном зависят от микроструктуры материалов.

Ещё один важный аспект. Под воздействием СВЧ-облучения наблюдается быстрое увеличение отражательной способности от УФ-видимой области до ближней ИК-области, причём в последней области отражательная способность материала, содержащего циркон и шеелит, остаётся практически постоянной. Чуть более высокая отражательная способность наблюдается у эмали марки 100Z, за которой следует 100S, что указывает на высокое рассеивание света из-за мелких кристаллических частиц в эмалях. С другой стороны, кривые отражения смешанных эмалей зависят от соотношения в материале «вставок» шеелит-циркон. Средние значения коэффициента отражения в УФ-, видимой и ближней ИК-областях находятся в том же диапазоне, что и у других циркониевых материалов. Поэтому приготовленные посредством СВЧ-облучения эмали имеют более высокую отражательную способность в видимой и

ближней инфракрасной областях, чем в УФ. Принимая во внимание, что БИК-область представляет более 50% всего энергетического спектра, такие эмали рекомендуют к использованию в зданиях для смягчения эффекта UHI.

Достигнутые результаты свидетельствуют о перспективных возможностях для смежных сфер: с помощью волн СВЧ можно не только изменять свойства материалов, но и достигать высококачественной полировки поверхности материалов и их отражательной способности. Более того, итоговый материал под воздействием СВЧ-излучения становится «закалённым» по отношению к внешним воздействиям. Для иллюстрации к проведённым исследованиям сообщается, что перед наблюдением образцы вырезались и полировались наждачной бумагой SiC зернистостью 1200. Для определения уровня белизны (цвета), прозрачности и отражательной способности полученного материала, а также характеристики шероховатости поверхности использовали оптический профилометр Zeta-20, Zeta Instruments. Параметр Ra (в микронах) уточняли путём нанесения 30 линий на поверхность участка материала площадью 30×30 мм² с разрешением 13 нм. Рентгеновские снимки получены с поверхности эмали дифрактометром Bruker D8 Advance с напряжением 40 кВ. Микроструктуру эмали наблюдали с помощью сканирующего электронного микроскопа FE-SEM, Hitachi 4700-S. Дополнительные возможности открываются в производстве материалов для РЭА и промышленности: керамических конструкций миниатюрных проходных фильтров для подавления электромагнитных помех в устройствах СВЧ-диапазона частот [2].

Заключение

У дальнейших исследований изменений свойств различных материалов под воздействием СВЧ есть большие перспективы. Так, высококачественные образцы однослойного нейтрального графена демонстрируют крайне высокое магнитосопротивление. Также обсуждаются гипотезы о том, что сопротивление зависит от индукции магнитного поля. Дираковская плазма по-разному чувствительна к электронно-дырочным рекомбинациям и, как следствие, к температуре. Для объяснения экспериментальных закономерностей нужны новые модели и разработ-

ки в области СВЧ-технологий. Также требуется решение проблемы распределения плотности СВЧ-энергии, то есть равномерного покрытия для воздействия в каждой точке камеры, особенно когда решается задача изменения свойств неоднородных материалов. Так, для производства двумерной формы циркония используют плоские электроды, сочетая роботизированное литьё с мгновенным спеканием. В результате получают плоские и стойкие к высокотемпературному воздействию формы и решётчатые структуры керамики разных свойств (к примеру, YSZ); твердотельные электролиты на основе оксидов – методом реактивного мгновенного воздействия. При совмещении мгновенного метода принудительной механической деформации материалов в условиях СВЧ-облучения (SPS-метод) разработчики уже получили 30-мм модели сложной конфигурации из диоксида циркония с субмикронной микроструктурой. Наглядным примером могут быть износостойкие шестерёнки как элементы электромеханических конструкций, рассчитанных на практически вечную работу. Преимущество метода состоит также и в том, что для трёхмерных сложных форм бесконтактный объёмный нагрев – лучшее решение для мгновенного изменения свойств оксидов.

В июне 2023 года в рамках Саммита дизайн-центров электроники технический директор АО «НИИЭТ» Игорь Семейкин представил доклад на тему «СВЧ и силовая ЭКБ на основе GaN, перспективные микроконтроллеры для гражданского рынка» в рамках кооперационной сессии «Российская ЭКБ и модули для гражданского рынка» [7]. Производство СВЧ-кристаллов, сборки ВЧ- и СВЧ-транзисторов, в том числе LDMOS, интегральных схем, а также испытаний ИС- и СВЧ-компонентов было в центре внимания специалистов и разработчиков РЭА. Выпускаемые на основе нитрида галлия (GaN) силовые и высокочастотные электронные компоненты разработаны по собственной (НИИЭТ) топологии и конструкции производства кристаллов нитрида галлия на кремнии (GaN-on-Si). Кроме того, уже реализован запуск некоторых GaN-приборов в серию по фаблесс-модели. Таким образом, можно говорить и о частичном импортозамещении некоторых электронных компонентов в рассматриваемой области.

Литература

1. Ян Дж., Ван З.-Х., Калун К.Э. Воздействие отражающих материалов на окружающую среду // *Energy Rev.*, 2015. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84926058911&origin=inward&txGid=186f1342a2b12564cd879280f0dd92f8>.
2. Джурицкий К. Миниатюрные помехоподавляющие фильтры СВЧ диапазона частот // *Современная электроника*. 2023. № 7 URL: <https://www.soel.ru/online/miniaturnye-pomekhopodavlyayushchie-filtry-svch-diapazona-chastot/>.
3. Журнал Европейского керамического общества. Т. 43, вып. 11, 9–2023. С. 5014–5025. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221923002820#fig0025>.
4. Живые камни – трованты // URL: https://emosurf.com/post/9595?utm_source=world&utm_medium=med0&utm_campaign=camp0&jump_tag_id=0.
5. Мгновенное спекание глинозёма: влияние различных условий эксплуатации на уплотнение // *Журнал Европейского керамического общества*. Т. 43, вып. 11. 2023. Сент. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0955221923002819>.
6. Муру К. и др. Стратегии Cool Surface (2022) // URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85124522483&origin=inward&txGid=42d74213d0381b8662875985957112e1>.
7. СВЧ и силовая ЭКБ на основе GaN, перспективные микроконтроллеры для гражданского рынка от АО «НИИЭТ» // URL: https://www.soel.ru/novosti/2023/svch_i_silovaya_ekb_na_osnove_gan_perspektivnye_mikrokontrollery_dlya_grazhdanskogo_rynka_ot_ao_niie/.
8. Факты об СВЧ-печах // URL: https://masterok.livejournal.com/8928722.html?utm_source=3userpost.
9. Ковтун В.А., Пасовец В.Н. Оптимизация технологических режимов процесса электроконтактного спекания наноструктурированных метаполимерных композиционных материалов // *Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого*. 2020. № 3/4. URL: <https://elib.gstu.by/bitstream/handle/220612/23893/24-33.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
10. Shear-Stress-Mediated Refolding of Proteins from Aggregates and Inclusion Bodies // URL: <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cbic.201402427>.
11. Understanding Ceramic Capacitors: types – MLCC, COG, X7R, Y5V, NP0, etc. // URL: <https://www.electronics-notes.com>.

