

УДК 546.46

## ПОЛУЧЕНИЕ, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОРОШКОВ ОКСИДА МАГНИЯ. ОБЗОР

© 2021 г. И. В. Козерожец<sup>а</sup>\*, Г. П. Панасюк<sup>а</sup>, Л. А. Азарова<sup>а</sup>, В. Н. Белан<sup>а</sup>, Е. А. Семенов<sup>а</sup>, И. Л. Ворошилов<sup>а</sup>, М. Н. Данчевская<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

<sup>б</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*e-mail: irina135714@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.06.2021 г.

После доработки 15.06.2021 г.

Принята к публикации 12.07.2021 г.

Обзор посвящен описанию основных методов синтеза, свойств наночастиц MgO и областей их применения, таких как создание покрытий трансформаторной и других типов сталей, покрытий на стекло с целью управления энергией пропускаемого солнечного излучения, создание прозрачной и полупрозрачной однокомпонентной керамики, создание многокомпонентных керамических композиций, в медицине для создания антибактериальных агентов и др. Рассмотрены основные методы получения нанокерамики MgO: спекание при низких температурах под высоким давлением, высокотемпературное спекание, SPS-метод, получение расплава MgO в плазме в охлаждаемом тигле с последующей раскristализацией и образованием плотной керамики. Показано, что вариации условий синтеза наноразмерных порошков MgO позволяют получать прекурсоры, которые при спекании образуют керамику с плотностью, близкой к теоретической.

*Ключевые слова:* нанопленка, нанокерамика, оксид магния, MgO, магнезия, SPS-метод, горячее прессование, покрытия

DOI: 10.31857/S004035712106004X

### ВВЕДЕНИЕ

Оксид магния (магнезия, MgO) является высокотемпературным оксидом (температура плавления оксида магния 2825°C). Более высокими температурами плавления обладают только вольфрам (3421°C) и карбид тантала (3880°C). Оксид магния существует в виде одной модификации — периклаз с кристаллической решеткой типа каменной соли. Высокая температура плавления лежит в основе широкого применения оксида магния в металлургии (шамотными кирпичами выкладывают внутренние стены печей) и строительстве (производство магнезиальных цементов) [1–7]. С развитием нанотехнологий для оксида магния, как и для других высокотемпературных соединений, наблюдается как увеличение спектра применений, так и увеличение КПД уже существующих применений [8–12]. Данный обзор направлен на обобщение и детализацию новых способов получения наноразмерного оксида магния, описание зависимости свойств синтезированных порошков от способа получения и выявление новых областей применения.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Тонкие пленки оксида магния применяют в производстве плазменных дисплеев, для защиты функционального диэлектрика от ультрафиолетовой радиации в плазме электрического разряда [13–20]. Однако производство тонкой оптически прозрачной пленки оксида магния осуществляется дорогостоящей вакуумной технологией. Технологическое оборудование для производства такой пленки стоит около 20 миллионов долл. США, при этом в сутки производится около 250–300 плат, что говорит о низкой окупаемости данного метода. Качественная вакуумная тонкая пленка оксида магния (толщина 400–500 нм) формируется только на ровных, плоских поверхностях с одинаковым и равным доступом для испаряемых электронной пушкой молекул MgO [16, 17]. Использование для защиты от ионной бомбардировки и ультрафиолетовой радиации в плазме нанопленок MgO (с толщиной от 20 нм), полученных альтернативными методами [13–17], значительно выгоднее и дешевле, так как процесс синтеза нанопленок MgO осуществляется на воздухе и не требует дорогостоящего оборудования. При этом использование оптически прозрачных нанопле-

нок MgO повышает эффективность электросветового преобразования на 30–60%, т.е. энергопотребление плазменных дисплеев может снизиться на 50%. Стоит отметить, что нанопленки MgO могут формироваться на искривлённых поверхностях любых форм и размеров. Таким образом, простота и экономичность синтеза нанопленок MgO позволяет рекомендовать их для применения в качестве солнечных элементов, натриево-магниевого лампы, элементов плазматрона, лакокрасочных покрытий, противонагревных покрытий на окна и стены, защиты от ультрафиолета и др. [15–20].

Согласно последним результатам [15, 16] КПД кремниевых солнечных элементов достигает 40.7%, что, прежде всего, связано с узким диапазоном воспринимаемого спектра солнечного излучения (оранжево-красный свет). По расчетам [15, 16] использование при создании солнечных элементов нанопленок MgO позволит увеличить КПД солнечных элементов до 50%.

Нанопленки MgO устойчивы по отношению к агрессивной среде, что позволяет применять их для защиты электродов, внутренней поверхности плазматрона, в качестве покрытий космических аппаратов, что, несомненно, увеличит срок службы дорогостоящего оборудования.

Годовое производство лакокрасочных материалов составляет около 30 миллионов тонн в год, однако под воздействием солнечного излучения лакокрасочные покрытия мутнеют и теряют свои исходные свойства. Согласно результатам работ [11, 12] избежать этого можно путем добавления в исходную смесь небольших количеств наноразмерного MgO.

Использование нанопленок MgO в качестве покрытий на стекла позволит не только отражать солнечное излучение, но и преобразовывать ультрафиолетовые лучи в видимый свет, что позволит избежать чрезмерного перегрева помещений [17].

В работе [10] описана оригинальная идея борьбы с увеличением содержания парниковых газов в атмосфере и потеплением климата. Предлагается распылять наноразмерные частицы порошка MgO в атмосфере. Эти частицы будут отражать солнечную радиацию и преобразовывать ультрафиолетовые лучи в видимые, последующее взаимодействие MgO с молекулами воды и углекислым газом приводит к формированию гидроксида и карбоната магния, что позволяет вывести избыток углекислого газа из атмосферы.

В работе [21] синтезированы наноразмерные порошки MgO в диапазоне размеров частиц 10–20 нм с использованием метода осаждения гидроксида магния с последующим прогревом при 550°C в течение 4 ч. Авторы показали, что реакционная способность и скорость адсорбции по отношению к CO и CO<sub>2</sub> наноразмерного порошка

MgO более высока, чем порошка MgO с микронными размерами частиц, за счет более высокой удельной площади поверхности и большего количества координационно ненасыщенных краевых/угловых участков поверхности MgO, а также дефектных участков, которые более активны по отношению к адсорбатам (CO и CO<sub>2</sub>).

В работе [22] рассмотрено получение наноразмерного порошка оксида магния в качестве изоляционного покрытия трансформаторной стали. Трансформаторная сталь – это сплав железа с кремнием, иногда легированный алюминием. Существенным недостатком сталей данного класса является их низкая коррозионная стойкость в условиях атмосферной влажности. Для повышения коррозионной стойкости необходима химико-термическая обработка сталей, формирующая покрытия, устойчивые к воздействию окружающей среды без ухудшения свойств стали. Сущность покрытий – создание на поверхности металла слоя оксидов, которые обладают большей коррозионной стойкостью по сравнению с металлом. Нанесение покрытий может осуществляться как из газовой фазы, так и из раствора. Перспективными являются оксидные покрытия на основе MgO. Для этой цели предложена экологически чистая плазменная технология, сущность которой заключается в растворении в азотной кислоте пылевых отходов, образующихся при электроплавке брусита в производстве огнеупорных материалов, с последующей очисткой раствора от примесей, выделении чистого кристаллогидрата нитрата магния и его термическом разложении диспергированием в плазменной дуге до оксида магния с последующим напылением на поверхность металла. Образующиеся при разложении нитрата магния нитрозные газы поступают на регенерацию азотной кислоты. Таким образом, цикл производства наноразмерного MgO является полностью замкнутым, экологически безопасным и обеспечивает производство наноразмерных частиц в широком диапазоне свойств.

В основу патента [23] положен способ получения электроизоляционного покрытия трансформаторной стали на основе MgO, сущность которого состоит в нанесении покрытия на трансформаторную сталь методом окунания или распыления с последующей термообработкой в азотоводородной атмосфере при 750–850°C. Для распыления/окунания используется суспензия следующего состава: тальк (Mg<sub>3</sub>[Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>](OH)<sub>2</sub>) или нефелин (Na<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) – 15 мас. %, борная кислота (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) – 5 мас. %, ортофосфорная кислота (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) – 8 мас. %, вода – 72 мас. %.

В работе [24] рассмотрен золь-гель метод получения тонких пленок MgO, легированных ZnO на подложках из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Тонкие пленки MgO, легированные ZnO, получали путем окунания подложек

из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в полимерный золь, состоящий из смеси изопропилового спирта, дистиллированной воды, гексагидрата нитрата магния, гексагидрата нитрата цинка и ацетилацетона. Процесс погружения, извлечения и сушки повторяли 6 раз для получения подходящей толщины покрытия, а затем образцы спекали при 400 и 600°C в течение 6 ч со скоростью нагрева 3°C/мин. Наблюдалось увеличение термостабильности MgO с увеличением процента легирования ZnO. Увеличение процента легирования ZnO показало заметное уменьшение среднего размера частиц порошка MgO в результате замены некоторого количества  $\text{Mg}^{2+}$  на  $\text{Zn}^{2+}$ , который имеет такой же ионный радиус, как и  $\text{Mg}^{2+}$ . Уменьшение размера частиц MgO также было связано с уменьшением степени кристалличности MgO. Увеличение легирования ZnO также показало заметное снижение значений толщины покрытия.

Удельная площадь поверхности полученных порошков и размер частиц представлены в табл. 1.

В работе [25] представлена методика, позволяющая синтезировать наноразмерные защитные покрытия MgO толщиной 10–15 нм на стеклянных поверхностях. Сущность методики заключается в распылении водных или водно-спиртовых растворов нитрата магния с последующей термообработкой при температурах 500–560°C. Согласно представленным в работе [25] результатам средний размер кристаллов MgO в образцах равен 17 нм, следовательно, разложение кристаллов нитрата магния и кристаллизация MgO происходит на наноразмерном уровне без заметного роста частиц. Измерения спектров пропускания показали, что образцы стекла, покрытые MgO, обладают высокой прозрачностью в видимом диапазоне 450–700 нм.

Применение MgO в медицине, прежде всего, связано со способностью Mg активировать ферментативную деятельность организма, поэтому MgO используют в качестве компонента многих лекарств. Основными заболеваниями, при которых используются соединения магния, являются синдром дефицита внимания, стенокардия, аритмия сердца, астма, хроническая обструктивная болезнь легких, высокое артериальное давление, диабет, камни в почках.

В работе [26] оценивалась антибактериальная активность наночастиц MgO в отношении *Lactobacillus plantarum*. При увеличении концентрации до  $1000 \text{ млн}^{-1}$  и времени воздействия частиц MgO на *Lactobacillus plantarum* до 24 ч наблюдается практически полное обеззараживание растворов. Наноразмерные частицы MgO для этих целей были получены следующим методом: смесь гексагидрата нитрата магния, карбоната натрия и этиленгликоля обрабатывалась ультразвуком с последующим прокаливанием при температуре 410°C в

**Таблица 1.** Значения удельной площади поверхности и размера частиц тонких пленок MgO, легированных ZnO на подложках из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , термически обработанных при 600°C в течение 6 ч [24]

Номер образца	Удельная площадь поверхности, $\text{м}^2/\text{г}$	Размер частиц, нм
1	26.56	63.0
2	74.37	22.4
3	106.70	15.0
4	121.54	13.0

течение разного промежутка времени. Этим методом был синтезирован монофазный образец MgO, размеры кристаллов, рассчитанные по формуле Дебая–Шеррера, составили около 14 нм.

Высокая температура плавления, относительно низкая температура спекания, хорошие эксплуатационные характеристики изделий из MgO определили их широкое применение. При изготовлении керамических и огнеупорных изделий из MgO традиционными методами являются: метод прессования, литье под давлением горячих шликеров, гидростатическое прессование, литье из щелочных водных суспензий и др. Перед формованием будущего изделия порошок MgO необходимо предварительно отжечь при температурах 1000–1300°C для удаления молекул воды, углекислого газа и других возможных примесей из структуры MgO, затем тонко измельчить сухим способом в вибрационных мельницах. Температура спекания керамических изделий из MgO составляет 1700–1750°C, для снижения температуры спекания и достижения более высокой плотности часто используют различные добавки оксидов, которые с MgO образуют твердые растворы. Согласно работам наиболее эффективными для решения этих задач являются добавки  $\text{TiO}_2$  и  $\text{ZrO}_2$ . Так, введение в порошок MgO до 0.2 мас. %  $\text{ZrO}_2$  позволяет достигнуть теоретической плотности уже при 1320°C с выдержкой в 1.5 ч. Казалось бы, высокая температура плавления (2825°C) и низкая температура спекания (1700–1750°C) керамических изделий, широкое распространение в природе соединений магния позволяют широко использовать изделия из MgO при самых высоких температурах, но трудность заключается в высокой гидратации и повышенной летучести MgO. Практически применимая температура для керамических изделий на основе MgO в атмосферных условиях – 2000–2200°C, в вакууме – 1700°C. За счет высокого коэффициента расширения, а следовательно, низкой термостойкости и небольшой теплопроводности при резком охлаждении керамические изделия из MgO выдерживают в 5–10 раз меньше теплосмен, чем такого же объема и формы керамика на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и в 50–100 раз мень-

ше, чем подобная керамика из  $\text{BeO}$ . При увеличении рабочей температуры до  $2000^\circ\text{C}$  возможно испарение до 40 мас. %  $\text{MgO}$ .

Однако в настоящее время большое число исследователей [27–32] стали уделять внимание синтезу прозрачной поликристаллической керамики на основе  $\text{MgO}$  за счет ее уникальных свойств: механическая прочность, сопротивление тепловому удару, химическая стабильность и др. Область ее применения довольно широка: экраны, авиационные окна, твердотельные лазерные материалы, обтекатели для ракет, прозрачная керамическая броня и др. Прозрачную поликристаллическую керамику на основе  $\text{MgO}$  можно получать из наноразмерных порошков  $\text{MgO}$  как традиционными методами, например спеканием горячим прессованием [29–31], так и спеканием без давления или спеканием в вакууме [28, 32, 33], а также методом SPS [34–37] и др.

В работе [35] описан процесс синтеза прозрачной керамики при спекании без давления при  $1600^\circ\text{C}$  в течение 2 ч порошка  $\text{MgO}$  со средним размером частиц 60 нм, при этом средний размер зерна готовой керамики равен 35 мкм. Согласно работе [36] получение полупрозрачной керамики возможно при спекании без давления при  $1400^\circ\text{C}$  в течение 2 ч порошка  $\text{MgO}$  со средним размером 20 нм и средним размером зерна готовой керамики около 6 мкм. Таким образом, при уменьшении размера частиц порошка  $\text{MgO}$  наблюдается снижение температуры спекания, что имеет большое значение с экономической точки зрения. Однако ряд авторов нацелены на дальнейшее снижение температуры спекания за счет комплексного использования возможностей прессования и качества исходных порошков  $\text{MgO}$ . Так, в работе [30] описано получение полупрозрачной керамики  $\text{MgO}$  при  $1100^\circ\text{C}$  в течение 1 ч с использованием горячего прессования наноразмерного порошка  $\text{MgO}$  со средним размером 44 нм. Средний размер зерна готовой керамики при этом равен около 2 мкм.

В настоящее время большую популярность набирает искровое плазменное спекание (SPS) как передовой метод за счет высокой скорости уплотнения и короткого времени спекания [34–37]. Так, в работе [37] описано получение прозрачной керамики  $\text{MgO}$  по методу SPS при температуре  $800^\circ\text{C}$  и давлении 150 МПа в течение 5 мин из нанокристаллических порошков со средним размером частиц 52 нм. Стоит отметить, что такое давление является довольно высоким, что вызывает трудности в реализации его в производстве. Авторы работы [38] синтезировали прозрачную керамику  $\text{MgO}$  методом SPS при температуре  $900^\circ\text{C}$  и давлении 30 МПа в течение 5 мин из наноразмерных порошков  $\text{MgO}$  со средним размером частиц 30 нм с использованием спекающей добавки  $\text{LiF}$

(до 1 мас. %). Таким образом, исследование возможных спекающих добавок для синтеза прозрачной керамики на основе  $\text{MgO}$  является актуальной задачей, так как позволяет понизить температуру и давление при спекании.

Применение наноразмерных порошков для снижения температуры спекания при производстве прозрачной керамики  $\text{MgO}$  является довольно интересной задачей, однако для наноразмерных порошков характерна высокая степень агломерации за счет высокой удельной площади поверхности и масштабирование процесса синтеза нанопорошков  $\text{MgO}$  может быть довольно затруднительно.

В работе [39] описан способ синтеза прозрачной керамики на основе  $\text{MgO}$  из самостоятельно синтезированных порошков, полученных по методу осаждения из ацетата магния и щавелевой кислоты с последующей сушкой при  $100^\circ\text{C}$  и прокаливанием при температурах до  $500^\circ\text{C}$ . Удельная площадь поверхности для синтезированных порошков колеблется в диапазоне  $138\text{--}242\text{ м}^2/\text{г}$ , а средний размер частиц  $16\text{--}23\text{ нм}$ . Синтезированный наноразмерный порошок  $\text{MgO}$  без каких-либо специальных добавок подвергался искровому плазменному спеканию при низких температурах  $700\text{--}900^\circ\text{C}$ , со временем выдержки 5 мин и давлением 50 МПа. Во всем диапазоне температур была получена прозрачная керамика  $\text{MgO}$ , однако самый высокий коэффициент пропускания в 60% (800 нм) и максимальная теплопроводность в  $48.4\text{ Вт}/(\text{м К})$  были достигнуты при термической обработке при  $860^\circ\text{C}$ . Максимальная твердость, трещиностойкость, прочность и модуль Юнга для керамики  $\text{MgO}$  могут достигать следующих значений: 8.25 ГПа, 2.01 МПа  $\text{м}^{0.5}$ , 206 МПа и 286 ГПа.

В работе [40] методом SPS из наноразмерного порошка  $\text{MgO}$  с размером частиц 25 нм, удельной площадью поверхности  $60\text{ м}^2/\text{г}$  и чистотой 99.6 мас. % основного вещества при температуре  $1600^\circ\text{C}$  и давлении 40 МПа со скоростью нагрева  $100^\circ\text{C}/\text{мин}$  синтезирована плотная, с размером зерен порядка 10 мкм, прочная керамика с микротвердостью до 13 ГПа.

В работе [38] описана оригинальная методика изготовления полупрозрачной керамики  $\text{MgO}$  методом горячего прессования с последующим отжигом синтезированных образцов. В качестве исходного сырья использовался наноразмерный порошок  $\text{MgO}$  с 2–4 мас. % добавками  $\text{LiF}$ . При этом удельная площадь поверхности порошка  $\text{MgO}$  составила  $75\text{ м}^2/\text{г}$ , что указывает на достаточно высокую степень агломерации. Горячее прессование осуществлялось при  $1100^\circ\text{C}$  в инертной среде ( $\text{Ar}$ ) или в вакууме при 24–45 МПа в течение 30–60 мин. Согласно данным работы [38]  $\text{LiF}$  играет важное значение в получении именно прозрачной

ной керамики, вероятно за счет увеличения диффузии, а следовательно, ее уплотнения. Для синтеза прозрачной керамики MgO необходимо полное удаление LiF после спекания.

В работе [34] исследовано влияние концентраций спекающей добавки LiF и условий синтеза методом SPS на оптическую прозрачность и микроструктуру керамики из MgO. Экспериментально показано, что добавка LiF способствует быстрому росту зерна керамики на основе MgO, также выявлена зависимость прозрачности керамики от скорости нагрева и температуры. Оптимальными характеристиками обладает керамика, синтезированная при 900°C в течение 5 мин со скоростью нагрева 100°C/мин и давлением 30 МПа из порошков с 1 мас. % LiF, средний коэффициент пропускания составлял 85%, а средний размер зерна – 0.7 мкм. Максимальная плотность составляла 99.2% от теоретической.

Работа [41] посвящена исследованию влияния хлорид-ионов на свойства высокопрозрачной керамики на основе MgO. В работе описана оригинальная методика, позволяющая избежать агломерации наноразмерных порошков MgO. В основе этой методики лежит получение основной соли карбоната магния путем осаждения из растворов хлорида магния и карбоната натрия. Последующее прокаливание при 900°C в течение 4 ч позволяет получить неагломерированные частицы MgO за счет их легирования хлорид-ионом. Спекание при 1600°C в течение 3 ч в кислородной атмосфере позволило получить высокопрозрачную керамику на основе MgO.

В работе [39] представлены результаты исследования влияния холодного изостатического прессования порошка MgO на свойства керамики. Высокодисперсный MgO с чистотой 99.7% был получен обжигом гидрокарбоната магния при 1200°C, затем его прессовали под давлением 0.3 и 2.0 ГПа и спекали при 1600°C в течение 1–4 ч. Показано, что при давлении 0.3 и 2.0 ГПа относительная плотность синтезированной керамики составляет 65 и 80%, а прочность на сжатие 10 и 55 МПа соответственно. Таким образом, прессование под более высоким давлением позволяет получить керамику со сравнительно однородной структурой и высокой плотностью за счет механически активированных частиц.

В работе [42] описан синтез высокопрозрачной керамики MgO методом плазменной дуговой плавки. Коммерческий порошок MgO (чистота 99.9 мас. %) дробили в шаровой мельнице в этаноле, затем сушили при 85°C в течение 4.5 ч с последующей формовкой путем двухосного прессования под давлением 80 МПа. Плавление осуществлялось в дуговой печи в среде аргона. Общее время пребывания образцов в жидкой фазе составило около 0.5 мин. Затем образцы охлаждались со

скоростью 20°C/с. Синтезированная керамика обладает плотностью 99.8 мас. %, практически не содержит пор, размер зерен при этом около 30 мкм, коэффициент светопропускания 75% в широком диапазоне волн 400–1100 нм, что позволяет рекомендовать данный продукт в качестве окон.

Работа [43] посвящена синтезу высокодисперсного MgO методом автоклавной сверхкритической сушки с последующей термообработкой при 500°C в вакууме. При этом были синтезированы порошки с удельной площадью поверхности до 500 м<sup>2</sup>/г и с размером кристаллитов около 45 Å, что является достаточно интересным результатом в области синтеза порошков MgO с заданными свойствами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обзор литературных данных по методам получения, свойствам и применению наноразмерных порошков MgO показывает, что к настоящему времени разработаны методы получения наноразмерных порошков MgO в широком диапазоне размеров частиц от 5 нм. Полученные порошки активно используются в различных областях современной техники и медицине. Однако почти во всех случаях в порошках фиксируется ассоциация частиц, отрицательно влияющая на качество получаемых конечных продуктов. Традиционная ультразвуковая обработка с применением ПАВ не всегда позволяет достичь необходимой степени диспергирования наноразмерных частиц. В связи с этим представляют большой интерес работы по получению неассоциированных наноразмерных порошков MgO. Использование неассоциированных частиц для последующего спекания позволяет снизить температуру спекания на воздухе при нормальном давлении до 1400°C с получением нанокерамики с плотностью, близкой к теоретической, что позволит значительно расширить область ее применения. Особый интерес представляют работы по получению антибактериального агента MgO с узкой кривой распределения по размерам частиц с максимумом размера частиц 15 нм.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОНХ РАН в области фундаментальных научных исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang Y.X., Li H.R., Liu S.Y. et al. Raman spectroscopic study of irregular network in the process of glass conversion to CaO–MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> glass-ceramics // J. Non-Cryst. Solids. 2021. V. 563. Article number 120701. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.120701>
2. Li H.C., Wang D.G., Hu C. et al. Microstructure, mechanical and biological properties of laser cladding de-

- rived CaO–SiO<sub>2</sub>–MgO system ceramic coatings on titanium alloys // *Appl. Surf. Sci.* 2021. V. 548. Article number 149296.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149296>
3. Wang X., Chen Y., Ding J. et al. Influence of ceramic phase content and its morphology on mechanical properties of MgO–C refractories under high temperature nitriding // *Ceram. Int.* 2021. V. 47. № 8. P. 10603.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.172>
  4. Zhou M.K., Tang B., Xiong Z. et al. Effects of MgO doping on microwave dielectric properties of yttrium aluminum garnet ceramics // *J. Alloys Compd.* 2021. V. 858. Article number 158139.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158139>
  5. Takahashi E., Takahashi T., Tatami J. Room-temperature densification of MgO bulk ceramics with dispersed nitride phosphor particles // *Ceram. Int.* 2021. V. 47. № 4. P. 5013.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.10.077>
  6. Golosov O.A., Khvostov S.S., Glushkova N.V. et al. Corrosive and mechanical resistance of MgO ceramics under metallizing and mild chlorination of spent nuclear fuel in molten salts // *Ceram. Int.* 2021. V. 47. № 3. P. 3306.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.171>
  7. Attia M.A.A., Ewais E.M.M. Hot Pressed Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Ceramics Using MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as Sintering Additive for Vehicle Engine Parts // *Refract. Ind. Ceram.* 2020. V. 61. № 4. P. 384.  
<https://doi.org/10.1007/s11148-020-00490-4>
  8. Tang S.Y., Yang L., Liu X.W. et al. Direct ink writing additive manufacturing of porous alumina-based ceramic cores modified with nanosized MgO // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2020. V. 40. № 15. P. 5758.  
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.07.058>
  9. Popov Yu.V., Mokhov V.M., Nebykov D.N. et al. Colloidal and Nanosized Catalysts in Organic Synthesis: XXIV. Study of Hydrogenation of Furan and Its Derivatives in the Presence of MgO-Supported Nickel and Cobalt Nanoparticles // *Russ. J. Gen. Chem.* 2020. V. 90. № 6. P. 931.  
<https://doi.org/10.1134/S1070363220060018>
  10. Halawy S.A., Mohamed M.A., El-Nahas S. A prolonged evaluation of air contamination level with CO<sub>2</sub> in a college student's laboratory using nanosized MgO // *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2020 V. 17. № 3. P. 1551.  
<https://doi.org/10.1007/s13762-019-02584-0>
  11. Abaszadeh M., Seifi M., Asadipour A. Nanosized MgO as a Heterogeneous Base Catalysts, Catalyses Multi-component Reaction of Cyclic Enaminoketones, Malononitrile, and Aromatic Aldehydes // *Synth. React. Inorg., Met.-Org., Nano-Met. Chem.* 2016. V. 46. № 4. P. 512.  
<https://doi.org/10.1080/15533174.2014.988812>
  12. Todan L., Dascalescu T., Preda S. et al. Porous nanosized oxide powders in the MgO–TiO<sub>2</sub> binary system obtained by sol-gel method // *Ceram. Int.* 2014. V. 40. № 10. P. 15693.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.07.092>
  13. Aneur I., Boudine B., Laidoudi M. et al. Influence of magnesium doping on microstructure, optical and photocatalytic activity of zinc oxide thin films synthesis by sol-gel route // *Appl. Phys. A.* 2021. V. 127. № 5. P. 331.  
<https://doi.org/10.1007/s00339-021-04486-w>
  14. Yang C.C., Chen K.Y., Yeh W.S. et al. Ultraviolet Photo-detection Application in Magnesium Indium Oxide Thin Film Transistors via Co-Sputtering Deposition // *Appl. Sci.* 2020. V. 10. № 15. P. 5128.  
<https://doi.org/10.3390/app10155128>
  15. Idris M.S., Subramani S. Performance of 9.0 W light-emitting diode on various layers of magnesium oxide thin film thermal interface material // *Appl. Phys. A.* 2020. V. 126. № 8. P. 646.  
<https://doi.org/10.1007/s00339-020-03820-y>
  16. Kang W.G., Choi B.J., Han J.H. Growth characteristics and film properties of plasma-enhanced and thermal atomic-layer-deposited magnesium oxide thin films prepared using bis (ethylcyclopentadienyl) magnesium precursor // *Ceram. Int.* 2020. V. 46. № 8. P. 10115.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.01.001>
  17. Idris M.S., Shanmugan S., Devarajan M. et al. Heat transfer enhancement in light-emitting diode packaging employing different molar concentration of magnesium oxide thin films as a heat spreader // *Int. J. Energy Res.* 2020. V. 44. № 12. P. 9527.  
<https://doi.org/10.1002/er.5175>
  18. Khaleel W.A., Sadeq S.A., Alani I.A.M. et al. Magnesium oxide (MgO) thin film as saturable absorber for passively mode locked erbium-doped fiber laser // *Opt. Laser Technol.* 2019. V. 115. P. 331.  
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.02.042>
  19. Amuthasurabi M., Chandradass J., Park S.J. et al. Fabrication of thin film transistor using magnesium zinc oxide (MgZnO) as a semiconductor layer by magnetron sputtering technique // *J. Ceram. Process. Res.* 2019. V. 20. № 1. P. 95.
  20. Ghani M., Ghoreishi S.M., Azamati M. Magnesium-aluminum-layered double hydroxide-graphene oxide composite mixed-matrix membrane for the thin-film microextraction of diclofenac in biological fluids // *J. Chromatogr. A.* 2018. V. 1575. P. 11.  
<https://doi.org/10.1016/j.chroma.2018.09.024>
  21. Khairallah F., Glisenti A. Synthesis, characterization and reactivity study of nanoscale magnesium oxide // *J. Mol. Catal. A: Chem.* 2007. V. 274. № 1–2. P. 137.  
<https://doi.org/10.1016/j.molcata.2007.04.039>
  22. Sokol V.A., Yaroshenko A.M., Bromberg A.V. Heat-treatment influence on the magnesium-oxide properties used for transformer steel // *Khim. Prom-st.* 1985. № 11. P. 646.
  23. Гончаров А.И., Гончарова А.К. Способ получения электроизоляционного покрытия трансформаторной стали. Патент 2463384 РФ // Изобрет. Полезн. модели. 2012. № 28.
  24. Labib S. Synthesis of Doped and non-Doped Nano MgO Ceramic Membranes // *Sultan Qaboos Univ. J. Sci.* 2013. V. 18. P. 25.  
<https://doi.org/10.24200/squjs.vol18iss0pp25-32>
  25. Dukel'skiĭ K.V., Evstrop'ev S.K. Forming nanosize MgO coatings on a glass surface // *J. Opt. Technol.* 2010. V. 77. № 1. P. 45.  
<https://doi.org/10.1364/JOT.77.000045>
  26. Tang Z.X., Fang X.J., Zhang Z.L. et al. Nanosize MgO as antibacterial agent: preparation and characteristics //

- Braz. J. Chem. Eng. 2012. V. 29. № 4. P. 775.  
<https://doi.org/10.1590/S0104-66322012000400009>
27. *Daniel C.H.* Durable 3–5  $\mu\text{m}$  transmitting infrared window materials // *Infrared Phys. Technol.* 1998. V. 39. № 4. P. 185.  
[https://doi.org/10.1016/S1350-4495\(98\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S1350-4495(98)00006-1)
28. *Harris D.C.* Materials for Infrared Windows and Domes: Properties and Performance (SPIE Press Monograph. V. PM70). Bellingham, Wash.: SPIE—The International Society for Optical Engineering, 1999.
29. *Liu J.H., Fu Z.Y., Wang W.M. et al.* Ultra-high heating rate densification of nanocrystalline magnesia at high pressure and investigation on densification mechanisms // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2014. V. 34. № 12. P. 3095.  
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.04.004>
30. *Itatani K., Yasuda R., Howell F.S. et al.* Effect of starting particle size on hot-pressing of magnesium oxide powder prepared by vapour-phase oxidation process // *J. Mater. Sci.* 1997. V. 32. № 11. P. 2977.  
<https://doi.org/10.1023/A:1018649222749>
31. *Itatani K., Tsujimoto T., Kishimoto A.* Thermal and optical properties of transparent magnesium oxide ceramics fabricated by post hot-isostatic pressing // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2006. V. 26. № 4–5. P. 639.  
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2005.06.011>
32. *Ikegami T., Matsuda S.-I., Suzuki H.* Effect of halide dopants on fabrication of transparent polycrystalline MgO // *J. Am. Ceram. Soc.* 1974. V. 57. № 11. P. 507.
33. *Varela J.A., Whittemore O.J.* Structural rearrangement during the sintering of MgO // *J. Am. Ceram. Soc.* 1983. V. 66. № 1. P. 77.  
<https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1983.tb09973.x>
34. *Jiang N., Xie R.J., Liu Q. et al.* Fabrication of sub-micrometer MgO transparent ceramics by spark plasma sintering // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2017. V. 37. № 15. P. 4947.  
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.06.021>
35. *Misawa T., Moriyoshi Y., Yajima Y. et al.* Effect of silica and boron oxide on transparency of magnesia ceramics // *J. Ceram. Soc. Jpn.* 1999. V. 107. P. 343.
36. *Chen D.Y., Jordan E.H., Gell M.* Pressureless sintering of translucent MgO ceramics // *Scr. Mater.* 2008. V. 59. № 7. P. 757.  
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.06.007>
37. *Chaim R., Shen Z.J., Nygren M.* Transparent nanocrystalline MgO by rapid and low-temperature spark plasma sintering // *J. Mater. Res. Technol.* 2004. V. 19. № 9. P. 2527.  
<https://doi.org/10.1557/JMR.2004.0334>
38. *Fang Y., Agrawal D., Skandan G. et al.* Fabrication of translucent MgO ceramics using nanopowders // *Mater. Lett.* 2004. V. 58. № 5. P. 551.  
[https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00560-3](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00560-3)
39. *Akimov G.Y., Storozh V.V.* Formation of properties of ceramics from MgO powders obtained with the use of cold isostatic pressing // *Refract. Ind. Ceram.* 1999. V. 40. № 1–2. P. 48.  
<https://doi.org/10.1007/BF02762445>
40. *Лысенко В.* Керамика из нанопорошка оксида магния: создание и свойства // *Наноиндустрия.* 2016. Т. 64. № 2. С. 94.
41. *Suzuki M., Ikegami T., Yokoyama M. et al.* Effects of chloride ion on densification transparency magnesia ceramics // *J. Ceram. Soc. Jpn.* 2005. V. 113. № 1314. P. 149.  
<https://doi.org/10.2109/jcersj.113.149>
42. *Kruk A.* Fabrication of MgO high transparent ceramics by arc plasma synthesis // *Opt. Mater.* 2018. V. 84. P. 360.  
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.07.001>
43. *Utamapanya S., Klabunde K.J., Schlup J.R.* Nanoscale metal oxide particles/clusters as chemical reagents. Synthesis and properties of ultrahigh surface area magnesium hydroxide and magnesium oxide // *Chem. Mater.* 1991. V. 3. № 1. P. 175.  
<https://doi.org/10.1021/cm00013a036>