Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской Академии наук

Ежикова Екатерина Владимировна

Ведущий инженер (аспирант)

Состояние и перспективы разработки в России высококачественной лазерной керамики.

17.09.2026 г. Обнинск

Прозрачная керамика

Прозрачная керамика — поликристаллический оптический материал, сочетающий преимущества монокристаллов и стекол: возможность масштабирования, формования сложных изделий и введения активаторов при сохранении высокой оптической однородности.

Материал	Технологические особенности	Оптические характеристики
монокристалл	Сложная и дорогая технология, низкая производительность, большие временные и трудозатраты, проблемы масштабирования, ограничения по температуре, необходимость формирования изделий механической обработкой.	Высокое оптическое качество, однородность, отсутствие светорассеяния в объеме кристалла, необходимость кристаллографической ориентации для ряда кристаллов.
стекло	Высокая производительность, возможность масштабирования, низкая стоимость, ограничения по температуре, необходимость формирования изделий механической обработкой	Высокое оптическое качество, однородность, отсутствие светорассеяния в объеме, изотропность.
Прозрачная керамика	Высокая производительность, возможность масштабирования, возможность формирования изделий в процессе синтеза, возможность получения материалов с градиентом концентрации легирующих примесей, возможность получения материалов с высокой температурой плавления	Высокое оптическое качество, однородность, изотропность.

ПРИМЕРЫ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В ВИДЕ ПРОЗРАЧНОЙ КЕРАМИКИ

Химическая формула	Кристалличес-кая структура	Молекуляр-ный вес	Плотность г/см^3	Тпл, ^{o}C	Теплопро-водность, Вт/м.К
Al_2O_3	кубический	101.69	3.60	**2054**	42
MgO	кубическая	40.30	3.59	**2852**	58
ZrO_2	Моноклинная	123,22	5.8-6	**2680**	2-3
	тетрагональная				
	кубическая				
Y_2O_3	кубическая	225.81	5.01	**2430**	27
Sc_2O_3	кубическая	138.20	3.86	**2403**	16,5-17
Lu_2O_3	кубическая	397.93	9.42	**2510**	12,5
$Y_3Al_5O_{12}$	кубическая	593.70	4.55	**1950**	10
$MgAl_2O_4$	кубическая	142.26	3.60	**2250**	8,5

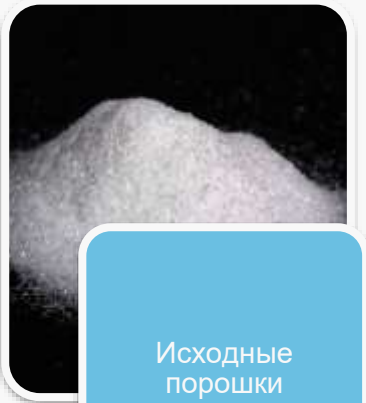
Из-за высоких температур плавления в виде крупных монокристаллов получены только соединения Al_2O_3 (методы Вернейля, Мусатова), $Y_3Al_5O_{12}$ (метод Чохральского), ZrO_2 (метод направленной кристаллизации в холодном контейнере).

В отличие от конструкционной керамики для оптической керамики более строгими являются требования высокой плотности и чистоты исходных материалов.

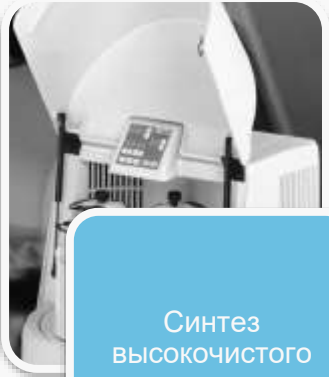
Материалы и области применения

Материал или семейство	Основные достоинства	Применение
MgAl2_22O4_44, прозрачный шпинель	Твердость, низкая плотность, термостойкость, широкое ИК-пропускание	ИК-окна, обтекатели, защитное остекление, оптика
AlON	Кубическая структура, высокая твердость, химическая стойкость, широкое спектральное окно	Прозрачная броня, окна сенсоров, авиационно-космическая оптика
YAG и Y2O3Y_2O_3Y2O3	Высокая оптическая однородность, возможность легирования редкоземельными ионами	Лазерные активные элементы, сцинтилляторы, люминофоры
Lu2O3Lu_2O_3Lu2O3, GGAG, GAGG	Высокая плотность и эффективное взаимодействие с рентгеновским и гамма-излучением	Сцинтилляторы, медицинская визуализация
TGG, TAG, оксиды тербия	Эффект Фарадея, высокие постоянные Верде	Магнитооптические изоляторы и циркуляторы
CaF2_22, SrF2_22, BaF2_22	Низкое оптическое поглощение, перспективность для лазеров	Лазерные усилители и оптические элементы
PMN–PT, PLZT, KNN	Сочетание прозрачности с пьезоэлектрическими и электрооптическими свойствами	Модуляторы, оптические затворы, датчики, фотоакустика
Прозрачные люминофорные керамики	Высокая теплопроводность и устойчивость к интенсивному излучению	Лазерное освещение, фары, проекторы, дисплеи

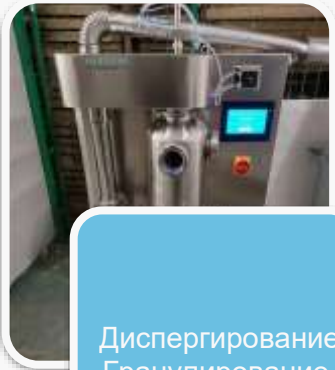
Общая технологическая схема получения



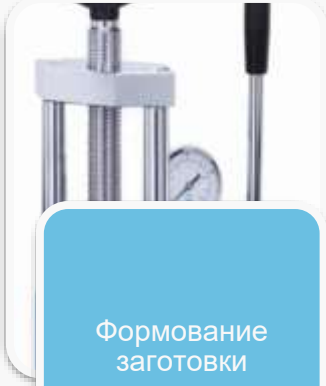
Исходные порошки



Синтез высокочистого порошка



Диспергирование
Гранулирование



Формование заготовки



Сушка и удаление органических компонентов.

Спекание и уплотнение.



Горячее изостатическое прессование или другой постпроцессинг.



Отжиг для удаления окрашивающих дефектов.



Оптическая, механическая и структурная аттестация

СИНТЕЗ ПОРОШКОВ ДЛЯ ПРОЗРАЧНОЙ КЕРАМИКИ

Метод синтеза определяет дисперсность, чистоту, агломерацию и способность порошка к уплотнению

МЕТОДЫ СИНТЕЗА

- Твердофазный синтез
- Соосаждение
- Золь-гель-технологии
- Гидротермальный синтез
- Микроволновое гомогенное осаждение
- Механохимическая активация
- Лазерная абляция

УПРАВЛЕНИЕ СВОЙСТВАМИ ПОРОШКА

- **Размер частиц нанометровый диапазон**
- **Дисперсность узкое распределение**
- **Чистота минимум примесей**
- **Агломерация контролируемая или минимальная**

НАНОПОРОШОК С ЗАДАННЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

ПРЕИМУЩЕСТВА

- **Большая движущая сила спекания**
- **Более низкая температура уплотнения**
- **Мелкозернистая структура**
- **Снижение светорассеяния**

Ключевой вывод: качество нанопорошка определяет плотность, прозрачность и функциональные свойства готовой керамики.

СТАТИСТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО УЛЬТРАДИСПЕРСНЫМ И НАНОПОРОШКАМ



Динамика публикационной активности: 1960–1990 и 1990–2026 гг.

Ключевой вывод

После 1990-х годов интерес к ультрадисперсным и нанопорошкам резко увеличился.

Причины роста

- развитие нанотехнологий и аналитики
- появление новых методов синтеза
- потребность в прозрачной и функциональной керамике
- развитие лазерной техники и сенсорики

Практическое значение

Качество порошка определяет плотность, прозрачность, механическую прочность и чувствительность керамического элемента.

Примечание: диаграмма отражает качественную динамику, представленную в исходном слайде; точные значения числа публикаций в исходных материалах не указаны.

МЕТОДЫ ФОРМОВАНИЯ ПРОЗРАЧНОЙ КЕРАМИКИ

Переход от традиционного прессования к крупногабаритным и сложнопрофильным заготовкам

Традиционные методы

- **Одноосное прессование**
  простота; серийные плоские детали
- **Холодное изостатическое прессование**
  равномерное уплотнение; заготовки сложной формы
- **Шликерное литьё**
  крупные и тонкостенные изделия
- **Гель-литьё**
  хорошая геометрическая точность
- **Горячее прессование**
  высокая плотность при ограниченной форме

Новые и перспективные методы

SCC	самопроизвольное коагуляционное литьё
DIW	прямая экструзионная печать
DLP	стереолитографическая 3D-печать
Glass-to-ceramic	формование стекла и контролируемая кристаллизация

SCC: крупные шпинелевые детали до 470 × 235 × 10 мм

Ключевой вывод: выбор метода формования определяет равномерность плотности, усадку, остаточные напряжения и итоговую прозрачность.

Источник: обзор методов получения прозрачной керамики; SCC применим к шпинели, Y_2O_3, AlON и YAG.

Методы уплотнения

Метод	Преимущества	Ограничения
Вакуумное и бездавленческое спекание	Простота, относительная масштабируемость	Остаточная пористость, рост зерен, длительный процесс
Горячее прессование	Высокая плотность, эффективное удаление пор	Ограничение формы и размеров
HIP	Удаление закрытых пор после предварительного спекания	Высокая стоимость оборудования и цикла
SPS	Быстрое уплотнение, сохранение мелкого зерна	Возможное загрязнение углеродом, сложность масштабирования
Высокобарическое SPS	Очень высокая плотность, низкая температура консолидации	Ограниченный размер изделий
UHS — сверхбыстрое высокотемпературное спекание	Сокращение времени выдержки и подавление роста зерен	Пока ограниченная промышленная апробация
Кристаллизация из стекла	Низкая пористость, сложные составы, нанокристаллы	Ограничения по составам и управлению кристаллизацией

В 2025 году для AlON была предложена двухступенчатая схема: 2 минуты сверхбыстрого спекания при 1850 °C и затем 120 минут обычного спекания при 1880 °C. Получена относительная плотность 99,71% и светопропускание не менее 80% в диапазоне 350–4900 нм.

HIP создан для устранения дефектов в металлах, керамике и сплавах, обеспечивая высокую прочность изделий для авиации, энергетики и медицины

Характеристики	Значение
Внутренний диаметр сосуда	250 мм
Внутренняя высота сосуда	760 мм
Максимальное давление	227 МПа
Рабочее давление	207 МПа
Максимальная температура нагрева стенок	204°C
Рабочий диаметр печи	100 мм
Высота печи	200 мм
Максимальная температура	2000°C
Рабочая температура	1900°C
Рабочая атмосфера	Аргон или азот
Максимальная скорость нагрева	20 °C/мин
Скорость охлаждения	До 40 °C/мин от 1400°C до 600°C
Материал теплоизоляции	Листы вольфрама







ВЛИЯНИЕ HIP НА СВОЙСТВА ПРОЗРАЧНОЙ КЕРАМИКИ

Горячее изостатическое прессование после предварительного спекания

МЕХАНИЗМ HIP

Температура
1400–1900 °C

↓

Давление Ar
100–200 МПа

↓

Схлопывание закрытых микропор

↓

Плотность → 99–100%

МЕТОДИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

До HIP
остаточные микропоры

После HIP
плотная структура

Меньше пор → меньше рассеяния → выше светопропускание

Важно: слишком высокая T и длительная выдержка вызывают рост зерен

СТАТИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

AlON + 0,10 мас.% Si_3N_4
83,8% при 600 нм; 85,6% при 2000 нм
прочность при изгибе — 404 МПа

Al_2O_3 после вакуумного спекания + HIP
50% при 640 нм; 78% при 4,5 мкм
в видимом диапазоне пропускание почти удвоено

8YSZ: рост T HIP
56,9% → 71,5% при 600 нм
но прочность: 328 → 289 МПа
из-за роста зерен

Вывод: HIP повышает прозрачность и плотность, но режим должен быть оптимизирован против роста зерен и снижения прочности.

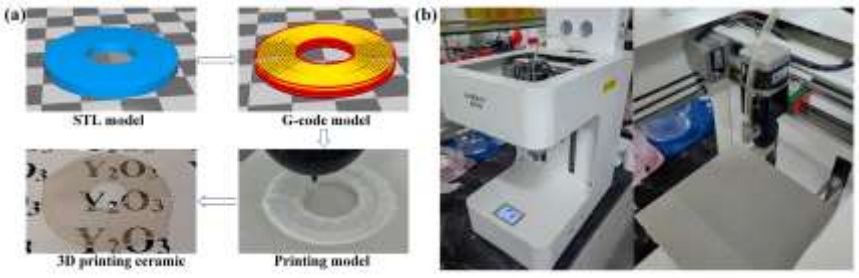
Источники: Journal of Advanced Ceramics (2023); Ceramics International (2023); 8YSZ study (2022).

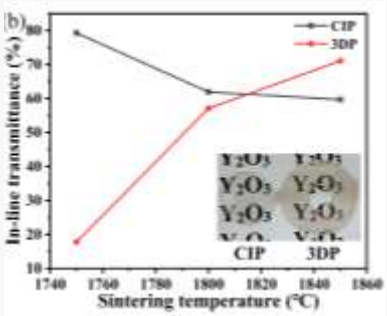
АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕНЯЮТ ГЕОМЕТРИЮ ИЗДЕЛИЙ

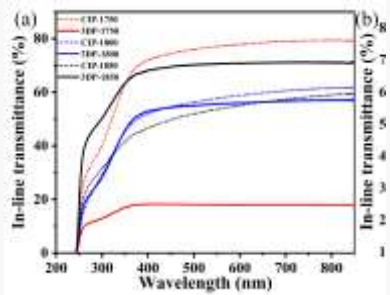
Пример: прямая экструзионная печать (DIW) прозрачной керамики на основе Y_2O_3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС DIW

1. **Керамические чернила**
   нанопорошок + растворитель + связующее
2. **Экструзия**
   послойное нанесение через сопло
3. **Сушка и удаление связующего**
   получение «зелёной» заготовки
4. **Спекание**
   уплотнение и формирование прозрачной керамики







РЕЗУЛЬТАТ И ПРОБЛЕМЫ

DIW позволяет получать кольца, трубки и полые детали

Пропускание Y_2O_3: 71% при 850 нм

CIP-заготовка: 79% при 850 нм

Проблемы: межслойные поры, усадка, остаточный углерод, полирование

ПЕРСПЕКТИВЫ ОПТИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ В МИРЕ

От прозрачного материала к крупногабаритным и многофункциональным оптическим системам

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

Оборонная и аэрокосмическая оптика
AlON, шпинель, сапфир для ИК-окон, куполов и прозрачной брони

Мощные лазеры
YAG, LuAG, Y_2O_3 и фторидные керамики для активных элементов

Сцинтилляторы и медицина
GGAG/GAGG, YAG:Ce и Eu:Y_2O_3 для рентгеновской визуализации

Фотоника и сенсоры
электрооптика, магнитооптика, пьезоэлектрические и радиационные элементы

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕНДЫ

→ крупногабаритные изделия

→ 3D-печать сложной геометрии

→ SPS / HIP / ускоренное спекание

→ композиты и градиентные структуры

→ бессвинцовые функциональные керамики

→ стандартизация и цифровой контроль

РЫНОЧНАЯ ЛОГИКА

рост EO/IR-систем и гиперзвуковых программ

замена стекла в экстремальных условиях

спрос на лазерные и медицинские системы

переход к функциональным сенсорным модулям

Мировая перспектива: рост спроса на материалы, сочетающие прозрачность, прочность, термостойкость и функциональный отклик.

Источники: Mordor Intelligence; IMARC Group; Journal of Advanced Ceramics; Materials Research and Technology.

ПЕРСПЕКТИВЫ ОПТИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ В РОССИИ

Приоритет: связать разработку порошков, технологию керамики и выпуск готовых сенсорных и лазерных элементов

СИЛЬНЫЕ СТОРОНЫ

- ✓ научные школы лазерной керамики
- ✓ опыт синтеза высокочистых нанопорошков
- ✓ компетенции в вакуумном спекании, SPS и HIP
- ✓ исследования YAG, LuAG, Y_2O_3, шпинели и фторидов
- ✓ наличие организаций по всей технологической цепочке

БАРЬЕРЫ

- ! нестабильность поставок высокочистых порошков
- ! недостаток серийного оборудования
- ! различия в методиках измерения
- ! ограниченная воспроизводимость крупноразмерных деталей
- ! разрыв между лабораторной технологией и производством

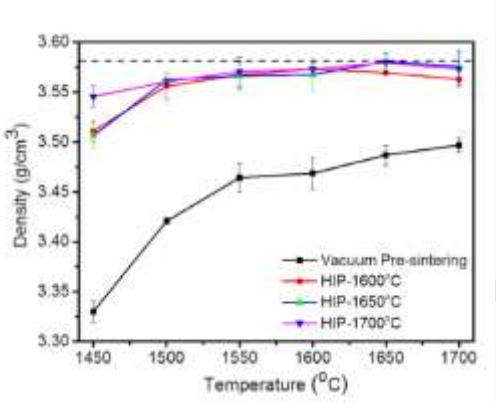
ОСНОВНЫЕ ЦЕНТРЫ РАЗРАБОТКИ

- ИОФ РАН — лазерная и фторидная керамика
- ИХВВ РАН — высокочистые нанопорошки
- НИ ТПУ — ультразвуковое компактирование и функционально-градиентные керамики;
- ! МГУ им. Н. П. Огарева — синтез порошков, люминесцентные и лазерные характеристики;
- ФКП ГЛП «Радуга» — лазерная керамика YAG

Российская перспектива: не копировать отдельные изделия, а создать воспроизводимую цепочку «порошок → керамика → чувствительный элемент → серийное изделие».

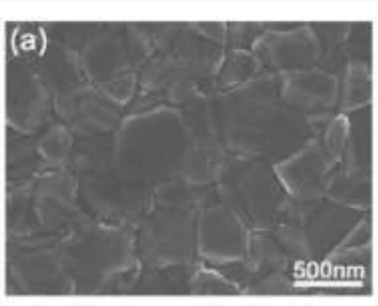
Примеры отечественных разработок: Nd:LuAG, Sm:LuAG, Ce:YAG и оксидные лазерные керамики.

Алюмамагниевая шпинель MgAl2O4

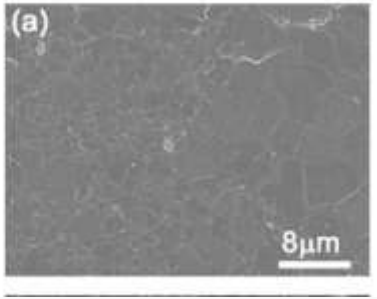


инель MgAl2O

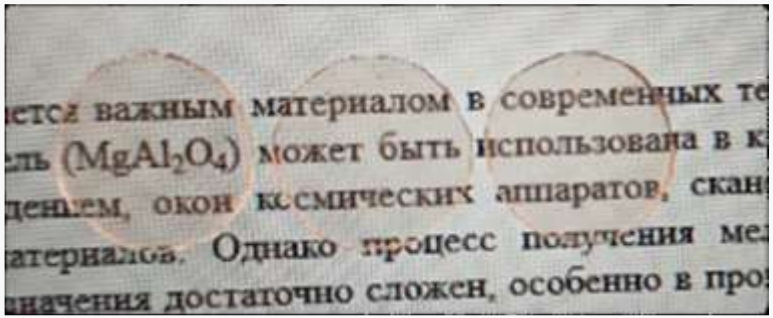
Кривые плотности керамики MgAl2O4, изготовленной с использованием различных методов высокотемпературного обжига толщиной 2 мм



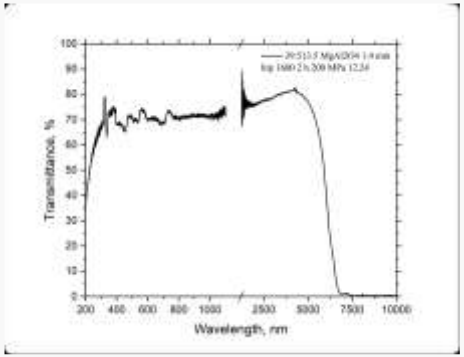
СЭМ-микрофотографии керамики MgAl2O4, предварительно спечённой при температурах в течение 5 часов (a) 1450 °



СЭМ-микрофотографии керамики MgAl2O4, предварительно спечённой при температурах в течение 5 часов (a) 1450 °+HIP



Фотографии полученных образцов алюмомагниевой шпинели



Спектрпропусканиякерамикивдиапазоне2-12мкм. Без просветляющегопокрытия

Спасибо за внимание