

ТЕКСТУРИРОВАННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ЛЕЙКОСАПФИР© 2008 г. **В. Н. Ветров**, канд. техн. наук; **Б. А. Игнатенков**

Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения

ВНЦ “ТОИ им.С.И.Вавилова”, Санкт-Петербург

E-mail: antitov@peterlink.ru

Рассмотрены особенности неоднородной пластической деформации лейкосапфира. Предложен механизм образования его текстуры и конуса оптических осей. Приведены сравнительные характеристики текстурированного лейкосапфира и его монокристаллического аналога.

Коды OCIS: 160.1190, 160.4760.

Поступила в редакцию 06.06.2007.

Разработка поликристаллического класса материалов – оптической керамики марки КО и поликристаллических сред марки ПО – показала возможности новых технологических приемов при изготовлении материалов с изотропными механическими свойствами и высокой прозрачностью в ИК диапазоне спектра. Востребованные бурным развитием тепловидения и лазерной техники, оптические керамики на основе фторида магния и селенида цинка [1, 2] инициировали разработку люминесцентной, радиолюминесцентной, электрооптической, фото- и катодохромной керамик, превосходящих по некоторым эксплуатационным характеристикам монокристаллические аналоги благодаря особенностям текстуры (структуры) материала и распределения легирующей добавки [3–4]. Среди более поздних исследований можно назвать разработку лазерной керамики на основе иттрий-алюминиевого граната [5, 6]. Именно этот пласт исследовательских работ позволил выделить основные материаловедческие тенденции развития кристаллических оптических материалов в части конструкционных: совершенствование существующих технологических приемов и разработка оригинальных технологий кристаллических материалов с целью улучшения некоторых характеристик или их сочетания.

Работы по исследованию процессов высокотемпературной пластической деформации поли- и монокристаллов алюмомагниевого шпинели и оксида алюминия, начатые в середине 80-х годов, позволили оценить пригодность технологий, базирующихся на этих процессах, для получения новых материалов или с необычным сочетанием свойств уже существующих [7, 8]. Одним из результатов разработки новых оптических материалов на основе тугоплавких оксидов явилось использование сложного процесса неоднородной высокотемпературной пластической деформации анизотропных кристаллических сред.

В середине 80-х годов прошлого столетия в качестве перспективной среды однозначно рассматривались кристаллы лейкосапфира благодаря уникальным техническим характеристикам и доступности материала необходимых качества и размеров для решения прикладных задач. Более поздние исследования по эрозии и деградации ИК материалов показали уникальную стойкость лейкосапфира, что, по мнению некоторых авторов, было связано с высоким значением предела прочности кристалла. [9, 10].

Для решения поставленной задачи – получения нового кристаллического оптического материала – был выбран технологический процесс, основанный на пластической деформации при центрально-кольцевом изгибе.

В работах [11, 12] для исследования высокотемпературной пластической деформации приводится следующее полуэмпирическое уравнение, позволяющее исследовать процесс неоднородной деформации:

$$\sigma = \sigma(v, T, P', \tau, y), \quad (1)$$

где v – скорость деформации, T – температура, P' – гидростатическое давление, τ – время, y – структурно-чувствительный параметр.

Ввиду малости влияния гидростатического давления и времени для случая центрально-кольцевого изгиба уравнение (1) упростили до выражения

$$\sigma = \sigma(v, T, y). \quad (2)$$

Структурно-чувствительный параметр поддерживали на одном уровне за счет качества исходного кристалла и достаточной идентичности условий проведения процесса деформации. В случае формоизменения диска в сферический сегмент, т. е. при неоднородной деформации, скорость деформации различна в разных частях образца. Как показали опыты, данный параметр можно заменить скоростью деформирования \dot{h} , т. е. изменением стрелы прогиба диска за единицу времени.

Исследования неоднородной пластической деформации для выявления элементарных механизмов, обуславливающих формоизменение диска на разных стадиях процесса, проводили по трем схемам нагружения:

- 1) при постоянной скорости деформирования,
- 2) при разных скоростях на стадии изгиба и растяжения,
- 3) при постоянной угловой скорости деформирования α .

Возникающие при пластической деформации в материале напряжения (изгибающие, сжимающие, радиальные и тангенциальные растягивающие) определяли с учетом изменения площади пятна контакта и конфигурации элементов при формоизменении. Деформирование проводили при скоростях, значительно превышающих скорость ползучести. Условия деформирования подбирали так, чтобы возникающие в материале напряжения при данной температуре были выше предела текучести и ниже предела прочности.

Исследования по приведенным выше схемам показали необходимость создания критерия

$$I_{g_h} = h\delta/P, \quad (3)$$

где h – стрела прогиба, δ – толщина образца, P – усилие деформирования.

На рис. 1 приведены экспериментальные результаты зависимости критерия I_{g_h} от h , определяющие основные технологические параметры при деформации дисков диаметром 45–120 мм, при отношении диаметра к толщине образца, равном $1/(0,08-0,15)$. Задаваемое критерием I_{g_h} соотношение между усилием деформирования и стрелой прогиба позволяет определить и поддерживать скорость деформирования, а следовательно, и напряжения, оптимальные для данной толщины образца и его упругопластических характеристик, связанных как с температурой образца при деформировании, так и с несовершенствами структуры реального кристалла.

Одним из важных результатов анализа экспериментальных данных авторы считают переход от стрелы прогиба h (как степени деформирования) к углу α , связанному с изменением радиуса пятна контакта; α – угол между направлением приложения внешнего усилия и поверхностью конической части образца выше края пятна контакта, зависимость которого от стрелы прогиба определяется уравнением

$$\alpha = \arctg \frac{-(x + R - h)}{\sqrt{R^2 - (x + R - h)^2}}, \quad (4)$$

где x – глубина лунки контакта, R – радиус пуансона.

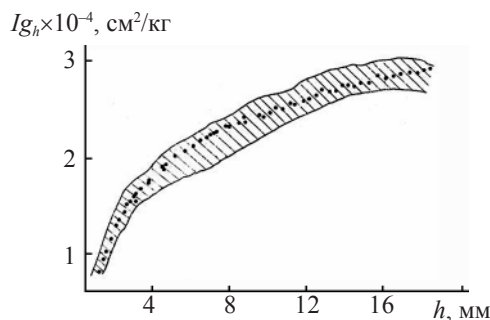


Рис. 1. Значения критерия I_{g_h} для проведения процесса неоднородной пластической деформации Z-дисков лейкосапфира.

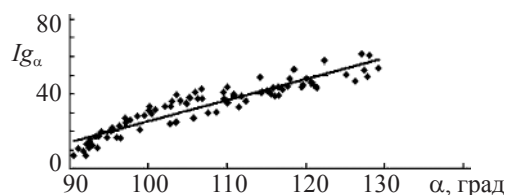


Рис. 2. Зависимость среднего значения критерия I_{g_α} для неоднородной пластической деформации лейкосапфира.

Параметр α , инвариантный по отношению к геометрическим параметрам образца и пресс-оснастки (матрицы и пуансона), также является универсальным при сопоставлении результатов выявления элементарных механизмов неоднородной пластической деформации. На рис. 2 приведена полученная по результатам исследования зависимость среднего значения критерия I_{g_α} от α , где

$$I_{g_\alpha} = \alpha\delta/P. \quad (5)$$

Задаваемое критерием I_{g_α} соотношение между усилием деформирования и стрелой прогиба позволяет обеспечить оптимальную скорость деформирования. При значениях критерия больше верхней границы допустимых значений в материале возникают напряжения, превосходящие предел прочности материала; при значениях меньше нижней границы происходит хрупкое разрушение образца. Это связано со снижением скалывающих напряжений в одной из систем скольжения в лейкосапфире (скорее всего по ромбоэдру) до значений ниже предельных для данной системы скольжения.

Из анализа зависимости фактора Шмида от угла α (рис. 3) для систем скольжения, характерных для лейкосапфира при температуре выше 1600 °С, можно заключить, что по мере увеличения угла α воз-

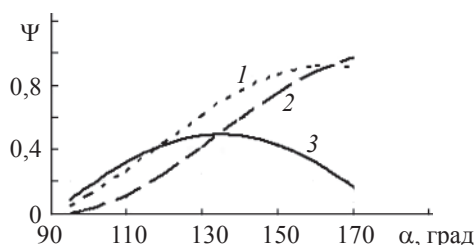


Рис. 3. Зависимости фактора Шмидта для плоскостей скольжения лейкосапфира от угла α при центрально-кольцевом изгибе. 1 – по ромбоэдрической системе, 2 – по призматической системе, 3 – базисная система.

растают напряжения, обуславливающие деформацию (скольжение) по ромбоэдрической и призматической системам скольжения. В базисной же системе скольжения деформация облегчается до значений угла $\alpha \approx 135^\circ$, при дальнейшем увеличении угла происходит снижение напряжений, что затрудняет деформацию. Данные результаты показывают, что пластическая деформация лейкосапфира является кристаллографически лимитируемым процессом в течение всего процесса формоизменения, в результате которого в плоскости диска образуется правильная шестиугольная звезда полос скольжения, продуцируемых системой $\{10\bar{1}1\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$. Бисектрисами входящих и исходящих углов являются соответственно X - и Y -направления, лежащие в плоскостях кристаллографического базиса [14]. Кристаллическая решетка лейкосапфира при деформации теряет параллельность таким образом, что главные оптические оси Z (направление $\langle 0001 \rangle$) образуют пучок осей, направленных по радиусам образца, т. е. оптическая ось кристалла остается перпендикулярной поверхности кристалла в любой его точке. Пластически деформированный монокристалл занимает промежуточное, управляемое процессом пластической деформации положение между моно- и поликристаллическим состояниями вещества, учитывая, что мы имеем пространственно ориентированную по радиусу текстуру фрагментов структуры. Данная текстура состоит из фрагментов с неявно выраженными границами и малыми углами их взаимного разворота, следовательно, речь идет о текстурированном монокристалле.

Получение текстурированного лейкосапфира является результатом деформации изгиба, обусловленного суперпозицией скольжения по ромбоэдрической и базисной системам на первом этапе. Далее добавляется призматическая система скольжения. На втором этапе деформации (растяжении) скольжение по базису затрудняется.

В работах [13, 14] и на рис. 4, 5 приведены результаты поляризационно-оптических исследований

текстурированного лейкосапфира во взаимно перпендикулярных направлениях, показывающие радиальную направленность оптических осей кристалла в детали и изменение геометрии расположения оптической индикатрисы по сравнению и исходным диском кристалла.

Таким образом, пластическую деформацию можно рассматривать как способ образования конуса оптических осей с углом в вершине в одноосном кристалле. Очевидно, что для совершенного монокристалла этот угол равен нулю и приобретает конечное значение при пластическом изгибе Z -среза одноосного кристалла. В качестве факторов, влияющих на изменение оптических свойств, можно использовать радиус пуансона, степень деформации и конфигурацию рабочей поверхности матрицы. На образцах диаметром 80 мм из текстурированного лейкосапфира наведенное двулучепреломление составляло менее 10^{-5} .

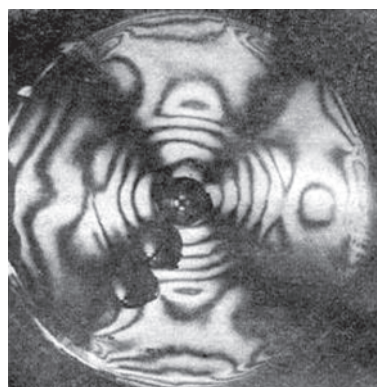


Рис. 4. Отклонение коноскопического креста в микроконоскопах на поверхности текстурированного лейкосапфира.

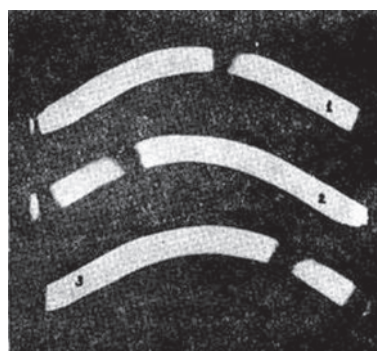


Рис. 5. Характер погасания в скрещенных поляризаторах кривой балки-вырезки из текстурированного лейкосапфира: 1, 2, 3 – положения погасания элементарного оптически одноосного “монокристалла”.

Характеристики текстурированного лейкосапфира

Характеристика	Текстурированный лейкосапфир	Лейкосапфир
Плотность, г/см ³	3,98	3,98
Структура, сингония	Текстурированный лейкосапфир	Монокристаллическая, тригональная
Область прозрачности, мкм	0,2–6,0	0,2–6,0
Индикатриса	Эллипс для каждой точки	Эллипс, $n_o < n_e$
Геометрическое расположение оптических осей кристалла.	Конус с фокусом Менее 10 ⁻⁵	Параллельно 0 (на уровне чувствительности методик)
Наведенное двулучепреломление		

В таблице приведены характеристики текстурированного лейкосапфира и его монокристаллического аналога, показывающие принципиальное отличие первого в части оптических свойств. Эта особенность позволяет предложить текстурированный лейкосапфир как новый кристаллический оптический материал, использование которого в линзовой оптике снизит двулучепреломление в собирающих и рассеивающих линзах и позволит получить изотропные линзы для параллельного пучка лучей [7, 15–17].

Таким образом, можно сделать следующие выводы. Для исследования неоднородной пластической деформации одноосных кристаллов при центрально-кольцевом изгибе необходимо использовать критериальный подход, причем критерий должен учитывать геометрические параметры образца, прикладываемое усилие и фактор, учитывающий формоизменение образца (h или α). Выявленные особенности механизма неоднородной пластической деформации лейкосапфира, заключающиеся в суперпозиции различных систем скольжения на стадии изгиба и растяжения, обуславливают получение текстурированного кристалла. Произошедшие изменения оптических свойств, связанные с образованием конуса оптических осей кристалла, позволяют по-новому взглянуть на область применения оптически одноосных кристаллов в оптике.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вольнец Ф.К.* Итоги и перспективы развития оптической керамики // ОМП. 1978. № 11. С. 39–41.
2. *Вольнец Ф.К., Удалова Л.В., Арановский Л.И., Усачев В.П.* Исследование кинетики уплотнения окиси магния с добавками фторида лития при различных температурах горячего прессования // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. 1973. Т. VIII. № 2. С. 285–289.
3. *Петровский Г.Т., Миронов И.А., Демиденко В.А., Бороздин С.Н.* Кристаллические оптические среды // Оптический журнал. 1992. № 12. С. 24–33.
4. *Петровский Г.Т., Бороздин С.Н., Демиденко В.А., Мальцев М.В., Миронов И.А., Мусатов М.И., Письменный В.А., Шатилов А.В.* Оптические кристаллы и поликристаллы // Оптический журнал. 1993. № 11. С. 77–93.
5. *Shoji J., Kurimura S., Sato V.* Optical properties and laser characteristics of highly Nd-doped Y₃Al₅O₁₂ ceramics // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. № 7. P. 939–941.
6. *Lu J., Prohhu P., Yu J.* Highly efficient 2% Nd: yttrium aluminum garnet ceramic laser // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. № 23. P. 3797–3809.
7. *Ветров В.Н., Рыжиков Э.Н., Игнатенков Б.А., Шенгелия Е.А.* Способ получения заготовки поликристаллического оптического материала алюмомагниевого шпинели // А. с. СССР № 1412237.
8. *Шкульков А.В., Петров Ю.Б., Печенков А.Ю., Игнатенков Б.А., Ветров В.Н.* Получение высокочистых кристаллических оксидных материалов индукционной плавкой в холодном тигле // Тез. докл. VIII Всесоюз. конф. по методам получения и анализа высокочистых веществ. Горький, 30 мая–2 июня 1988. С. 72.
9. *Cassaing J.J., Déom A.A., Bouveret A.M., Balageas D.L.* IR materials rain damage prediction and test results // Proc. SPIE. 1989. V. 1112. P. 295–305.
10. *Gentilman. R., Maguire E., Kohane T., Valentine D.B.* Comparison of Large ALON and Sapphire Windows // Proc. SPIE. 1989. V. 1112. P. 31–39.
11. *Пуарье Ж.П.* Высокотемпературная пластичность кристаллических тел. М.: Металлургия, 1982. 272 с.
12. *Пуарье Ж.П.* Ползучесть кристаллов. М.: Мир, 1988. 277 с.
13. *Сибикина Н.Л., Афанасьев И.И., Белевцева Л.И., Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Киселев А.П.* Оптические свойства пластически деформированного лейкосапфира // ОМП. 1992. № 4. С. 53–55.
14. *Афанасьев И.И., Андрианова Л.К., Ветров В.Н., Игнатенков Б.А.* Изменение оптических свойств лейкосапфира после высокотемпературной пластической деформации // Физика твердого тела. 1991. Т. 33. № 4. С. 1173–1175.
15. *Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Письменный В.А., Рыжиков Э.Н., Петровский Г.Т., Дукельский К.В.* Способ получения линз // Патент России. № 2285757. 2006.
16. *Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Письменный В.А., Миронов И.А.* Способ получения оптических линз из монокристаллов // Заявка на изобретение № 2005109583/28 от 04.04.2005.
17. *Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Письменный В.А., Миронов И.А.* Способ получения оптических линз с минимальным двулучепреломлением // Заявка на изобретение № 2005109584/28 от 04.04.2005.