

УДК 621.623

В. В. Рогов (г. Киев)

**Физико-химия в процессах
формирования функциональных
поверхностей деталей электронной
техники и оптических систем
из стекла и сапфира ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)
при трибохимическом полировании**

Представлен обзор информационных источников по физико-химическим процессам формирования функциональных поверхностей деталей электронной техники и оптических систем из стекла и сапфира ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$). Установлено, что невозможно обеспечить необходимые требования к состоянию их поверхностей до уровня “атомно-гладких” без физико-химического взаимодействия обрабатываемого и обрабатывающего материалов на заключительном этапе обработки — трибохимическом полировании.

Ключевые слова: физико-химическая обработка, трибохимическое полирование, стекло, сапфир.

Развитие современного оптического и электронного приборостроения в первую очередь определяется созданием нового уровня функциональных возможностей оптико-электронных приборов и устройств и, соответственно, повышением технических требований к состоянию шероховатости ($Ra \leq 0,2$ нм), классу оптической чистоты ($P 0-10$, $P 0-20$), высокой отражательной способности и высокой точности формы функциональных поверхностей их деталей. В связи с этим приоритетным является направление исследования многофакторных условий формирования нанорельефа поверхности деталей с вышеуказанными требованиями, в первую очередь механики и физико-химии контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемой детали.

Исследование физико-химического взаимодействия в зоне контакта при финишной прецизионной обработке функциональных поверхностей деталей нанoeлектроники и оптики из стекла и сапфира тесно связано с изучением химических и физико-химических превращений на поверхности обрабатываемых материалов под воздействием энергии трения и относится к трибохимии — области химии, изучающей химические и физико-химические изменения твердых веществ под влиянием механической энергии [1]. Помимо физических свойств на фрикционные характеристики взаимодействующих материалов большое влияние оказывают химические свойства самих контактируемых поверхностей [2]. Деформация поверхностных слоев при скольжении вызывает их активизацию, которая, совместно с повышением температуры на пятнах фактического контакта, интенсифицирует химические реакции. От кинетики химического взаимодействия контактирующих поверхностей сильно зависят сила и коэффициент трения, которые, исходя из основных трибологических принципов [3], имеют молекулярно-физическую природу и

© В. В. РОГОВ, 2009

включают такие процессы как адгезия, адсорбция, хемосорбция и др., влияющие на формирование поверхностного слоя обрабатываемого материала. Таким образом, данные области науки можно считать основополагающими в достижении вышеуказанных целей и задач. Однако, как показал глубокий, масштабный анализ доступных источников информации, использование этих областей знаний в технологических процессах финишной прецизионной обработки деталей оптических систем и электронной техники из неметаллических материалов, в особенности сапфира, недостаточно, в отличие от их использования в других процессах (дробления, измельчения природных материалов и т. п.). Наиболее изученной является десятилетиями сложившаяся на предприятиях оптической промышленности классическая технология прецизионного полирования оптических деталей из кремнеземсодержащего стекла SiO_2 [4], а также разработка полировальных составов, в частности, полирита на основе диоксида церия CeO_2 , с применением различных полировальных подложек. Авторами установлено, что вклад физико-химии в процесс полирования определяется энергетической выгодностью хемосорбции кремнезема на зернах полировального порошка CeO_2 . Съем материала происходит, в основном, за счет механически активированной притиром хемосорбции и возрастает с увеличением содержания SiO_2 в стекле. Весьма эффективным полировальным составом является состав на основе диоксида церия CeO_2 , а наиболее эффективным — на основе диоксида тория ThO_2 . Эффективность их зависит от кристаллической структуры и хемосорбционной способности, которая обусловлена структурно-геометрическим соответствием расположения атомов кислорода на гранях 111 кристаллов CeO_2 с размерами спаренного тетраэдра диортогруппы Si_2O_7 стекла. Дальнейшее развитие исследований физико-химических аспектов процесса полирования оптических деталей из силикатных стекол [5—7], выполненных в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины в 80—90-х годах прошлого столетия, завершилось разработкой полировального инструмента со связанными частицами полировального порошка CeO_2 в составе композитов Аквапол-1, -2, -5, -7 и -8 [8], трибохимического механизма и технологии процесса полирования оптических деталей из кремнеземсодержащих стекол. Установлено, что физико-химический механизм процесса полирования оптического стекла инструментом Аквапол включает совокупность проявления процессов диспергирования стекла на атомно-молекулярном уровне:

- в гидролизе растворимых силикатов в поверхностном слое при взаимодействии с водой;
- в адгезионном изнашивании путем массопереноса фрагментов стекла от менее когезионно-прочного SiO_2 к более когезионно-прочному CeO_2 ;
- в хемосорбционном изнашивании, сопровождающимся сорбционным массопереносом кремнезема стекла на CeO_2 , усиливающимся при введении в состав полировального композита хлорида аммония NH_4Cl ;
- в преобладающем усталостном износе.

При этом достигаются высокое качество и производительность обработки (табл. 1), а также значительное сокращение расхода полировального состава из CeO_2 .

На рисунке представлена зависимость интенсивности J взаимодействия SiO_2 с CeO_2 и, соответственно, производительность Q съема стекла К-8 при полировании его суспензией из полирита на основе CeO_2 и инструментом Аквапол-2 от температуры в зоне их контакта. Как следует из графика, увеличение J и Q происходит идентично для суспензии и инструмента до темпе-

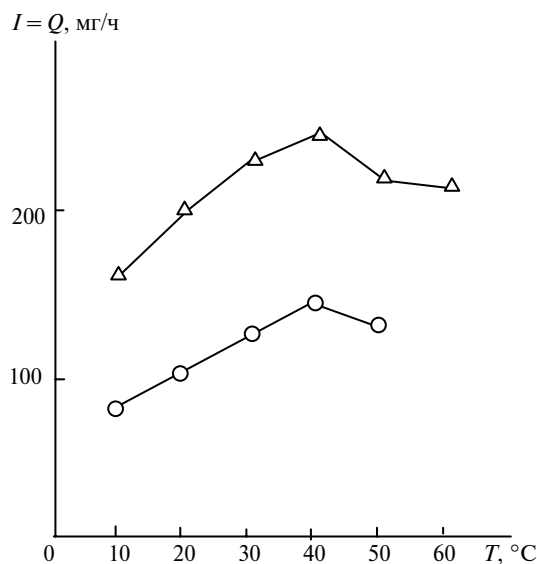
ратуры 40 °С в зоне контакта, однако их значения для инструмента в два с лишним раза превышают показатели для суспензии.

Таблица 1. Полирующая способность различных полировальных составов (композитов) при полировании деталей оптических систем и электронной техники из стекла К-8 и ситалла

Полировальный состав (композит)	Обрабатываемая деталь	Состояние обрабатываемой поверхности			Q, мг/ч
		Ra, мкм	Rmax, мкм	Класс оптической чистоты P	
Водная суспензия (Т:Ж = 1:10) на основе полирита ПФ*; смоляной полировальник	приборные линзы, призмы, подложки, окна	не ≥ 0,01	не > 0,05	не хуже II	не менее 80
Аквапол-1, -2 [8]	то же	0,001—0,002	не > 0,015	II—III	~ 200
Аквапол-5	плоские подложки лазерных зеркал,	0,001	не > 0,007	0—40—II	~ 140
Аквапол-7, -8	панели жидкокристаллических дисплеев, окна	0,0003	не > 0,003	0—10—0—40	~ 100

Примечание. Параметры Ra и Rmax измеряли на атомно-силовом микроскопе “Nano Scope IIIa Dimension 3000”.

* ТУ48-4-244—82.



Зависимость интенсивности взаимодействия кремнезема SiO₂ с CeO₂ и производительности съема стекла К-8 при полировании его суспензией из полирита (○) на основе CeO₂ и инструментом Аквапол-2 (Δ) от температуры в зоне их контакта.

Инструменты в виде сферических притиров на основе композитов Аквапол-1, -2 в течение более восьми лет прошли опытно-промышленную проверку на Феодосийском оптическом заводе при выпуске более 4 млн. шт.

выпукло-вогнутых линз \varnothing 17—22 мм для кино- и фотообъективов, обеспечивая оптическую чистоту класса P II— P III и точность формы N равную 1—2 интерференционным кольцам, более чем в 1,5 раза большую производительность и сокращение расхода полировального порошка в 10—15 раз.

Инструменты на основе Аквапол-5, -7, -8 с положительными результатами прошли испытания на КП “ЦКБ Арсенал” при обработке подложек лазерных зеркал из кварцевого стекла и панелей жидкокристаллических дисплеев ($t = 0,3$ мм) из боросиликатного стекла по заказу фирмы “Wintek” (USA), обеспечивая необходимые технические требования к состоянию обработанных поверхностей деталей (см. табл. 1).

Уникальные оптические и физико-механические свойства сапфира α - Al_2O_3 (табл. 2) — диапазон спектрального пропускания от 100 до 5000 нм, высокие теплотехнические и механические характеристики, превосходящие таковые для всех марок оптических стекол — позволяют использовать его в оптических и оптико-электронных приборах и комплексах, работающих одновременно в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях светового спектра и жестких условиях эксплуатации, что очень важно для оборонного и космического приборостроения. Однако сложившаяся за много лет на предприятиях оптико-механической промышленности Советского Союза классическая технология обработки оптических деталей из стекла непригодна для обработки оптических деталей из сапфира, превосходящего по твердости стекло в 4,5 раза, и для которого необходима принципиально новая технология обработки.

Таблица 2. Оптические и некоторые физико-механические свойства сапфира (α - Al_2O_3) и оптических стекол (литературные данные)

Свойство	Сапфир (α - Al_2O_3)	Оптическое стекло
Коэффициент преломления n_c	1,765	1,4721—1,7517
n_d	1,773	1,4704—1,7550
Двулучепреломление Δ ($\lambda = 589,3$ нм)	0,008	$\pm 0,0002$ —0,0020
Показатель отражения ρ , % при $n_d = 1,768$ ($\lambda = 589,3$ нм)	7,8	3,6—7,5
Оптическое пропускание τ при $\lambda = 589,3$ нм	0,923	0,47—0,90
Диапазон спектрального пропускания $\lambda_{пр}$, нм	от 100 до 5000 (ИК, УФ, СВЧ)	до 2500 в ИК и до 1700 в видимой части спектра
Коэффициент дисперсии V	72,2	15—70
Твердость HKN , ГПа	18,6*	
HV , ГПа	21,6*	4,75
Устойчивость к царапанию	устойчив к большинству природных материалов кроме алмаза	не устойчиво
Химическая устойчивость (инертность)	устойчив к агрессивным средам (HCl, HNO ₃ , H ₃ PO ₄ , HF, H ₂ SO ₄)	не устойчиво

* Данные измерений в ИСМ НАНУ.

Начиная с 80-х годов прошлого столетия и по настоящее время в ИСМ НАН Украины в лабораторных и производственных условиях проводится комплекс теоретических и экспериментальных исследований механики и трибохимии контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемой детали и их влияния на формирование нанорельефа поверхностного слоя деталей с вышеуказанными требованиями и, в первую очередь, физико-химического контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемой детали на заключительной операции обработки — полировании.

Об использовании при полировании деталей из сапфира ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) водной суспензии на основе коллоидного кремнезема SiO_2 , а также о гипотетическом представлении их химического взаимодействия по уравнению



с образованием и удалением продукта реакции каолинита $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ в процессе фрикционного взаимодействия полировальника и детали с достижением высокого качества поверхности без “алмазного фона”, впервые стало известно из публикаций японских исследователей [9, 10]. Сильное специфическое взаимодействие между Al_2O_3 и SiO_2 было подтверждено и обосновано в фундаментальных трудах Р. Айлера [11]. Несмотря на то, что указанное взаимодействие получило широкое применение, процесс полирования сапфира на его основе остается весьма трудоемким и актуальным для дальнейшего исследования и разработки. Как установлено в [11], в реакции ионного обмена между Al_2O_3 и SiO_2 только не более 25 % поверхностных атомов Si может быть замещено атомами Al, т. е. существует определенное ограничение количества взаимодействующих атомов Si и, соответственно, концентрации SiO_2 в полировальном составе. Сверхдопустимая концентрация SiO_2 увеличивает силу и коэффициент трения между обрабатываемым образцом сапфира и полировальником так, что процесс ТХП может стать невозможным. В ИСМ НАН Украины проведены комплексные научно-исследовательские работы по физико-химии процесса формирования функциональных поверхностей деталей электроники и оптики из сапфира с целью достижения необходимых к ним требований. В результате:

— исследованы физико-химические свойства (концентрация SiO_2 , плотность, pH и полирующая способность) различных полировальных составов (табл. 3, 4) на основе коллоидного кремнезема;

— определены их оптимальные значения для деталей различного назначения и состояния обработанных поверхностей, которое они обеспечивают [14];

— на патентном уровне разработаны необходимые инструменты для подготовки поверхностей под полирование и для полирования [13];

— исследована интенсивность физико-химического контактного взаимодействия полировального состава с сапфиром в зависимости от pH, температуры в зоне их контакта и номинального давления p_a , а также концентрации в нем SiO_2 [15] и определены условия ее повышения (табл. 5).

Как следует из данных табл. 4:

— при повышении температуры в зоне контакта от 20 до 50 °C интенсивность и, соответственно, производительность трибохимического полирования (ТХП) увеличивается в 1,6 раза;

— при повышении номинального давления p_a в контакте в 1,7 раза J и Q снижаются в связи с тем, что в зоне контакта уменьшается толщина слоя полировального состава и, соответственно, количество SiO_2 , взаимодействующего с Al_2O_3 ;

Таблица 3. Состав и физико-химические свойства полировальных суспензий на основе коллоидного кремнезема SiO₂, используемых при ТХП сапфира

Состав и свойства		Полировальные составы				
		ОСЧ.6-3*	NALCO-2354		NALCO-2360	
			исходный	рабочий	исходный	рабочий
Состав,	SiO ₂	23,6	48,2	8,5	50,8	9,0
% (по	Si	—	47,4**	—	57,82*	—
массе)	O	—	52,4**	—	40,82*	—
	Примеси	B, Fe, Co, Mn, Cu, Ni, Cr, Ti	Na	—	Na	—
		10 ⁻³ —10 ⁻⁵	0,51—0,38		0,94	
	Этанол	3,2	—	—	—	—
	H ₂ O	остальное	остальное	остальное	остальное	остальное
Свойства	pH	9,3	11,32	10,85	8,6	8,54
	Вязкость, с·Г	22	—	—	—	—
	Плотность γ, г/см ³	—	1,48	1,12	1,56	1,18

*ТУ 6-09-4989—83

** По данным определения поэлементного химического состава сухого остатка из раствора с помощью растрового электронного микроскопа с системой микроанализа, остальные значения определены по содержанию сухого остатка SiO₂ с помощью анализатора влажности ХМ-60.

Таблица 4. Полирующая способность полировальных составов (композигов) при полировании деталей электронной техники и оптических систем из сапфира (α-Al₂O₃) || (0001) при T = 20 °С

Полировальный состав	pH	Обрабатываемые детали	Состояние обработанной поверхности		Производительность Q	
			Ra, мкм	Класс P	мг/ч	мкм/ч
Сиопол-1 [13] с водно-аммиачным коллоидным раствором ОСЧ.6-3 Водный раствор коллоидного кремнезема (SiO ₂) торговой марки	9,3	подложки КНС структур, окна	0,0003	0-40—I	1,2	0,15
NALCO-2354	10,85	подложки для эпитаксии GaN, КНС структур, приборные линзы, окна, призмы	0,0002— 0,0003	0-10— 0-20	2,8	0,36
NALCO-2360	8,54	то же	≤ 0,0002	то же	2,2—2,7	0,35

Примечание. Параметр Ra измеряли на атомно-силовом микроскопе “Nano Scope IIIa Dimension 3000”.

— при повышении в 1,5 раза концентрации кремнезема в полировальном составе по причинам указанным выше, снижается J и, соответственно, Q ТХП;

— J и Q зависят от химической активности полировального состава;

— повышение температуры в зоне контакта не изменяет состояние поверхностного слоя обрабатываемой детали, но стабилизирует его (по Ra , Rq).

Таблица 5. Влияние условий обработки и концентрации SiO_2 в полировальном составе на интенсивность трибохимического контактного взаимодействия, производительность съема материала и состояние поверхностного слоя деталей из сапфира при их полировании составом NALCO-2354

Параметр		Интенсивность взаимодействия $J = Q$, мг/ч при температура в зоне контакта, °С			
		20	30	40	50
Номинальное давление p , МПа	0,020	2,8	3,3	3,8	4,4
	0,034	2,0	3,4	3,9	4,5
Концентрация кремнезема SiO_2 в полировальном составе ($p_a = 0,02$ МПа), % (по массе)	8,5	2,8	3,3	3,8	4,4
	12,4	2,1	1,9	2,9	3,1
Средние значения параметров состояния поверхностного слоя					
	Ra , нм	0,2	0,2	< 0,2	0,2
	Rq , нм	0,3	0,3	0,2	0,3
	R_{\max} , нм	2,2	3,2	2,4	3,5

Главным, определяющим фактором повышения интенсивности взаимодействия SiO_2 и Al_2O_3 и производительности ТХП является химическая активность полировального состава и, соответственно, скорость химической реакции между ними.

На основании полученных результатов разработаны опытные технологии финишной прецизионной обработки деталей электронной техники (подложки для эпитаксии GaN, КНС структур (кремний на сапфире)) и оптических систем (приборные линзы силовой оптики) [16, 17] из сапфира, а также изготовлены опытные партии указанных изделий, которые прошли аттестацию с применением современных средств измерений и получили положительную оценку. Достигнуто состояние функциональных поверхностей сопоставимое с мировым уровнем: у подложек — шероховатость $Ra \leq 0,2$ нм (2 \AA), класс оптической чистоты $P 0-10$ — $P 0-20$ с четким изображением линий Кикучи при использовании метода дифракции отраженных электронов и микроскопа “Цейс-50”; у сферических поверхностей приборных линз из сапфира — шероховатость $Ra < 1$ нм и класс оптической чистоты $P III$ — $P V$. При этом точность формы плоских поверхностей была равна 1—2 интерференционных кольца, а сферических — 3—5.

Обстоятельные исследования процессов формирования при механических, химических, радиационных, плазменных и других воздействиях поверхностей элементов микрооптики из сапфира, в частности, эллиптических и сферических линз в составе чипов гетероструктур InGaN/GaN/ Al_2O_3 светодиодов с микролинзами, при создании новых источников белого света выполнены авторами [18]. После механического полирования апробировали бесконтакт-

ное химическое полирование (БХП) в условиях ламинарного потока травителей — ортофосфорной кислоты H_3PO_4 (400—500 °С), расплава буры $Na_2B_4O_7$ (1000 °С), расплава бисульфата калия (450 °С). Наилучшее качество поверхности обеспечивает $CClF_3$ (хлортрифлюорометан) при $T = 1400—1500$ °С со скоростью 0,6 мкм/мин. Авторы [18] относят к наиболее распространенным газовое травление сапфира потоком чистого водорода при 1300—1400 или 1100—1200 °С со скоростью до 0,1 мкм/мин. Однако при указанном травлении полирующий эффект удастся достигнуть только на базовых поверхностях (0001). При реактивном ионно-плазменном химическом травлении (ПХТ) температура процессов понижается до 200—500 °С. В качестве травящих газов могут быть использованы фторсодержащие (CF_3 , CF_4 , SF_4 , CHF_3) и углеродсодержащие (CO , CO_2) соединения при температурах выше 2000 К (скорость травления Al_2O_3 (0001) составляет 6—240 мкм/мин), а также BCl_3 , BBr_3 со скоростью травления 0,09 мкм/мин. Авторы считают, что высокое кристаллическое совершенство поверхности подложек и чипов из сапфира возможно получить также с помощью ионного или радиационного отжига. Основным фактором, улучшающим структуру поверхности при таких отжигах, по мнению авторов, является процесс рекристаллизации нарушенного слоя, сопровождающийся снятием внутренних напряжений вокруг дефектов, внесенных механической обработкой. В итоге авторы приходят к выводу, что оптимальными и экономически целесообразными вариантами технологии формирования поверхности подложек и чипов являются химическое полирование и плазмохимическое травление, позволяющие обеспечить состояние их поверхности $Ra = 20$ Å (2 нм) и $Rmax = 220$ Å (22 нм), что по их мнению сопоставимо с результатами зарубежных исследователей — соответственно 17 и 22,5 нм. Авторы пришли к выводу, что достигнутое ими состояние поверхности на сапфире является экономически достаточным для экстракции излучения светодиодов с гетероструктурой $InGaN/Al_2O_3$, поскольку дальнейшее дорогостоящее уменьшение Ra и $Rmax$ не увеличивает интенсивности излучения. К сожалению, авторы при исследовании и выводах не оценивали состояние обработанных по своим вариантам технологии поверхностей по главному оптическому показателю — классу оптической чистоты по ГОСТ-11141—84, а также точности формы (плоскости, сферы). Поскольку не указан прибор, используемый для измерения параметров шероховатости Ra , $Rmax$ поверхности и его разрешающая способность, трудно судить о точности их измерения. Поэтому, несмотря на информационную обстоятельность публикации, судить о приемлемости предлагаемых подходов применительно к достижению мировых требований $Ra \leq 0,2$ нм, $P 0-10$, $P 0-20$ к подложкам гетероструктур $InGaN/Al_2O_3$ и тем более технологии изготовления приборных оптических линз из сапфира затруднительно.

Авторы [19], исследуя процесс химико-механического полирования микролинз и полусферических колпаков (обтекателей) диаметром от 3 до 180 мкм из сапфира ($\alpha-Al_2O_3$) с использованием полировального состава на основе коллоидного кремнезема SiO_2 за 240 мин машинного времени обработки достигали наилучших, с их точки зрения, результатов по шероховатости обработанных поверхностей $Ra = 0,969$ нм (исходная шероховатость изделий была Ra не больше 1,31 нм), оптической чистоте класса $s/d = 20/10$ (Mil) и точности формы $N = 0,1\lambda$ ($\lambda = 589,3$ нм). Шероховатость измеряли на атомно-силовом микроскопе “Solver.Pro”. Характеристика полировального состава не указана.

Без химических добавок не обходится и производство алмазно-абразивного инструмента, особенно для финишного шлифования и предварительного полирования высокоточных деталей опико-электронных производств из сапфира, кварца, стекла, полупроводников. В состав шихты таких инструментов вводят, например, муравьиную кислоту HCO_2H [20], которая при нагревании в процессе работы инструмента разлагается с выделением водорода, усиливающего и дополняющего восстановительные воздействия на обрабатываемый материал. Кроме того, растворяясь в водном растворе СОЖ, HCO_2H способствует обновлению (вскрытию) алмазных зерен на рабочей поверхности инструмента, повышая его работоспособность.

Известно [21], что изменение скорости химической реакции происходит за счет изменения энергии активации E_a , т. е. необходимого количества энергии для прохождения реакции. Химические реакции, как и все природные процессы, протекают самопроизвольно, если они сопровождаются уменьшением ($\Delta G < 0$) энергии Гиббса системы при постоянстве давления и температуры. Для варианта ТХП сапфира полировальным составом на основе коллоидного кремнезема $\Delta G = -26,6$ кДж/моль, так что реакция (1) может протекать самопроизвольно.

Скорость реакции можно изменить [21] с помощью катализатора. В контактной зоне каталитические реакции, по данным [22], обычно протекают на поверхности твердого тела и обусловлены активацией молекул реагентов при взаимодействии с поверхностью. Особую группу составляют гетерогенно-каталитические реакции, объединяемые понятием гетерогенного ионного катализа. В реакциях кислотно-основного типа высокой активностью обладают комплексные катализаторы, состоящие из нескольких веществ, описываемые общей формулой X_n, M_m, Y_y , где X — лиганд, связывающий атом металла с поверхностью; M — активный центр (атом) переходного металла; Y — внешний лиганд. В общем случае комплекс может быть мооядерным ($T = 1$) или полиядерным ($T \geq 2$) и связан с поверхностью одним или несколькими лигандами X [22]. Например, близкий для (1) растворимый комплексный катализатор гидрирования $\text{Rh}\{\text{P}(\text{C}_6\text{H}_5)_3\}_3\cdot\text{Cl}$ может быть закреплен на поверхности силикагеля (SiO_2). Однако нахождение и использование катализаторов для ускорения реакций взаимодействия Al_2O_3 и SiO_2 при ТХП сапфира с целью повышения его производительности ограничивается тем, что при увеличении интенсивности взаимодействия Al_2O_3 и SiO_2 ухудшается состояние обрабатываемой поверхности, в частности, по параметру R_{max} (см. табл. 5).

Из анализа вышеизложенного очевидна значимость физико-химии в процессах формирования поверхностей деталей электронной техники и оптических систем из стекла и сапфира ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) до требуемого уровня.

1. Хайнике Г. Трибохимия / Пер. с англ. — М.: Мир, 1987. — 584 с.
2. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Пер. с англ. А. Б. Белого, Н. К. Мышкина; Под ред. А. И. Свириденко. — М.: Машиностроение, 1986. — 360 с.
3. Справочник по триботехнике: В 3 т. Т. 1. Теоретические основы / Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, 1989. — 400 с.
4. Ходаков Г. С., Кудрявцева Н. Л. Физико-химические процессы полирования оптического стекла. — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.
5. Rogov V. V. Трибохимический механизм процесса полирования стекла инструментом “Аквапол” // Опико-механическая промышленность. — 1991. — № 6. — С. 56—60.
6. Rogov V. V., Filatov Y. D., Kottler W., Sobol V. P. New technology of precision polishing of glass optics // Opt. Eng. — 1999. — 40, N 8. — P. 1641—1645.
7. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова. — Т. 4. Инструменты и технологические процессы в прецизионной обработке /

- Под ред. В. В. Рогова. — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ “Алкон”, НАНУ, 2006. — 260 с.
8. *Свидетельство* Украины № 13366 на товарный знак “Аквалол” с приоритетом от 30.08.1999 г.
 9. *Новый способ полировки поверхности кристаллов.* — Densoken Nyusu (News in Electro-technical Lab.). — 1973. — **230**. — Р. 5.
 10. *Yasunaga N., Imanaka O.* Polishing hart crystals with soft powder // *Technocrat.* — 1975. — **8**, N 9. — Р. 15—21.
 11. *Айлер Р.* Химия кремнезема / Пер. с англ. — М.: Мир, 1982. — Ч. 1. — 416 с.; Ч. 2. — 712 с.
 12. *Рогов В. В., Рублев Н. Д., Троян А. В., Попельнюк В. Н.* Развитие технологии финишной прецизионной обработки функциональных поверхностей оптических и электронных деталей из синтетического монокорунда // *Сверхтв. материалы.* — 2002. — № 5. — С. 83—87.
 13. *Пат. 48581А Украина, МПК⁷ В 24 В 1/00, В 24 D 3/3.* Спосіб фінішної, прецизійної обробки деталей з монокорунду і полірувальний інструмент / В. В. Рогов, М. Д. Рублев, О. В. Троян, Т. Л. Кротенко. — Оpub. 15.08.02, Бюл. № 8.
 14. *Rogov V. V., Tkach V. N., Rublev N. D. et al.* Analysis of the state condition of the surfaces of sapphire ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) parts after finishing // *J. Superhard materials.* — 2008. — N 3. — Р. 67—74.
 15. *Rogov V. V., Rublev N. D., Krotenko T. L. Troyan A. V.* Investigations into the intensity of the tribochemical contact interaction of a polishing compound and sapphire when machined // *Ibid.* — N 4. — 2008. — Р. 75—78.
 16. *Новиков Н. В., Рогов В. В.* Инновационная технология финишной обработки элементов микроэлектроники и электронной светотехники XXI века из сапфира ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) // Журнал “Контенант”, международной Академии Контенант, Москва-Красногорск, 2005, апрель. — С. 39—41.
 17. *Рогов В. В., Рублев Н. Д., Ветров А. Г. и др.* Перспективность новой технологии ИСМ НАНУ по изготовлению оптических приборных линз из сапфира ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) // *Инструментальный світ.* — 2007. — № 4. — С. 12—14.
 18. *Осинский В. И., Гончаренко Т. И., Ляхова Н. Н.* Влияние обработки поверхности чипов на экстракцию излучения сверхярких светодиодов на гетероструктурах InGaN/Al₂O₃ // *Физическая инженерия поверхности.* — 2003. — **1**, № 1. — С. 94—98.
 19. *Дронь О. С., Коровкина Н. М., Кузнецов А. С. и др.* Исследование процесса полирования сапфира // *Научно-технический вестник СПЕГУ ИТМО. Вестник 30. Фундаментальные и прикладные исследования информационных систем и технологий.* — Санкт-Петербург, 2006. — С. 129—135.
 20. *Пат. 2169658 РФ, МПК⁷ В 24 D 3/32, В 24 D 3/34.* Состав для алмазного инструмента / В. С. Кондратенко. — Оpub. 27.06.2001.
 21. *Химическая энциклопедия:* В 4 т. — М.: Советская энциклопедия, 1990. — Т. 2. — С. 335—337.
 22. *Отто М.* Современные методы аналитической химии / Пер. с нем. — М.: Техносфера, 2003. — 416 с.

Ин-т сверхтвердых материалов
им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Поступила 05.05.09