© Э.А. Ахметшин, Е.В. Поздеева, 2006

УДК 622.373.2

Э.А. Ахметшин, Е.В. Поздеева

ИМПРЕГНИРОВАНИЕ ПРИРОДНОГО ИЗУМРУДА

Семинар № 23

Наша страна обладает колоссальными запасами изумрудов. В РФ по состоянию на 1.08.2001 выявлено 44 изумрудоносных объекта: 6 - месторождений; 16 - проявлений с утвержденными прогнозными ресурсами, 22 – без оцененных ресурсов. Суммарные ресурсы в черновом изумрудном сырье, пересчитанные при оценке МСБ изумруда в 1999 г. (Рудаков А.И., Атабаев К.К., Попов В.Н.) составили по месторождениям 66 378,4 кг, а в целом по Уральской изумрудоносной полосе с учетом прогнозных ресурсов – 92 164,5 кг. Запасы в ограночном сырье до глубины 320 м оценены в 16 тыс. кг. К сожалению, основная часть изумрудов соответствует характеристикам 4/4 и ниже, поэтому проведение работ по повышению характеристик изумрудов посредством облагораживания позволит значительно повысить (в несколько раз) стоимость запасов изумрудов РФ.

Существует ряд причин, в силу которых наиболее подходящим методом облагораживания для изумрудов является импрегнирование. В первую очередь это наличие большого числа различных пороков и дефектов, часть из которых являются вскрытыми. Выход пороков на поверхность позволяет очистить их от различных наполнений и при определенных условиях заполнить подходящим реагентом.

Разработанная нами методика импрегнирования включила в себя несколько стадий: подготовка камня к пропитке, очистка трещин, непосредственно пропитка, полимеризация реа-гента пропитки и очистка поверхности от лишнего реагента. В первую очередь производилась очистка вскрытых трещин от органических загрязнений (составляющих полирующих паст), частиц металлов (из которых изготовлены полировальные шайбы), а также от минералов, соответствующих парагенезису уральского изумруда. Для очистки от органических загрязнений использовался ацетон - универсальный органический растворитель. Частицы металлов удалялись посредством растворения в разбавленной азотной кислоте (указанные металлы реагируют с образованием растворимых в воде солей). Для удаления минеральных заполнений наиболее эффективной оказалась обработка фтороводородной кислотой с последующим промыванием в азотной кислоте. Обе кислоты являются гидрофильными, как и поверхность изумруда, что способствует легкому проникновению в протяженные вскрытые дефекты, и позволяет полностью удалить минеральные включения. Остатки этих кислот легко удаляются простым промыванием образцов в воде.

Очистка пороков от воды производилась путем связывания ее ацетоном и дальнейшим удалением образовавшейся смеси при нагреве под вакуумом. При удалении влаги из трещин большую роль играют капиллярные явления. При контакте поверхности изумруда с водой наблюдается явление смачивания, т.е. в

трещине (своего рода капилляре) образуется вогнутый мениск, вследствие этого давление насыщенного пара воды в трещине ниже давления насыщенного пара над плоской поверхностью воды. Рассчитаем отношение этих давлений для капилляра диаметром 1 мкм при температуре 20 °С, заполненного водой. Такие параметры выбраны вследствие того, что трещины размером 1 мкм наиболее заметны из-за возникающего эффекта радужных полос (интерференции в тонких пленках). Трещины размером менее 1 мкм трудно различимы в 10х лупу, а для трещин размером более 1 мкм разница давлений насыщенного пара будет менее значительной. Расчет буде проводить по уравнению Томпсона:

$$\mathrm{Ln}\,(P_{кр}/P_{пл}) = -2\sigma_{жг} v\cos(\theta)/N_a k T r_к,$$

где $\sigma_{жг}$ – поверхностное натяжение воды, Н/м, θ – краевой угол смачивания, рад; N_a – число Авогадро, моль$^{-1}$; k – константа Больцмана, Дж/К; Т – температура, К; $r_к$ – радиус капилляра, м.

$P_{кр}/P_{пл} = 0{,}999$.

Из расчета видно, что давления не сильно отличаются и возникающие капиллярные явления практически не повлияют на процесс испарения, однако, данное уравнение приведено для идеального капилляра, в действительности же трещина имеет ломаный характер и неидеальные стенки, что значительно осложняет процесс испарения воды в глубине трещин.

Чтобы облегчить процесс удаления воды образец выдерживался в ацетоне. Ацетон является хорошим растворителем для большинства полимеров, полностью смачивает поверхность изумруда (т.е. имеет на поверхности изумруда краевой угол смачивания $\theta<5$), что способствует легкому проникновению в трещины, неограниченно растворяется в воде, связывает воду, образуя прочные водородные связи, имеет более низкую температуру кипения. Это приводит к тому, что под вакуумом при температуре порядка 110 °С смесь интенсивно испаряется из трещин и пор.

Очистка пороков от смеси ацетон-вода производилась под вакуумом порядка 10^{-2} мм.рт.ст. непосредственно перед пропиткой для одновременного удаления и воздуха, также препятствующего наполнению реагентом. Для проведения экспериментов была сконструирована вакуумная установка. На рисунке представлено ее схематическое изображение.

Были выбраны следующие реагенты пропитки в соответствии с предъявляемыми требованиями (близкий показатель преломления, характер смачивания, условия полимеризации, свойства до и после полимеризации, стоимость):

1. Силиконовая пропитка;
2. Акриловая грунтовка;
3. Алкидный лак;
4. Кремнийорганический лак (КО-3);
5. Нитролак;
6. Цианакрилатный клей;
7. Эпоксидная смола;
8. Полиэфирная смола.

Для определения условий импрегнирования каждым реагентом была произведена оценка характера зависимости краевого угла смачивания от температуры. Исследования показали, что поверхность изумруда лиофильна по отношению ко всем выбранным реагентам пропитки, кроме полиэфирной смолы при низкой температуре, однако, при нагревании характер взаимодействия меняется на противоположный, и

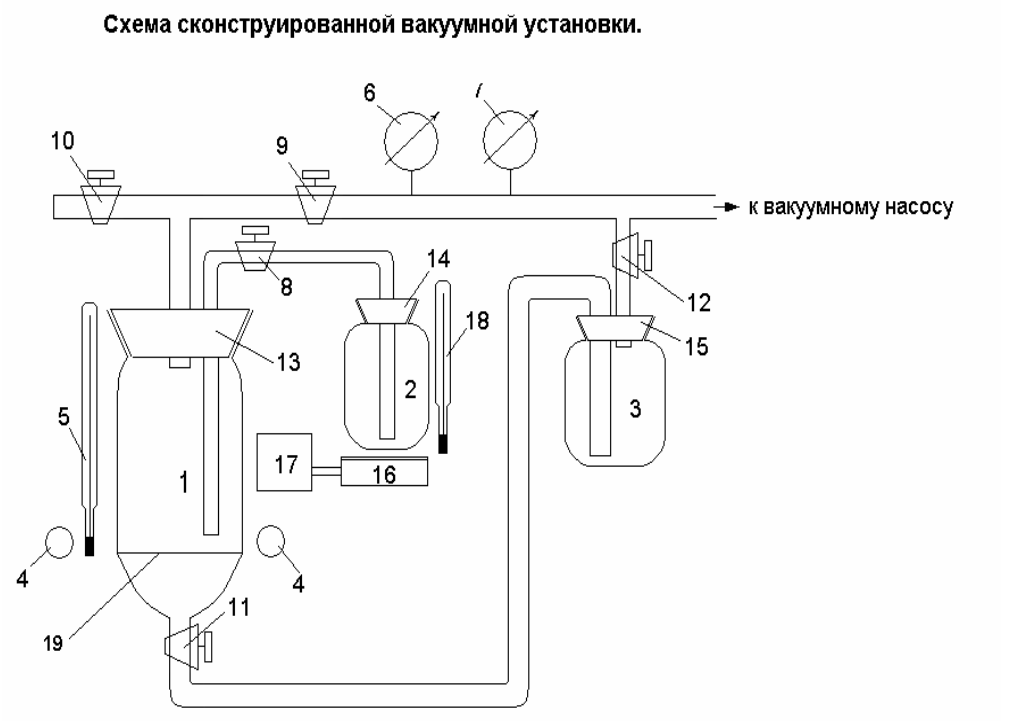


Схема сконструированной вакуумной установки: *1* – рабочая емкость, в которой производится пропитка изумрудов, содержащая перфорированную перегородку 19; *2* – емкость с реагентом пропитки; *3* – емкость для слива реагента пропитки; *4* – нагревательный элемент, с помощью которого нагревается рабочая емкость 1; *5* - термометр, с помощью которого производится контроль температуры рабочей емкости 1; *6, 7* – манометр и термопарный вакуумметр соответственно, показывающие давление в рабочей емкости 1; *8* – кран подачи реагента пропитки. При его открытии реагент под действием разности давлений поступает в рабочую емкость 1; *9* – кран сообщения рабочей емкости 1 и вакуумного насоса; *10* – кран напуска атмосферы; *11* – кран слива лишнего реагента пропитки; *12* – кран сообщения емкости 3 для слива реагента пропитки и вакуумного насоса; *13* – герметичная крышка рабочей емкости 1; *14* – герметичная крышка емкости 2 с реагентом пропитки; *15* – герметичная крышка емкости 3 для слива реагента пропитки; *16* – плитка, для нагрева реагента пропитки; *17* – ЛАТР, с помощью которого регулируется нагрев плитки 16 и, соответственно, емкости 2 с реагентом пропитки; *18* – термометр, с помощью которого контролируется температура нагрева реагента пропитки перед проведением импрегнирования

поверхность изумруда становится лиофильной по отношению к этому реагенту; нагревание способствует улучшению смачивания практически всех выбранных реагентов, причем в случае полиэфирной смолы и кремнийорганического лака это влияние очень значительно (краевой угол уменьшается более чем в 2 раза). Следовательно, пропитку выбранными реагентами необходимо проводить при повышенных температурах, исключение составляет только алкидный лак: при нагревании краевой угол смачивания увеличился, значит и пропитку следует проводить при пониженной температуре.

Результаты проведения импрегнирования выбранными реагентами пропит-

Реагент	Показатель преломления	Пороки, ставшие менее заметными в 10х лупу, % от общего количества	Изменения прозрачности, % + - увеличение, - - уменьшение.	Исходная группа чистоты	Группа чистоты после импрегнирования
Силиконовая пропитка		0	-10	К2 5	К2 5
Акриловая грунтовка	1,53	20	+10	К2 5	К1 4
Алкидный лак	1,53	10	Не значительно	К2 5	К2 5
Лак КО-3	1,43	10	Не значительно	К2 5	К2 5
Цианакрилатный клей	1,48	15	Не значительно	К2 5	К2 5
Нитролак	1,52	20	+10	К2 5	К1 4
Полиэфирная смола	1,55	30	+15 +30	К2 5	5 3
Эпоксидная смола	1,57	50	+30 +50	К2 5	4 3

ки в соответствии с разработанной методикой сведены в таблицу.

Оценка результатов проводилась двумя методами: визуальным и в соответствии с принятой в России системой оценки природных изумрудов кабошонного и ограночного качества. Лучшие результаты показали: эпоксидная смола, полиэфирная смола и нитролак.

Разработанная методика является принципиально новой, т.к. позволяет полностью очистить трещины перед пропиткой (вплоть до вакуумной очистки от воздуха), а также варьировать характеристики реагентов пропитки, улучшая их адгезионные свойства к поверхности изумруда и способствуя тем самым качественному заполнению трещин. Все стадии разработанной методики имеют научное обоснование. Проведенные исследования показали, что важную роль на всех стадиях играют капиллярные явления. Хотя по расчетам они практически не влияют на процесс испарения воды из идеального капилляра (размером 1мкм), для неидеальной трещины возникает необходимость связывания воды для облегчения процесса удаления. Для этой цели оптимально подошел ацетон, т.к. он образует крепкие водородные связи с водой и является также растворителем для всех выбранных реагентов пропитки, поэтому если даже смесь ацетон – вода не испарится полностью, то ее наличие не будет препятствовать заполнению трещин реагентом, а напротив понизит вязкость полимера, улучшит смачивание поверхности изумруда, обеспечив тем самым более качественное заполнение дефекта.

Возникающие капиллярные явления определяют также условия проведения самой пропитки. Как было уже сказано, температура определяет характер смачивания поверхности изумруда выбранными реагентами. Нагревание позволило улучшить смачивание всех реагентов (причем некоторых более чем в два раза), кроме алкидного лака.

Таким образом, кроме известных и широко используемых эпоксидных смол был выявлен ряд реагентов, показавших хорошие результаты по улучшению качества изумрудов. Важно отметить также, что особые перспективы имеют полиэфирные смолы и кремнийорганические полимеры. Последние потому, что обладают химическим сродством к поверхности силикатов. Это известно из работ о химизме взаимодействия кремнийорганических соединений с поверхностью силикатных стекол Сильвестрович С.И. и Оганесовой М.И. и ряда других работ. Очевидные перспективы имеют также окрашенные реагенты пропитки.

Коротко об авторах

Ахметшин Э.А., Поздеева Е.В. – РХТУ им. Д.И. Менделеева.

© Т.Б. Теплова, А.С. Самерханова,

УДК 666.9-16

Т.Б. Теплова, А.С. Самерханова

ТЕНДЕНЦИЯ РАЗВИТИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ТВЕРДЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ, МЕДИЦИНЕ И ЮВЕЛИРНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

Всё большее применение сверхтвердые материалы находят в технике, приборостроении, в оптике, оптоэлектронике, медицине, оборонной промышленности, микроэлектронике при изготовлении часов и в качестве ювелирных вставок.

Одной из важнейших областей применения твердых материалов является микроэлектроника. Интегральная и функциональная микроэлектроника являются фундаментальной базой развития всех современных систем радиоэлектронной аппаратуры.

Современный научно-технический прогресс неразрывно связан с разработкой и освоением новых материалов и прорывных технологий. Именно материалы стали ключевым звеном, определяющим успех многих инженерных решений при создании сложнейшей электронной аппаратуры.

Вот почему независимо от выполняемых функций рабочие характеристики всех элементов определяются свойствами используемых материалов, т.е. выходные параметры аппаратуры находятся в прямой зависимости от применяемых материалов [1].

В пленочных интегральных микросхемах элементы создаются осаждением пленок на специальные платы из диэлектрических материалов — подложки*. Подложка служит механическим основанием, и, будучи диэлектриком, изолирует её элементы [2].

Назначение подложек[4]. В технике ИМС (интегральных микросхем) подложки выполняют две функции:

а) являются основанием, на поверхности или в приповерхностном слое которого по заданному топологическому рисунку формируют структуры ИМС;

б) являются элементом конструкции, обеспечивающим практическое применение ИМС в корпусном или бескорпусном исполнении.

Подложки классифицируют как по структурным признакам, так и по назначению. По структурным признакам подложки подразделяют на аморфные, поликристаллические и монокристалличёские, а по назначению - на подложки для полупроводниковых, пленочных, гибридных ИМС и микросборок.

Размеры подложек выбираются в соответствии со степенью интеграции микросхемы, их материалы — в соответствии с требованиями, предъявляемыми к электрическим, механическим и термическим свойствам подложек. В

** Подложка - заготовка, предназначенная для нанесения на нее элементов гибридных и пленочных ИМС, межэлементных и (или) межкомпонентных соединений, а также контактных площадок.*

Таблица 1

Свойства высокоглиноземистой керамики ВК-100-1

Содержание Al_2O_3	99,7 %
Содержание кристаллической фазы	99,0 %
Температура обжига	1820 °С (водород)
Плотность	3970-3980 кг/м^3
Предел прочности при статическом изгибе	250-320 МПа
Коэффициент термического линейного расширения в интервале 20-700 °С	7,5x10^{-6} °С
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10^{10} Гц	9,6+0,2
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10^{10} Гц	0,0001
Коэффициент теплопроводности при 100 °С	30 Вт/м °С
Чистота поверхности	13-14 кл.

свою очередь эти требования обусловлены заданными параметрами пленочных элементов и выбором технологических методов нанесения пленок [5].

Материал подложек должен иметь высокие объемное и поверхностное удельные сопротивления. Низкие диэлектрические потери снижают потери энергии вследствие поглощения в диэлектрике. Высокая теплопроводность обеспечивает отвод тепла от микросхемы и выравнивание температурного градиента по ее поверхности. Согласование коэффициентов линейного расширения подложки и осаждаемых пленок уменьшает механические напряжения в пленках и тем самым снижает вероятность появления в них микротрещин, разрывов и т.п. Высокая механическая прочность облегчает механическую обработку подложек (для получения требуемой формы и размеров и создания в них отверстий), а также предупреждает поломку подложек при сборке микросхем. Подложки должны быть достаточно термостойкими при пайке и сварке; материал подложки и структура поверхности должны обеспечивать хорошую адгезию осаждаемых пленок к подложке [3].

Перечисленные требования к подложкам являются общими для любого типа микросхем. Итак, применяются следующие материалы для изготовления подложек:

Стекла представляют собой различные системы окислов. Боросиликатное стекло состоит из SiO_2 (80 %), B_2O_3 (12 %) и других окислов (Na_2O, K_2O, Al_2O_3), алюмосиликатное — из SiO_2 (60 %), Al_2O_3 (20 %) и других окислов (Na_2O, CaO, MgO, B_2O_3). Стекла типов С-48-3 и С-41-1 являются бесщелочными.

Керамика — поликристаллическое вещество с зернами сложной структуры, получаемое в результате высокотемпературного отжига (спекания) порошков различных окислов. Алюмооксидная керамика типа «Поликор» состоит из Al_2O_3 (99,8 %), B_2O_3 (0,1 %), MgO (0,1 %). Размер зерен — менее 40 мкм. Бериллиевая керамика содержит от 98 до 99,5 % окиси бериллия BeO [3].

Первым материалом, на котором были реализованы СВЧ-микросхемы (сверхвысоко частотные), была высокоглиноземистая керамика марки ВК-100-1 (Поликор) с нижеприведенными электрофизическими и физико-механическими свойствами (табл. 1).

Единственным производителем подложек из керамики ВК-100-1 был завод “Поликор” г. Кинешма, годовая производительность которого составляла 650

Таблица 2
Свойства СВЧ-ситаллов

Показатели	Ситалл СТ-38-1	Ситалл СТ-32-1
Плотность, кг/м^3	2400	2500
Предел прочности при статическом изгибе, МПа, не менее	100	100
Коэффициент термического линейного расширения, х10^{-6}, оС	38	32
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10^{10} Гц	7,15-7,4	9,7-10
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10^{10} Гц	0,0004	0,0005
Коэффициент теплопроводности при 100°С, Вт/м^{o}С	1,63	1,67
Чистота поверхности, кл.	14	14

тыс. шт./год, при общей потребности 1,6 млн шт./год.

Керамика, особенно бериллиевая, имеет значительно большую теплопроводность по сравнению со стеклами. Кроме того, она обладает большей механической прочностью и лучшей химической стойкостью. Однако большие размеры зерен керамических материалов не позволяют получить удовлетворительный микрорельеф поверхности для тонкопленочных ИС (интегральных схем). Наиболее удовлетворительным микрорельефом обладает керамика с 96 %-ным содержанием Al_2O_3. Керамика с более высоким содержанием $A1_2O$з, например типа «Поликор», имеет слишком гладкие поверхности, не обеспечивающие хорошей адгезии к ним толстых пленок. Полировка мелкозернистой керамики снижает микронеровности, однако вызывает существенные и трудно устранимые загрязнения ее поверхности. Поэтому такая операция не позволяет получить подложки, пригодные для тонкопленочных ИС.

В целях ликвидации создавшегося дефицита, а также обеспечения вновь разрабатываемых радиолокационных комплексов СВЧ-микросхемами по заданию ряда оборонных предприятий НИИ электровакуумного стекла были созданы СВЧ-ситаллы марок СТ-38-1 и СТ-32-1 со следующими техническими характеристиками (табл. 2).

Ситаллы — стеклокерамические материалы, получаемые в результате термообработки (кристаллизации) стекла. Большинство ситаллов характеризуется следующим составом окислов:

1) Li_2O—Al_2O_3 —SiO_2 —TiO_2 ; 2) RO—$A1_2O_3$ — SiO_2— TiO_2 (RO — один из окислов CaO, MgO или BaO).

Ситаллы в 2—3 раза превосходят стекла по механической прочности. Они хорошо прессуются, вытягиваются, прокатываются. Диэлектрические свойства ситаллов лучше, чем стекол, и они практически не уступают керамике.

Из приведенных таблиц видно, что ситалл СТ-32-1, обладая аналогичными с керамикой ВК-100-1 диэлектрическими свойствами, значительно уступает ей по теплофизическим показателям, что в свою очередь не позволяет использовать его для изготовления микросхем с мощными навесными элементами.

Таким образом, для подложек микросхем, а также различных высокочастотных элементов в отрасли использовали два основных вида неорганических материалов: высокоглиноземистую кера-

Таблица 3

Показатели	АРТ-27	БР-1	ОРТ-60	ТС-2
Плотность, кг/м^3	4700	4400	3960	3990
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	114	120	136	144
Микротвердость, ГПа	8,7	7,8	8,9	9,8
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10^{10} Гц	27	35	60	90
Тангенс угла диэлектрических потерь х 10^{-4} при частоте 10^{10} Гц	5	3	4	4
Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости х10^{-6}, град$^{-1}$	0+_20	0+_20	40+_20	55+_20
Чистота поверхности, кл.	13	13	13	13

мику марки ВК-100-1 и СВЧ-ситаллы марок СТ-38-1 и СТ-32-1.

За рубежом для аналогичных целей применяются СВЧ-керамические материалы с диэлектрической проницаемостью от 10 до 100, что позволяет повысить интеграцию микросхем, снизить весовые характеристики радиоэлементов, увеличить срок службы, а также производительность труда за счет групповой технологии.

В целях достижения мирового уровня ЦКБ РМ был разработан параметрический ряд СВЧ-керами-ческих материалов с диэлектрической проницаемостью от 15 до 130.

Разработанные материалы обладают достаточно высокой химической стойкостью, хорошо и без разрушений очищаются, допускают получение микросхем по любой из существующих технологий, в связи с чем нашли широкое применение в приоритетных изделиях отрасли.

Так, керамический материал марки МТ-20 использован в качестве подложек микрополосковых линий с сопротивлением 100 Ом при ширине полосы 20 мкм, что полностью отвечает современному уровню развития СВЧ-техники. Материал марки МТС-25 применен в конструкции современных фазовращателей фазированных антенных решеток, что позволяет увеличить их активность, упростить конструкцию, уменьшить габариты, повысить срок службы и надежность работы.

Материалы марок БА-35 и МТ-60 используются в качестве подложек микросхем, а материалы марок Т-90 и СТП-130 как конденсаторы и резонаторы.

Применение разработанных материалов в изделиях отрасли дало возможность снизить их массогабаритные размеры в 1,5-4 раза при сохранении всех выходных параметров, уменьшить стоимость аппаратуры.

Одновременно с целью улучшения эксплуатационных характеристик указанных материалов ЦКБ РМ проведена ОТР, позволившая получить принципиально новые термостабильные материалы со следующими свойствами (табл. 3).

В настоящее время из всех полупроводниковых материалов наибольшее применение для изготовления полупроводниковых ИМС получил кремний.

Перспективным материалом является лейкосапфир. Бесцветные разновидности сапфира принято называть «белым сапфиром», «восточным алмазом», а также «лейкосапфиром». Но эта разновидность встречается в природе крайне редко, хотя корунды по природе бесцветны. В производстве

применяется синтетический аналог природного лейкосапфира.

Лейкосапфир широко применяют в технике, приборостроении, в оптике, медицине и в качестве ювелирных вставок.

В оптике: Сапфир - основной материал в оптических системах, где предъявляются повышенные требования к оптическим свойствам элементов, где необходима устойчивость к механическим воздействиям, температурам до 1900С, к УФ и ИК излучениям. Для таких применений изготавливаются сапфировые линзы, призмы, световоды, элементы лазеров. Незаменимость сапфира в оптике определяется такими его преимуществами, как:

- высокая прозрачность в широком диапазоне длин волн
- устойчивость к УФ-излучению (ультрафиолетовому)
- устойчивость к механическим повреждениям и высоким температурам.

В микроэлектронике: Сапфир - единственный материал для изготовления основы радиационностойких микросхем, используемых на АЭС и в космосе. Сапфир - материал для изготовления надежных микросхем памяти, гибридных СВЧ микросхем. Незаменимость сапфира в микроэлектронике определяется такими его преимуществами, как:

- высокие диэлектрические свойства;
- особенности кристаллической решетки, позволяющие выращивать на нем эпитаксиальный слой кремния (кремний-на-сапфире, КНС)

В оптоэлектронике: Сапфир - основной материал для изготовления подложек светоизлучающих диодов (СИД) высокой яркости (HB LED) и твердотельных лазеров, дающих синий, белый, зеленый свет, важнейший материал планарной оптики.

Светодиоды в колоссальных количествах потребляются приборостроением (индикаторы), масс-медиа и рекламной индустрией (огромные цветные экраны), дорожными службами (светофоры), применяются в энергосберегающих осветительных приборах (лампы освещения, габаритные огни автомобилей) и т.д.

Незаменимость сапфира в оптоэлектронике определяется такими его преимуществами, как:

- высокая прозрачность
- особенности кристаллической решетки, позволяющие выращивать на сапфире эпитаксиальный слой нитрида галлия (GaN)
- основу создания цветных светодиодов

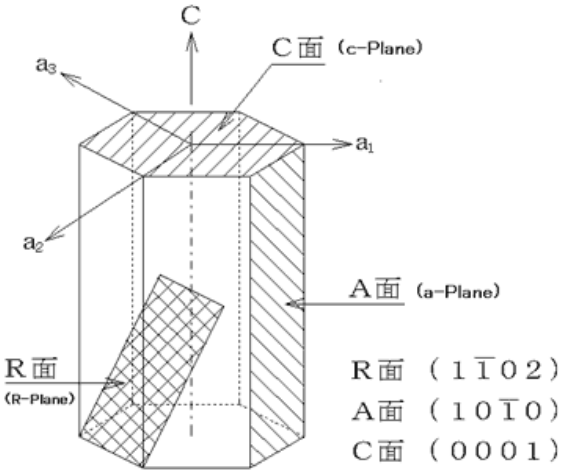
В часовой промышленности: Сапфир - единственный материал для изготовления "нецарапаемых" часовых стекол разных форм. Популярность сапфира в часовой промышленности определяется такими свойствами, как:

- высокая поверхностная прочность (царапины на сапфире оставляет только алмаз)
- почти идеальная прозрачность- неизменность цвета после УФ облучения, используемого при склеивании часовых корпусов.

В машино- и приборостроении: Сапфир - материал для изготовления:

- приборных смотровых окон и иллюминаторов, выдерживающих сверхвысокие температуры и перепады давления или вакуум, устойчивых к агрессивным средам, механическим повреждениям и излучениям- износоустойчивых окон сканеров

Рис. 1. Кристалл лейкосапфира



- износоустойчивых деталей (подшипники, нитеводы, направляющие).

- труб плазмогенераторов и тензодатчиков (датчиков давления).

Ни один материал не обеспечивает возможности визуального наблюдения процессов в камерах со сверхвысоким давлением (или разряжением), температурой, химической агрессивностью среды. С внедрением систем сканирования штрих-кодов на конвейерах производств и в торговле сапфир становится основным материалом для неповреждаемых окон стационарных и ручных сканеров.

Популярность сапфира в вакуумной технике и машиностроении определяется такими свойствами, как:

- высочайшая прочность

- устойчивость к механическим повреждениям и высоким температурам

- малый коэффициент трения и износоустойчивость

В медицине: Сапфир - материал для изготовления:

- прозрачных и сверхтонких лезвий для хирургии.

- химически пассивных оптических элементов диагностических приборов, выдерживающих высокотемпературную стерилизацию.

Особая роль сапфира в медицине определяется:

- возможностью сделать прочными очень тонкие изделия (острие лезвия скальпеля),

- химическая и биологическая пассивность,

- прозрачность,

- возможность стерилизации высокой температурой или УФ-излучением

В оборонной промышленности: Сапфир - материал для изготовления:

- сверхпрочных и оптически совершенных защитных колпаков для головных частей самонаводящихся ракет, визиров и окон, устойчивых к УФ и ИК излучениям КНС-микро-схем, устойчивых к ионизирующим излучениям, СВЧ-компонентов радиолокационных систем.

В ювелирной промышленности: сапфир также является одним из материалов, из которого делаются вставки в различные ювелирные украшения. Поскольку камень твёрдый, исключительно красивый внешне, с прекрасной игрой света и износостойкий, ему чаще отдают предпочтения по сравнению с алмазом и другим имитациям алмаза.

Синтетический сапфир – монокристаллическая форма корунда, Al_2O_3 (рис. 1). Сапфир - окись алюминия в самой чистой форме без пористости или включений, делает его теоретически плотным. Комбинация благоприятных химических, электрических, ме-ханических, оптических, поверхностных, тепловых

Таблица 4

Материал диэлектрика	Удельное сопротивление, Ом *см	Диэл. пост.	Диэлектрические потери на частоте 10^6 Гц	Теплопроводность, кал/см*с °С	Коэф линей. расш. 10-6 / °С
Боросиликатное стекло	107	4,6	$6,2*10^{-3}$	0,0027	3,25
Алюмооксидная керамика типа «Поликор»	1014	10,8	$2*10^{-4}$	0,075—0,08	7,5—7,8
Кварцевое стекло	1016	4	$3,8*10^{-4}$	0,0036	0,56—0,6
Ситаллы	1013—1014	6,5	$6*10^{-3}$	0,005—0,009	5
Лейкосапфир	1011	8,6	$2*10^{-4}$	0,0055	5

свойств и свойства долговечности делает сапфир, предпочтительным материалом для точных систем и составляющих проектов. Сапфир в качестве полупроводника - лучший выбор по сравнению с другими синтетическими монокристаллами. В табл. 4 приведены характеристики диэлектрических материалов, которые в большей или меньшей степени удовлетворяют требованиям, предъявляемым к подложкам для тонко- и толстопленочных ИС.

Лейкосапфир характеризуется хорошими диэлектрическими свойствами, по сравнению с другими материалами используемыми в микроэлектронике (табл. 4). Хотя синтез материала освоен недавно, но стоимость его относительно не велика. Однако технология его обработки крайне затруднена из-за высокой твёрдости материала, и соответственно, из-за сложности его обработки.

Традиционными способами обработки лейкосапфира является **шлифование и полирование [6]**. При необходимости снятия больших припусков с деталей используется шлифование связанным абразивом, когда обработка ведется на режимах с максимально возможной производительностью.

Одним из наиболее простых и высокопроизводительных методов получения поверхности высокого качества является **абразивное полирование** (обработка свободным абразивом).

Одним из эффективных способов уменьшения глубины нарушенного слоя является **химико-механичес-кое полирование,** при котором механически удаляется слой, образованный за счет химического действия жидкостей. Данный метод нельзя признать до конца изученным.

Также к способам обработки лейкосапфира можно добавить **ультразвуковой (УЗ) способ обработки,** его преимущества перед другими заключаются в возможности обрабатывать непроводящие и непрозрачные материалы, а также в отсутствии после обработки остаточных напряжений, приводящих при использовании других способов к образованию трещин на обрабатываемой поверхности.

Но принципиально новый способ обработки твердых минералов и кристаллов является **шлифование в режиме пластичности**. Сущность процесса микрошлифования в режиме пластичности целесообразно изучать на основе физической мезомеханики, разработанной академиком РАН В.Е. Паниным, связывающей движение дислокаций на микромасштабном уровне с интегральными механическими характеристиками процессов, происходящих на макромас-

Рис. 2. Обработка подложки на станке АН15Ф4

штабном уровне, с учетом состава материала, его внутренней структуры и условий нагружения [7].

На шлифовальной установке, обладающей достаточной жесткостью и высокой точностью, можно при малой глубине резания и низких врезных подачах все хрупкие материалы обра-батывать в режиме пластического течения, а не высокого качества. При малой глубине резания и низких врезных подачах все хрупкие материалы могут обрабатываться в режиме пластического течения, а не хрупкого разрушения [8].

В результате заготовки из хрупких материалов можно механически обрабатывать в регулируемом режиме, при этом обеспечивается чистота обработки поверхности, ранее достижимая только в нерегулируемых процессах, осуществляемых в режиме пластичности, таких как полирование и притирка. К тому же размерно-регулируемое микрошлифование, осуществляемое на станочных модулях с ЧПУ, позволяет автоматизировать процесс шлифования подложек с получением стабильных выходных параметров заданного качества.

Положительные результаты микрошлифования поверхности алмаза в твердом направлении (111) позволяют рекомендовать этот способ обработки для микрошлифования подложек из алмаза [9]. Натуральный и искусственный алмаз благодаря своим физическим свойствам является перспективным материалом для применения в микроэлектронике, однако трудность и высокая стоимость его обработки ограничивают его применение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Крушеневич С.* В недрах микросхем (ч.3.) №5 (228), 2003

2. *Малышева И.А.* Технология производства интегральных микросхем.- М.: Радио и связь, 1991.

3. *Игумнов Д.В., Королев Г.В., Громов И.С.* Основы мкроэлектроники. - М.: Высшая школа, 1991.

4. *Ломов А.Б.* Проектирование гибридных интегральных микросхем. - М.: МКИП, 1997.

5. *Ефимов И.Е., Козырь И.Я., Горбунов Ю.И.* Микроэлектроника. Учебное пособие для ВУЗов. – М.: Высшая школа, 1986.

6. *Теплова Т.Б., Коньшин А.С., Соловьев В.В., Ашкинази Е.Е.* О выборе рациональных режимов процесса микрошлифования монокристалла лейкосапфира. – М: Изд-во МГГУ, ГИАБ, №8, 2005.

7. *Панин В.Е.//* В кн.: Физика хрупкого разрушения. Ч. 1. - Киев: изд-во ИМП АН УССР, 1976.

8. *Коньшин А.С., Сильченко О.Б., Сноу Б.Д.* Способ микрошлифования твёрдоструктурных материалов и устройство для его реализации. Патент РФ №2165837 от 27.04.2001 г.

9. *Теплова Т.Б.* Обоснование рациональных режимов шлифования алмазов при их огранке. Авт.-реф. диссертации на соискателя учёной степени кандидата технических наук МГГУ (Москва) – 2002 г.

Коротко об авторах

Теплова Т.Б. – кандидат технических наук, докторант, кафедра «Физика горных пород и процессов»,

Самерханова А.С. – студент, кафедра «Технология художественной обработки материалов»,

Московский государственный горный университет.