

**Ключевые слова:**

нанотехнологии,
хрупкие материалы,
полупроводниково-
е производство,
квазипластичность,
мезомеханика

ПОВЕРХНОСТНАЯ ОБРАБОТКА ТВЕРДЫХ ХРУПКИХ МИНЕРАЛОВ В РЕЖИМЕ КВАЗИПЛАСТИЧНОСТИ

Татьяна ТЕПЛОВА

Представлен перспективный способ получения высококачественной поверхности твердых хрупких кристаллических материалов нанометрового рельефа за счет удаления поверхностного слоя в режиме квазипластичности.

Посвящается памяти моих учителей Анатолия Сергеевича Коньшина и Олега Михайловича Гридина.

Всё большее применение твердые хрупкие материалы находят в технике, приборостроении, в оптике, оптоэлектронике, медицине, оборонной промышленности, микроэлектронике. Минералы, особенно в форме кристаллических образований (кристаллов), находят широкое применение при производстве высокотехнологичных изделий в сфере нанотехнологий. Именно материалы стали ключевым звеном, определяющим успех многих инженерных решений при создании сложнейшей электронной аппаратуры.

Основной тенденцией, с помощью которой микроэлектроника достигает новых показателей, является минимизация размеров отмеченных структур. Геометрические размеры элементов определяют заданные параметры и свойства приборов, а отклонения размеров приводят не только к отклонениям технических характеристик, но и к потере работоспособности.

Неуклонное совершенствование микроэлектронных приборов сократило минимальные размеры элементов до субмикронных величин, а плотность их упаковки на плоской подложке увеличило на несколько порядков.

Подложка – заготовка, предназначенная для нанесения на нее элементов гибридных и пленочных интегральных микросхем (ИМС), контактных площадок, межэлементных и (или) межкомпонентных соединений. Подложка служит механическим

основанием, и, будучи диэлектриком, изолирует ее элементы, а также обеспечивает отвод тепла от работающей микросхемы.

Для изготовления микросхем требуются полупроводниковые материалы в виде пластин, вырезанных из монокристаллических слитков, имеющих форму стержня круглого сечения [2].

Материал подложки должен иметь ряд специфических свойств: высокое объемное и поверхностное удельное сопротивление. Низкие диэлектрические потери снижают потери энергии вследствие поглощения в диэлектрике. Высокая теплопроводность обеспечивает отвод тепла от микросхемы и выравнивание температурного баланса 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 предупреждает поломку подложек при сборке микросхем. Подложки должны быть достаточно термостойкими при пайке и сварке; материал подложки и структура поверхности должны обеспечивать хорошую осаждаемость пленок к подложке. Перечисленные требования к подложкам являются общими для любого типа микросхем [1]. Поэтому независимо от выполняемых функций, рабочие характеристики всех элементов определяются свойствами используемых материалов.

В настоящее время применяется ряд основных материалов для изготовления подложек. Кремний – основной материал полупроводникового производства. Но при тенденции миниатюризации в электронной промышленности для изготовления подложек ИМС требуются материалы с лучшими теплофизическими показателями. Востребованными и перспективными материалами являются лейкосапфир, алмаз, карбид кремния, арсенид галлия.

В настоящее время полупроводниковые схемы изготавливаются с применением эпитаксии. Эпитаксия – это метод послойного выращивания одного кристаллического твердого тела на поверхности другого (называемого подложкой), при котором растущий кристалл наследует кристаллографическую структуру подложки.

Однако для поверхностной обработки твердых хрупких материалов, таких как алмаз, сапфир, карбид кремния, проблему представляет получение обработанной поверхности высокого качества с нанометровой шероховатостью поверхности и минимальным количеством дефектов, внесенных процессом обработки.

Качество поверхностного слоя подложек существенно влияет на структурное совершенство эпитаксиального слоя. Дислокации и дефекты поверхностного слоя ухудшают эксплуатационные свойства микросхем. При поверхностной обработке материалов на первый план выходит вопрос недопустимости возникновения сколов, трещин, микродефектов и дислокаций в основной массе материала.

Традиционным способом обработки твердых хрупких минералов (в том числе кристаллов) является механическое шлифование свободным и связанным абразивом.

Для обеспечения требуемых параметров разработаны различные технологические варианты изготовления пластин. В зависимости от характеристик обрабатываемого материала варианты изготовления имеют свои особенности, но, как правило, состоят из одних и тех же базовых операций, применяемых в различных сочетаниях. К базовым операциям относятся:

- рост кристалла;
- калибровка слитка;
- разделение на пластины;
- формирование фасок;
- шлифование пластины свободным или связанным абразивом;
- полирование;
- очистка.

Полученные после разрезания слитка полупроводниковые пластины (подложки) обладают рядом нарушений, к которым относятся наличие механически нарушенного слоя, неплоскостность и непло-

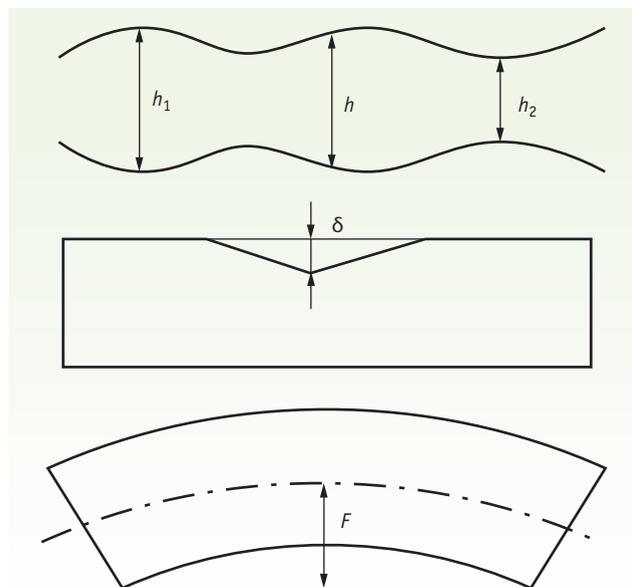


Рис. 1. Примеры дефектов пластин: $\Delta h = h_2 - h_1$ – разность толщин; δ – неплоскостность; F – прогиб

скопараллельность сторон, изгиб и большой разброс по толщине. Примеры дефектов в пластинах приведены на рис. 1. Глубина механически нарушенного слоя является основной характеристикой качества обработки полупроводниковых пластин. Этот слой распространяется от обработанной поверхности вглубь объема полупроводникового материала. Наибольшая глубина залегания нарушенного слоя образуется при резке слитка на пластины, процессы шлифовки и полировки приводят к уменьшению глубины залегания этого слоя.

Качество поверхности полупроводниковых пластин оценивается с геометрической и физической точек зрения [8]. С геометрической точки зрения качество определяется неровностями, выступами и впадинами реальной поверхности, с физической – отклонением свойств верхних слоев материала от свойств материала сердцевины. Если рассматривать реальную необработанную подложку в разрезе, то можно выделить рельефный слой, который определяет геометрические отклонения от идеального поверхностного слоя; трещиноватый слой, в котором нарушена целостность поверхности; пластически деформированный слой; напряженный, упругодеформированный слой (рис. 2).

Высота дефектного слоя (H) определяется способом обработки. Чем грубее обработка, тем дефектный слой больше. К причинам появления дефектного слоя следует отнести упругие, пластические деформации и деформации разрушения, которые имеют место в процессе обработки, нагрев поверхностного слоя, химические явления, присутствующие

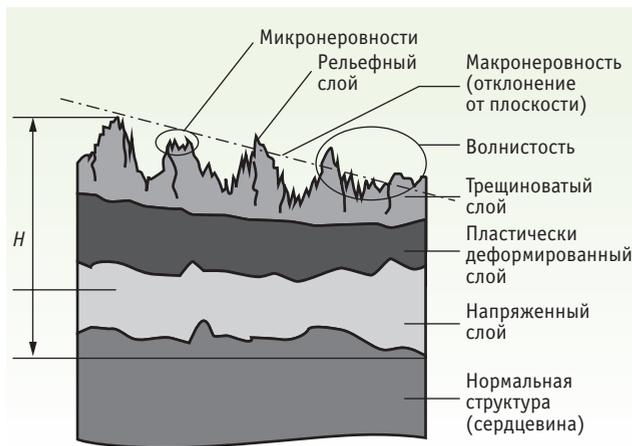


Рис. 2. Вид подложки в разрезе

щие в зоне обработки: окисление, образование других химических соединений.

К основным видам дефектов поверхности относятся:

- макронеровности – единичные, неповторяющиеся отклонения поверхности (конусность, непараллельность, овальность);
- волнистость – периодически повторяющиеся выступы и впадины на поверхности;
- микронеровности – выступы и впадины на небольших участках поверхности.

Слой материала, подлежащего удалению в процессе последующей обработки пластины, называется припуском (равным H) на обработку. Минимальное значение припуска должно обеспечивать удаление микронеровностей и дефектного слоя, получаемого при предшествующей обработке. В процессе обработки полупроводниковой подложки для получения нужного качества поверхности (чистоты) припуск удаляется не сразу, а постепенно – в несколько этапов. При этом предварительный припуск должен быть как можно большим, чтобы удалить дефектный слой H , но после предварительной обработки появляется новый дефектный слой, только меньшего размера.

После такой обработки получается поверхность с шероховатостью около 200 нм и нарушенным подповерхностным слоем. Для достижения необходимой шероховатости (например, для лейкосапфира, представляющего собой бесцветный сапфир, в котором нет посторонних примесей, – 0,2 нм) при изготовлении подложек заготовка подвергается полированию и травлению в агрессивных средах [5]. При таком способе проблематично достижение стабильно повторяющихся параметров процесса обработки, высок процент брака интегральных микросхем, связанный с обработкой поверхностей подложек.

Следовательно, актуальными являются задачи обработки изделий из лейкосапфира, моно- и поликристаллического алмаза, карбида кремния и дру-

гих твердых материалов с достижением требуемых для применения в промышленности выходных качественных параметров, а также задачи автоматизации процесса для изготовления больших партий изделий из этих материалов.

Перспективным способом получения высококачественной поверхности изделий из твердых хрупких кристаллических материалов нанометрового рельефа является удаление поверхностного слоя в режиме квазипластичности [13].

Квазипластичность – проявление пластичных свойств поверхностным слоем твердых хрупких материалов при обработке. Технология квазипластичной обработки твердых материалов основана на обеспечении механического воздействия на обрабатываемую поверхность (ОП) материала при подаче шлифовального круга (ШК), составляющей доли мкм/ход. При данных подачах контактное взаимодействие зерен шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью создает переменное механическое поле, под воздействием которого происходит направленное квазипластичное удаление поверхностного слоя (а не хрупкое разрушение) с формированием поверхности нанометровой шероховатости и с минимальными дефектами (не более 50 нм), внесенными процессом обработки.

Исследования данного способа проводились с середины прошлого века. Предположение о возможности шлифования хрупких материалов в режиме квазипластичности было сделано в 1954 году [12, 19]. Было установлено, что при абразивном износе каменной соли доминирующим механизмом удаления материала являлось не хрупкое разрушение, а пластичное течение. Воспроизводимое экспериментальное подтверждение протекания пластической деформации при шлифовании заготовок из хрупкого стекла было получено в 1975 году [20].

Экспериментально было подтверждено, что при шлифовании с регулированием скорости поперечной подачи порядка нескольких см/оборот шлифовального круга стало возможным обрабатывать хрупкие материалы так, что преобладающим механизмом удаления материала становится не разрушение, а пластичное течение. Этот процесс стал известен как шлифование в режиме пластичности. В дальнейшем будем называть его квазипластичным, а область, в которой он проявляется, квазипластичной областью, поскольку происходящие в ней изменения отличаются от описанных в литературе классических зависимостей для пластичных материалов. Квазипластическая деформация материалов зависит не от их природы, а только от глубины резания (менее 1 мкм). При соблюдении этих условий формирование подобных квазипластически деформированных областей наблюдали при обработке разнообразных кристаллов и керамических материалов.

Исследования процесса шлифования в режиме квазипластичности впервые были проведены с использованием шлифовальной установки с рабочим инструментом в виде одной абразивной частицы. Испытания были проведены на разнообразных хрупких материалах. В результате проведенных экспериментов было установлено, что стадийность процесса удаления материала зависит от усилия, действующего на абразивное зерно, а также установлена связь процесса удаления материалов с усилием и глубиной резания.

Было установлено, что меньшему усилию (нормальной составляющей силы резания) соответствует меньшее хрупкое разрушение поверхности. В восьмидесятых годах 20 века Т.Г. Бифано и Т.А. Доу было создано первое устройство PEGASUS, разработанное для того, чтобы для повышения чистоты обработки при шлифовании использовать малые (0,2 мкм) поперечные подачи [16, 17, 18]. На этой установке было осуществлено шлифование некоторых хрупких кристаллических материалов в режиме квазипластичности. Исследования позволили установить, что существует интервал врезных подач (5–7 нм) на оборот шлифовального круга, которые традиционно не используются ни при шлифовании, ни при полировании.

При шлифовании практически всех хрупких материалов удаление ПС протекает путем локализованного разрушения. В результате исследований был сделан вывод о том, что существует интервал скоростей, соответствующий переходу от абразивной обработки в режиме хрупкости к обработке в режиме квазипластичности для различных видов стекол, керамики и полупроводников. На основании этих работ при шлифовании твердых материалов в режиме квазипластичности было установлено, что для предотвращения заметного хрупкого разрушения при шлифовании стекла точность регулирования врезной подачи на оборот шлифовального круга должна быть в пределах 5 нм и выше. Для достижения такой точности требуются чрезвычайно жесткие конструктивные связи, которые не допускают значительных взаимных перемещений обрабатываемой детали и шлифовального круга. На рис. 3 изображена экспериментальная установка PEGASUS.

В серии экспериментов по шлифованию кварцевого стекла на установке PEGASUS было продемонстрировано существование такой переходной скорости подачи.

Степень разрушения поверхностного слоя оценивалась с помощью растрового электронного микроскопа. Изучение влияния свойств материала на критическую подачу хрупко-квазипластического перехода при шлифовании на установке PEGASUS было проведено на большом количестве аморфных стекол, монокристаллов и керамических материалов. Было

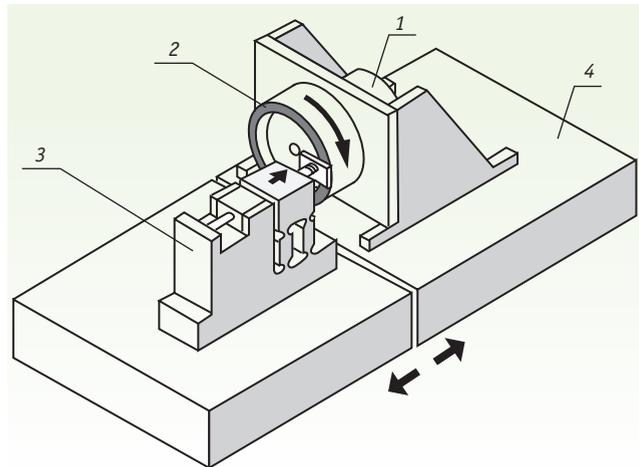


Рис. 3. Установка PEGASUS: 1 – шпиндель на воздушном подшипнике, 2 – шлифовальный круг, 3 – устройство крепления заготовки, 4 – направляющая типа «ласточкин хвост»

установлено, что изменение поперечной подачи на оборот шлифовального круга при шлифовании с 75 до 2 нм приводит к уменьшению доли поверхности, охваченной разрушением – с 99 до 5% (рис. 4). Был сделан вывод о том, что по мере уменьшения глубины съема материала за один проход более вероятным становится удаление материала посредством квазипластического течения. На различных исследуемых материалах поперечная подача и глубина резания, при которой происходит хрупко-пластический переход, зависит от свойств материала, отвечающих за характер его квазипластической деформации и разрушения.

До середины 20 века проблемы пластической деформации и разрушения твердых тел рассматри-

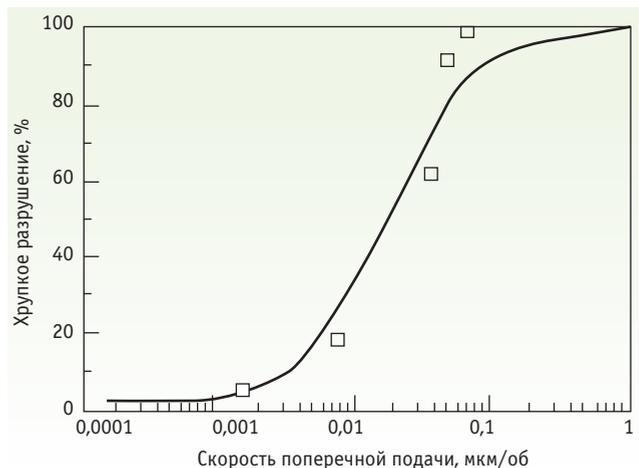


Рис. 4. Хрупко-пластический переход в кварцевом стекле. Зависимость доли поверхности, подвергшейся хрупкому разрушению от скорости подачи

вались исходя из теоретических положений механики сплошной среды. Они позволяли успешно решать широкий круг инженерных задач на макроуровне. Но для понимания механизмов пластической деформации и разрушения необходимы были физические подходы на микроуровне. В пятидесятые годы 20 века с применением электронной микроскопии для исследования тонкой структуры кристаллов получила развитие теория дислокаций. Современная теория дислокаций в кристаллах позволяет качественно объяснить многие закономерности поведения твердых тел в различных условиях нагружения.

Однако рассчитать кривую «напряжение – деформация» на основе только микроскопических представлений теории дислокаций не представлялось возможным. Все попытки прямого перехода от микроподходов физики к макроподходам механики не достигли желаемого результата. Необходимость рассмотрения процессов, развивающихся в деформируемом твердом теле на промежуточном между микро- и макромасштабном уровне, привело к возникновению физической мезомеханики, изучающей закономерности процессов, протекающих на мезоскопическом уровне. Основные работы в области физической мезомеханики велись под руководством академика В.Е. Панина [9].

Физическая мезомеханика исследует вопросы, лежащие на стыке физики и механики деформируемого твердого тела. Применяющийся в физической мезомеханике термин «масштабные уровни деформации» предполагает четкую классификацию размеров в иерархии масштабов: микро, мезо и макро. Такая классификация конкретизирует масштабы внутренней структуры, но по своей сути неоднозначна, так как зависит от объекта исследования. Все структурные уровни деформации относятся к классу мезоскопических масштабов независимо от их конкретных размеров. Термин «мезоскопический» в физической мезомеханике по смыслу означает «промежуточный» между твердым телом, как сплошной средой, и его конкретной кристаллической решеткой.

Если в классической физике и механике разрушения (при рассмотрении теории распространения трещины) в качестве основополагающих параметров рассматриваются критические значения концентрации напряжений в вершине трещины и степени поврежденности материала в зоне перед вершиной трещины, то в физической мезомеханике процесс разрушения рассматривается как завершающая стадия деформации, связанная с потерей устойчивости нагруженного твердого тела, как целого. Мезомеханика рассматривает деформируемый кристалл как непрерывно меняющий свою исходную кристаллическую структуру, формируя на различных мезомасштабных уровнях диссипативные субструктуры.

В соответствии с основными положениями физической мезомеханики твердое тело рассматривают

как многоуровневую самоорганизующуюся систему, в которой микро-, мезо- и макроуровни органически взаимосвязаны и в которой движение структурных элементов на всех уровнях подчиняется закону подобия в условиях нагружения. В заданных граничных условиях деформация осуществляется по схеме «сдвиг + поворот» на всех структурных уровнях [10].

В соответствии с принципами физической мезомеханики пластическое течение деформируемого твердого тела развивается с потерей его сдвиговой устойчивости на различных структурных уровнях. Каждый структурный уровень пластического течения связан с соответствующим масштабным уровнем концентраторов напряжений. Все типы дефектов в кристалле рассматриваются как локальные метастабильные структуры, возникающие в зонах концентраторов напряжений различного масштаба.

Базовый концентратор напряжений возникает в месте приложения внешней нагрузки к деформируемому твердому телу. Он генерирует все первичные сдвиги. По мере повышения приложенного напряжения вначале кристалл деформируется чисто упруго, подчиняясь закону Гука. Эта деформация обратима. При нагружении структурно неоднородного материала выше предела текучести возникают многочисленные локальные концентраторы напряжений критической величины, в зоне которых локальная сдвиговая устойчивость исходной кристаллической решетки теряется. В локальных зонах кристалла рождаются фрагменты другой структуры (рис. 5а). При продолжающемся увеличении нагрузки локальное структурное превращение распространяется эстафетно, что воспринимается как движение дислокации в кристалле. Концентратор напряжений релаксирует, и распределение напряжений в кристалле становится более однородным. При этом обеспечивается высокая подвижность дислокаций в кристаллической решетке. На макромасштабном уровне дислокации играют фундаментальную роль. Формируются диссипативные дислокационные структуры. В деформируемом материале возникает мезоскопическая субструктура, классифицируемая как мезоуровень I (рис. 5б).

С ростом деформирующего напряжения наступает второй этап пластического течения нагруженного материала – возникает локальная потеря сдвиговой устойчивости нагружаемого образца как целого. На мезоконцентраторах напряжений зарождаются потоки деформационных дефектов, которые движутся в направлении максимальных касательных напряжений независимо от кристаллографической ориентации решетки (рис. 5в). Это уже не дислокации, а плоские мезодефекты. Наиболее распространенными из них являются полосы деформации. Каждый такой поток реализует одновременно сильно локализован-

ные сдвиги и развороты материала. Кристаллическая структура исходного материала начинает фрагментироваться. Но на этом этапе деформации материал перед мезополосой сохраняет еще высокую прочность и рождает мощные встречные напряжения, которые тормозят движение потока дефектов.

При продолжении нагружения в деформируемом образце происходит глобальная потеря сдвиговой устойчивости во всем поперечном сечении нагруженного образца. Пластическая деформация локализуется в одном сечении образца в виде одной или двух сопряженных макрополос деформации (рис. 5г). Как внутри макрополос, так и в окружающем материале возникает фрагментация материала, определяющая стадию его предразрушения, вызывая в нем сильный локальный материальный поворот. Разрушение образца происходит как завершающая стадия его фрагментации. Глобальная потеря сдвиговой устойчивости во всем сечении образца обуславливает выход деформации на макроуровень и разделение образца на части [11].

На базе работ академика В.И. Панина в развитие данной темы О.Б. Сильченко и А.С. Коньшиным созданы теория и методы размерно-регулируемой и бездефектной обработки твердоструктурных минералов [3]. Под руководством А.С. Коньшина на основе фундаментальных работ проф. В.А. Кудинова, проф. В.А. Ратмирова, проф. А.И. Левина и В.И. Бобрин в ЭНИМСе был создан станочный модуль АН15ф4 с ЧПУ (рис. 6) [4, 6, 7]. Основные параметры станочного модуля приведены в табл. 2.

Основные направления движения частей упругой обрабатывающей системы (УОС) станочного модуля приведены на рис. 7.

При испытании макетного образца станочного модуля с ЧПУ получены положительные результаты при обработке керамических видеоголовок, изделий из сапфира, фианита, поликристаллических и натуральных алмазов.

Суть способа состоит в том, что при шлифовании твердых кристаллов в определенном контролируемом интервале усилий прижима обработка поверхностного слоя кристалла происходит в области квазипластичности, не переходя в область хрупкого разрушения элементов поверхностного слоя. В этом интервале усилий прижима шлифовального круга и обрабатываемого образца контактное взаимодействие зерен шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью создает периодическое переменное механическое поле, под воздействием которого происходит направленное квазипластичное удаление поверхностного слоя материала с формированием поверхности нанометровой шероховатости.

В результате получается обработанная поверхность малой шероховатости (2–10 нм) при минимуме дефектов, привнесенных технологическим про-

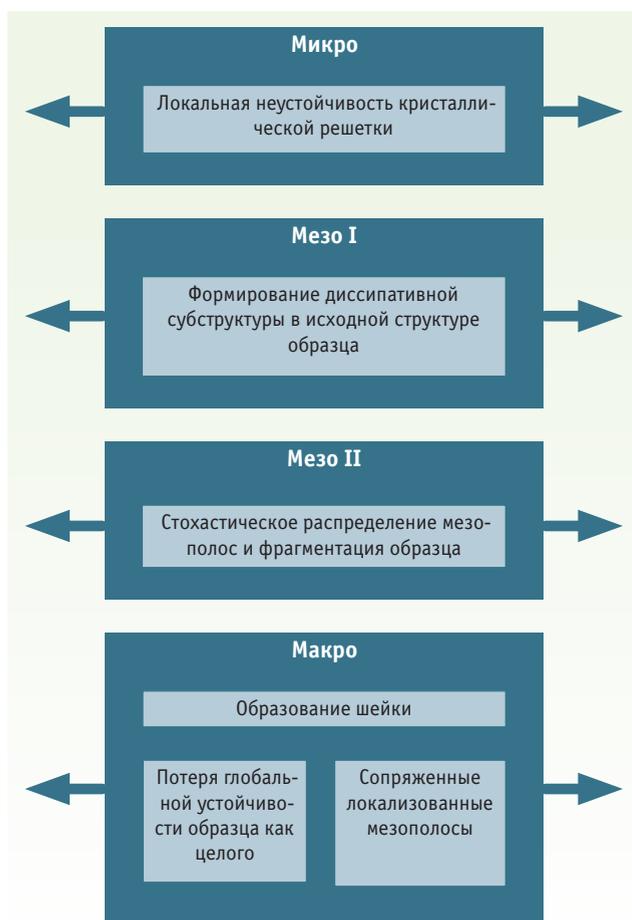


Рис. 5. Масштабные уровни потери сдвиговой устойчивости в деформируемом твердом теле: а – микро; б – мезо I; в – возникает микроконцентратор напряжений под действием мезо II; г – макро



Рис. 6. Станочный модуль АН15ф4

Таблица 2. Параметры станочного модуля АН15Ф4

Параметр	Величина
Число управляемых осей	6
Число позиций для установки режущего инструмента и контрольно-измерительных средств (револьверная головка)	3
Число шпинделей	3
Дискретность задания и отработки перемещений	
оси X, Y, мкм	0,05
ось Z, мкм	0,05–0,03
оси A, B, град.	0,0001
Максимальная величина перемещений	
линейная ось X, мм	1000
линейная ось Y, мм	300
линейная ось Z, мм	10
круговая ось A, град.	90
круговая ось B, град.	Неогранич.
Диапазон рабочих подач, мм/мин	0,06–4500
Диапазон частоты вращения шпинделей, об/мин	3000–6000
Количество мест в сменной кассете, шт.	15
Число одновременно обрабатываемых изделий, шт.	5
Шероховатость обработанной поверхности Rz, мкм	0,032–0,05
Диаметр алмазного инструмента, мм	250
Суммарная подводимая мощность, кВт	7

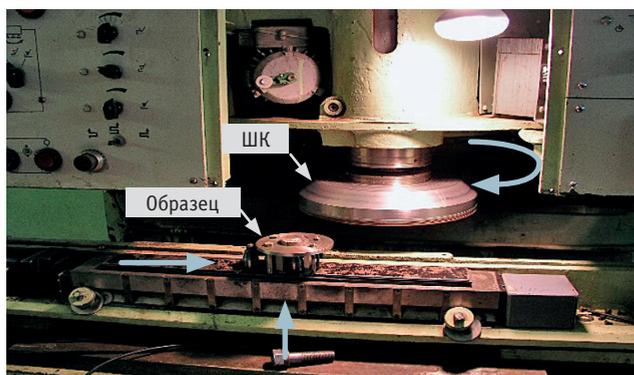


Рис. 7. Основные направления движения частей УОС станочного модуля АН15Ф4

цессом обработки. Процент брака составляет 10% (что гораздо меньше брака, получаемого при традиционном шлифовании подложек). Выход годной продукции увеличивается за счет уменьшения потерь при шлифовании нарушенного слоя. Подложки, обработанные указанным способом, могут работать при более высоких температурах за счет пониженной дефектности. Верхняя граница не установлена.

Технология может применяться для лейкосапфировых изделий, требующих повышенной проч-

ности при эксплуатации, а также в гранильном производстве для получения новых форм бриллиантов (одна из которых кабошон или элементы кабошона), так как огранка алмазов может производиться как в «мягком», так и в «твердом» направлениях. Технология может быть применена и в других отраслях промышленности при создании высокотехнологичной продукции [15]. В результате экспериментального шлифования по предлагаемой технологии на этапе алмазного шлифования были получены поверхности поликристаллического и природного алмаза (ориентированного в твердом направлении) и лейкосапфира нанометровой шероховатости.

При квазипластичной обработке можно проводить постоянный активный бесконтактный контроль процесса обработки, на основе которого автоматизировать процесс поверхностной обработки. В результате появляется возможность получения большого количества изделий (серийная обработка) из твердых хрупких материалов со стабильным качеством поверхностного слоя нанометровой шероховатости [14].

ЛИТЕРАТУРА

1. Игумнов Д.В., Королев Г.В., Громов И.С. Основы микроэлектроники. М.: Высшая школа, 1991.
2. Карбань В.И., Борзаков Ю.И. Обработка монокристаллов в микроэлектронике. М.: Радио и связь, 1988. 104 с.
3. Коньшин А.С., Сильченко О.Б., Сноу Б.Д. Способ микрошлифования твердоструктурных материалов и устройство для его реализации. Патент РФ № 2165837 от 27.04.2001.
4. Коньшин А.С. Управление процессом шлифования для повышения производительности и точности при одновременной многоинструментальной обработке. Автореф. дис. канд. техн. наук. М.: ЭНИМС, 1987.
5. Куланов Ю.М., Хрульков В.А., Дудин-Барковский И.В. Предотвращение дефектов при шлифовании. М.: Машиностроение, 1975. 144 с.
6. Кудинов В.А., Коньшин А.С. Перспективы производства шлифовальных станков с ЧПУ // В кн.: Прогрессивные процессы абразивно-алмазной обработки, инструмент и его рациональная эксплуатация. Тез. докл. всесоюз. науч.-техн. симпозиума «Шлифование-82». Волжский, 1982.
7. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967.
8. Малышева А.М. Технология производства интегральных микросхем. М.: Радио и связь, 1991.
9. Панин В.Е., Гриняев Ю.В. Физическая мезомеханика — новая парадигма на стыке физики и механики деформируемого твердого тела // Физическая мезомеханика. 2003. Т. 6. № 4. С. 9–36.

10. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985. 229 с.
11. Панин В.Е., Фомин В.М., Титов В.М. Физические принципы мезомеханики поверхностных слоев и внутренних границ раздела в деформируемом твердом теле // Физическая мезомеханика. 2003. Т. 6. № 2. С. 5–14.
12. Сильченко О.Б. Теория и методы размерно-регулируемой и бездефектной обработки твердоструктурных минералов резанием. Дис. докт. техн. наук. М.: НИИ «Научный центр», 2000.
13. Теплова Т.Б., Сильченко О.Б., Коньшин А.С. Анализ путей повышения эффективности обработки алмазов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2000. № 9. С. 184–187.
14. Теплова Т.Б. Исследование возможности обработки хрупких твердых кристаллических материалов электронной техники в режиме квазипластичности для совершенствования качества обрабатываемой поверхности // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 2. С. 45–47.
15. Теплова Т.Б., Коньшин А.С., Сильченко О.Б. Обработка твердоструктурных минералов резанием на шлифовальных станочных модулях с ЧПУ с применением новой технологии // Горные машины и автоматика. 2001. № 11. С. 31–33.
16. Bifano T.G. and Dow. T.A. Real Time Control of Spindle Runout // Optical Engineering. 1985. V. 24. No. 5.
17. Bifano T.G. Ductile-Regime Grinding of Brittle Materials. Ph.D. Thesis. NC State University. Raleigh. NC. 1988.
18. Bifano T.G. Blake P., Dow T.A., and Scattergood R.O. Precision Machining of Ceramic Materials. Proc. of the Intersociety Symposium on the Machining of Ceramic Materials and Components. R. E. Parks. K. Subramanian K Ball eds Am Cer. Soc., ASME Abras. End. Soc. PP. 99–120, April. 1987 (Updated and Reprinted in American Ceramic Society Bulletin, June. 1988. V. 67. No. 6. PP. 1038–1044.
19. King R.F. and Tabor D. The Strength Properties and Frictional Behaviour of Brittle Solids. Proc. of the Roy. Soc. London, A223, p. 225. 1954.
20. Toh S.B. and McPherson R. Fine Scale Abrasive Wear of Ceramics by a Plastic Cutting Process. Science of Ceramics by a Plastic Cutting Process. Hard Materials, Inst. Phys. Conf. Serf. No. 75. Chap. 9, Adam Hilder. Ltd., Rhodes. PP. 865–871. 1986.

ТЕПЛОВА Татьяна Борисовна –

доктор технических наук, профессор Центра алмазных технологий и геммологии ГАПОУ КП № 11

Интегрированная CAD/CAM/CAPP система ADEM для автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства. Единый программный комплекс, в состав которого входят модули для: объемного и плоского моделирования; выпуска конструкторской и технологической документации; проектирования техпроцессов; программирования станков с ЧПУ (токарных, фрезерных, электроэрозионных, лазерных и др.); управления архивами и проектами; укрупненного трудового нормирования. Содержит средства для анализа технологичности проекта и систему управления справочными данными.

Группа компаний ADEM

107497, Москва:
ул. Иркутская, д. 11
тел: +(7) 495 462-0156,
+(7) 495 502-1341
e-mail: moscow@adem.ru

426003, Ижевск:
ул. Красноармейская, д. 69
тел: +(7) 3412 522-341,
+(7) 3412 522-433
e-mail: izhevsk@adem.ru

