

Отличительная особенность серии книг «Мир станкостроения» — тщательный отбор научной и технической литературы (зарубежной и отечественной) по актуальным направлениям развития станко-инструментальной отрасли. Публикуемые в серии книги направлены на информационное обеспечение подпрограммы «Станкоинструментальная промышленность» государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности». Отечественное станкостроение должно стать основой технологической независимости и базой современного машиностроения.

*Заместитель министра Минпромторга России
М. И. Иванов*



**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ КНИГ
«МИР СТАНКОСТРОЕНИЯ»**

Иванов Михаил Игоревич, заместитель министра Минпромторга России – председатель редсовета

Члены совета:

Бойм Александр Григорьевич, к.т.н., зам. генерального директора ПАО «ЭНИМС», г. Москва

Боровский Георгий Владиславович, к.т.н., исполнительный директор ФГУП «НПО «Техномаш», г. Москва

Кузнецов Александр Павлович, д.т.н., профессор МГТУ «СТАНКИН», г. Москва

Маслов Андрей Руффович, д.т.н., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Никитин Дмитрий Владимирович, председатель экспертного совета Ассоциации «Цифровые инновации в машиностроении», г. Москва

Новиков Сергей Васильевич, к.т.н., зам. генерального директора АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», главный редактор журнала «СТАНКОИНСТРУМЕНТ», г. Москва

Олейник Андрей Владимирович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ИКТИ РАН, г. Москва

Паничев Николай Александрович, председатель редакционного совета журнала «СТАНКОИНСТРУМЕНТ», г. Москва

Самодуров Георгий Васильевич, к.т.н., президент Ассоциации «Станкоинструмент», г. Москва

redsovet_knigi@electronics.ru



МИР станкостроения

Т.Б. Теплова

Прецизионная обработка
поверхностного слоя
твердых и сверхтвердых
хрупких материалов
в режиме квазипластичности

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2023

*Издано при финансовой поддержке
Министерства цифрового развития, связи
и массовых коммуникаций Российской Федерации*

УДК 621.9 : 666.9-16

ББК 34.6

Т34

Рецензенты:

*К.В. Халкчев, д.ф.-м.-н., д.т.н., профессор кафедры геологии
и маркшейдерского дела НИТУ МИСИС*

А.И. Смирнов, к.т.н., директор ООО «ПТЦ «УралАлмазИнвест»

Т34 Теплова Т.Б.

**Прецизионная обработка поверхностного слоя твердых и
сверхтвердых хрупких материалов в режиме квазипластичности**
Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2023. – 286 с. ISBN 978-5-94836-669-2

В монографии рассматривается проблема обработки твердых и сверхтвердых хрупких материалов с получением поверхности нанометровой шероховатости.

Показано состояние и перспективы применения твердых и сверхтвердых хрупких материалов в промышленности, в том числе при изготовлении высокотехнологичных изделий для нанотехнологий. Излагаются научные и инженерные основы решения задачи прецизионной обработки таких материалов. Автор рассматривает различные аспекты технологии прецизионной обработки поверхностного слоя твердых и сверхтвердых хрупких материалов в режиме квазипластичности.

Таким образом, данная монография является фундаментальной в своей области, она будет полезна специалистам, разрабатывающим новые поколения обрабатывающих станков, а также необходима в учебном процессе целого ряда специальностей технических вузов.

© Теплова Т.Б., 2023

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2023

ISBN 978-5-94836-669-2

Содержание

Предисловие	10
Введение	13
Глава 1. Поверхностная обработка твердых хрупких кристаллических материалов	15
1.1. Состояние и перспективы применения твердых хрупких материалов в промышленности.....	15
1.2. Особенности процесса разрушения поверхностного слоя при механической обработке твердых хрупких кристаллических материалов.....	23
1.3. Особенности обработки твердых высокопрочных материалов для микроэлектроники.....	26
1.4. Модели процесса шлифования алмазов.....	33
1.5. Критерии разрушения твердых материалов.....	38
1.6. Требования к повышению качества обработанной поверхности и производительности процесса поверхностной обработки.....	43
Литература.....	48
Глава 2. Перспективные способы поверхностной обработки твердых хрупких минералов	52
2.1. Новый подход к обработке твердых хрупких минералов.....	52
2.2. Классификация состояния поверхностного слоя минерала при его механической обработке по величине удельной энергии воздействия.....	54
2.3. Прецизионные процессы разрушения с точки зрения физической мезомеханики.....	56
2.4. Хрупко-пластичный переход.....	62
2.5. Модель пластичного деформирования в мезообъемах твердоструктурных хрупких минералов в процессе их размерно-регулируемого микрорезания.....	67
Литература.....	75

Глава 3. Модель процесса поверхностной обработки твердых хрупких кристаллических материалов в режиме квазипластичности с получением поверхности нанометрового рельефа	80
3.1. Феноменологическое описание процессов поверхностной обработки твердых кристаллических материалов в режиме квазипластичности.....	80
3.2. Модельное представление квазипластичного динамического воздействия инструмента на обрабатываемый твердый хрупкий кристаллический минерал.....	86
3.3. Моделирование тепловых процессов в системе «инструмент — обрабатываемый материал» при поверхностной обработке в режиме квазипластичности.....	90
3.4. Автоколебания системы «инструмент — обрабатываемый материал» при поверхностной обработке твердых хрупких минералов в режиме квазипластичности.....	100
3.5. Влияние технологических факторов на формирование нанометрового рельефа поверхности твердых хрупких кристаллических материалов при квазипластичной обработке.....	102
3.6. Обсуждение и оценка результатов экспериментальных исследований квазипластичной обработки поверхностей твердых хрупких материалов.....	112
Литература.....	143
Глава 4. Исследование механических и физико-технических процессов квазипластичной обработки и определение параметров оборудования, обеспечивающих повышение качества и производительность процесса	147
4.1. Анализ факторов, влияющих на качество и производительность процесса поверхностной обработки в режиме квазипластичности.....	147
4.2. Выбор и оценка критериев, обеспечивающих получение поверхности нанометрового рельефа при	

удалении поверхностного слоя твердых хрупких минералов и материалов в режиме квазипластичности.....	152
4.3. Назначение начальных режимов обработки и критериальные зависимости изменения параметров в процессе обработки.....	163
4.4. Методика выбора рациональных режимов поверхностной квазипластичной обработки для различных материалов.....	168
Литература.....	170

Глава 5. Автоматизация процесса поверхностной обработки твердых хрупких материалов в режиме квазипластичности с получением нанометрового рельефа поверхности.....	172
5.1. Возможность применения квазипластичной поверхностной обработки твердых хрупких материалов для серийного производства подложек интегральных микросхем (ИМС).....	172
5.2. Управляющие и контролируемые параметры процесса поверхностной квазипластичной обработки при серийном производстве.....	175
5.3. Методы и средства контроля параметров процесса поверхностной обработки.....	176
5.3.1. Осциллографический метод контроля. Использование акустического сигнала, генерируемого материалом во время обработки, для оперативного контроля качества обрабатываемого материала и управления процессом обработки.....	176
5.3.2. Применение тестовых методов для диагностирования процесса размерного микрошлифования на станочном модуле с ЧПУ.....	181
5.3.3. Контроль тепловых параметров процесса поверхностной обработки.....	187
5.3.4. О перспективах применения ультразвуковой микроскопии для оценки качества кристаллов после поверхностной обработки.....	189

5.4. Модели и алгоритмы управления процессом поверхностной обработки в режиме квазипластичности.....	195
Литература.....	202
Глава 6. Перспективы развития квазипластичной поверхностной обработки твердых хрупких минералов.....	208
6.1. Сравнительная характеристика этапов обработки по базовой и предлагаемой технологии.....	208
6.1.1. Калибровка слитка.....	209
6.1.2. Процесс резки слитка на пластины.....	210
6.1.3. Формирование фасок.....	213
6.1.4. Шлифование пластины.....	215
6.1.5. Полирование пластины.....	218
6.1.6. Химическая обработка полупроводниковых пластин.....	220
6.1.7. Виды загрязнений пластин.....	220
6.1.8. Очистка пластин.....	221
6.1.9. Требования к чистоте помещений. Чистые комнаты.....	222
6.1.10. Экономические преимущества квазипластичной обработки.....	225
6.2. Оценка потребности квазипластичной поверхностной обработки твердых хрупких кристаллических минералов и материалов для производства высокотехнологичных изделий в области нанотехнологий.....	226
Литература.....	231
Глава 7. Получение и обработка твердых и сверхтвердых материалов и перспективы их применения в высокотехнологичных отраслях промышленности.....	233
7.1. Рост спроса на изделия из алмаза в связи с совершенствованием производства синтетических алмазов высокого качества.....	233
7.2. Технологии выращивания синтетических алмазов.....	237



7.3. Проблемы обработки натуральных и синтетических алмазов для их применения в высокотехнологичных отраслях промышленности.....	243
7.4. Механическая обработка алмаза.....	244
7.5. Возможность применения квазипластичной обработки синтетического алмаза для его применения в высокотехнологичных областях промышленности.....	254
7.6. Возможности увеличения производительности квазипластичной обработки синтетического алмаза для его применения в высокотехнологичных изделиях серийного производства.....	258
7.6.1. Предварительная подготовка образцов.....	258
7.6.2. Обработка синтетического алмаза с наложением физических полей.....	259
7.6.3. Групповая обработка образцов и автоматизация процесса обработки при производстве серийных высокотехнологических изделий из синтетического алмаза.....	263
7.6.4. Перспективы применения алмазов в высокотехнологичных отраслях промышленности.....	266
Литература.....	271
Заключение.....	278
Источники рисунков.....	280

Предисловие

Моим учителям посвящается

Исследования, которые вошли в эту книгу и стали основой моих диссертаций — кандидатской и докторской, выполнены под руководством двух замечательных ученых Гридина Олега Михайловича и Коньшина Анатолия Сергеевича.



Коньшин А. С.

Анатолий Сергеевич Коньшин — научный руководитель моей кандидатской диссертационной работы, талантливый конструктор. Он автор множества изобретений. Под его руководством в Экспериментальном научно-исследовательском институте металлорежущих станков (ЭНИМС) создан уникальный станочный модуль АН15ф4, на котором получены экспериментальные результаты, вошедшие в диссертации и в эту книгу.

Анатолий Сергеевич — выпускник МГТУ «СТАНКИН», трудился на Московском станкостроительном заводе, руководил конструкторским отделом ЭНИМС. К тому же Анатолий Сергеевич был разносторонне развитым человеком: прекрасно играл на фортепьяно, любил природу, увлекался философией. Он говорил, что наиболее важные мысли и конструкторские решения к нему приходили на природе, когда он мог отрешиться от всего и просто созерцать окружающую красоту.



Гридин О. М.

Олег Михайлович Гридин — мой научный консультант по докторской диссертации.

ции. Под его руководством выполнено большинство исследований процесса квазипластичной обработки. Талантливый ученый, генератор множества идей, никогда не унывающий и не теряющий чувства юмора. В то время когда я, поглощенная выполнением рутинной работы, мрачно готовилась к защите кандидатской диссертации, он говорил мне: «Не о том ты думаешь и расстраиваешься. Ты думай о дальнейших исследованиях, которые войдут в докторскую диссертацию. У тебя потрясающе интересная тема». Если бы не его подбадривания, возможно, я не смогла бы решиться на защиту докторской.

Олег Михайлович закончил Московский физико-технический институт по специальности «физика твердого тела». Он учился у С. П. Капицы. Подготавливал и защищал диплом в Институте физических проблем АН СССР (ныне ИФП РАН им. П. Л. Капицы). Работал в Радиотехническом институте АН СССР им. А. Л. Минца (ныне ОАО «Радиотехнический институт им. В. Л. Минца»), Государственном институте горно-химического сырья, Московском государственном горном университете. Работал внештатным экспертом Всероссийского научно-исследовательского института патентной экспертизы (ВНИИГПЭ). Был действительным членом Российской академии естественных наук (РАЕН).

Круг научных интересов Олега Михайловича был очень широк, и в каждом аспекте своей деятельности он добился успехов, в каждый внес научный вклад.

Помимо квазипластичной обработки поверхностей твердых хрупких минералов он занимался проблемами подземного сжигания серы, подземного выщелачивания фосфоритов, химического разупрочнения кимберлитов, созданием питательных субстратов на основе цеолита, торфа, сапропеля, фосфоритов, технологией получения нефтяных сорбентов, термической переработкой арсенидов и другими научными проблемами.

Он является автором многих патентов в различных областях научной деятельности.

Олег Михайлович обладал множеством талантов: писал стихи, картины, во время учебы в МФТИ был заядлым кавээнщиком.

Был автором множества веселых посвящений к юбилеям. Ни один праздник не обходился без его стихов. Он ко всему относился с юмором и даже к рутинной работе подходил творчески.

Я счастлива, что судьба свела меня с этими замечательными людьми.

Спасибо им. Вечная память.

Введение

Известно, что «нанотехнология» в соответствии с энциклопедией означает совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами от 1 до 100 нанометров (нм), хотя бы в одном измерении. В этих масштабах свойства материалов начинают существенно изменяться, у них появляются принципиально новые качества, открывающие новые технические возможности.

Согласно последнему президентскому посланию и многочисленным публикациям развитие нанотехнологий в Российской Федерации является одним из приоритетных направлений науки и техники. Ускоренное развитие работ в области нанотехнологий и наноматериалов призвано обеспечить реализацию стратегических национальных приоритетов Российской Федерации, в том числе национальную и экономическую безопасность страны. Основной целью государства при решении данной проблемы должно стать создание и развитие научной, технической и технологической базы в области нанотехнологий и наноматериалов, обеспечивающей необходимый уровень обороноспособности и безопасности страны, развитие новых подходов к инновационному преобразованию отечественной промышленности.

Среди многочисленных «нанотехнологических» направлений значительный интерес представляет возможность обработки поверхности твердых материалов до нанометровой шероховатости, что очень важно для многих отраслей промышленности, прежде всего электронной. Часть таких материалов синтезируют искусственно, а часть из них являются природными минералами, например алмазы и сапфиры. Соответствующие исследования были поставлены в Московском государственном горном университете.

Предлагаемая работа обобщает достигнутый к настоящему времени уровень решения проблемы с учетом авторских исследований. Авторы считают данное направление весьма перспективным

и рассчитывают на продолжение исследований с привлечением самых современных технических средств.

Авторы благодарят за помощь, оказанную при работе над монографией, д. т. н., проф. Дмитриева А. П., д. т. н., проф. Гончарова С. А., д. т. н., проф. Морозова В. И., д. г.-м. н., проф. Мельникова Е. П., д. т. н. Сильченко О. Б., д. т. н., проф. Куприянова В. В., д. т. н., д. ф.-м. н., проф. Халкичева К. В., д. т. н., проф. Байора Б. Н., к. т. н. Наумова К. И., к. т. н. Ананьева П. П., к. т. н. Могиреву Е. С., к. т. н. Коньшина А. С., Самерханову А. С., Бирюкова Е. Н., Хохлова А. И., Теплова М. М., Теплова А. М., Гладченкова Е. В., Зиновьеву И. И.

Авторы благодарны за поддержку работы руководству МГГУ, коллективам кафедр ФГПиП и ТХОМ, сотрудникам фирм и организаций: ЦНИТИ «Техномаш» — д. ф.-м. н., проф. Самойловичу М. И.; ЦЕНИ ИОФ РАН — к. т. н. Ашкинази Е. Е.; ИБХФ РАН — д. т. н. Левину В. М., к. т. н. Петронюк Ю. С.; ООО «ПТЦ «УралАлмазИнвест» — к. т. н. Алтухову А. А., к. т. н. Львову С. А., к. т. н. Смирнову В. И., Карасеву В. Ю.; ОАО «ЭНИМС» — д. т. н. Хлебалину Н. Ф., к. т. н. Гришину В. М., Чеховской С. С.; РУДН — д. т. н., проф. Рогову В. А.

ГЛАВА I

ПОВЕРХНОСТНАЯ ОБРАБОТКА ТВЕРДЫХ ХРУПКИХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

I.1. Состояние и перспективы применения твердых хрупких материалов в промышленности

Все большее применение твердые хрупкие материалы находят в технике, приборостроении, оптике, оптоэлектронике, медицине, оборонной промышленности, микроэлектронике, при изготовлении часов и в качестве ювелирных вставок. Минералы, особенно в форме кристаллических образований (кристаллов), находят широкое применение при производстве высокотехнологичных изделий в области нанотехнологий. 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.

Объектами контроля в микроэлектронике являются близко расположенные друг к другу микроскопические структуры, выполненные в виде тонкопленочных рисунков или в виде газофазовых гетероэпитаксиальных многослойных структур на плоской подложке.

Основная тенденция, с помощью которой микроэлектроника достигает новых показателей, — это 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 увеличилась на несколько порядков.

Размеры подложек выбираются в соответствии со степенью интеграции интегральных схем (ИС), их материалы — в соответствии с требованиями, предъявляемыми к электрическим, механическим и термическим свойствам подложек. В свою очередь, эти требования обусловлены заданными параметрами пленочных элементов и выбором технологических методов нанесения пленок.

Материал подложек должен иметь 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. Вот почему независимо от выполняемых функций рабочие характеристики всех элементов определяются свойствами используемых материалов.

В настоящее время 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 .

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. Наиболее удовлетворительным микрорельефом обладает керамика с 96 %-м содержанием Al_2O_3 . Керамика с более высоким содержанием Al_2O_3 , например типа «Поликор», имеет поверхности, не обеспечивающие хорошей адгезии к ним толстых пленок. Полировка мелкозернистой керамики снижает микронеровности, однако вызывает существенные и трудноустраняемые загрязнения ее поверхности. Поэтому такая операция не позволяет получить подложки, пригодные для тонкопленочных ИС.

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

- 1) $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2$;
- 2) $\text{RO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2$ (RO — один из окислов CaO , MgO или BaO).

Ситаллы в 2–3 раза превосходят стекла по механической прочности, но уступают керамике по теплофизическим показателям,

что не позволяет использовать их для изготовления микросхем с мощными навесными элементами.

Кроме вышеуказанных, в отрасли применяется еще ряд материалов, свойства которых приведены в табл. 1.1.

Кремний — основной материал полупроводникового производства. В настоящее время из всех полупроводниковых материалов наибольшее применение для изготовления полупроводниковых ИМС получил кремний. Но его запасы ограничены и не удовлетворяют потребностей электронной промышленности.

При тенденции миниатюризации в электронной промышленности для изготовления подложек интегральных микросхем (ИМС) требуются материалы с лучшими теплофизическими показателями.

В табл. 1.2 приведены характеристики диэлектрических материалов, которые удовлетворяют требованиям, предъявляемым к подложкам ИМС.

Таблица 1.1. Свойства материалов, применяющихся для изготовления подложек ИМС

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 $\times 10^{-4}$ при частоте 10 ¹⁰ Гц	5	3	4	4
Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости $\times 10^{-6}$, град ⁻¹	0 \pm 20	0 \pm 20	40 \pm 20	55 \pm 20
Шероховатость R _a , мкм	0,1	0,1	0,1	0,1

Таблица 1.2. Характеристики диэлектрических материалов для подложек ИМС

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	$6,2 \cdot 10^{-3}$	0,0027	3,25
Алюмооксидная керамика типа «Поликор»	1014	10,8	$2 \cdot 10^{-4}$	0,075–0,08	7,5–7,8
Кварцевое стекло	1016	4	$3,8 \cdot 10^{-4}$	0,0036	0,56–0,6
Ситаллы	1013–1014	6,5	$6 \cdot 10^{-3}$	0,005–0,009	5
Лейкосапфир	1011	8,6	$2 \cdot 10^{-4}$	0,0055	5

Наиболее востребованными материалами в различных отраслях промышленности и перспективными для применения в электронной промышленности являются карбид кремния, арсенид галлия, лейкосапфир и алмаз. Сравнительные характеристики вышеперечисленных материалов приведены в табл. 1.3.

Карбид кремния

Благодаря высокой твердости, химической устойчивости и износостойкости монокристаллический SiC используют для изготовления радиационно стойких светодиодов, обладающих очень высокой надежностью и стабильностью работы. Его можно использовать для изготовления высокотемпературных силовых полупроводниковых приборов, полевых транзисторов, туннельных диодов, счетчиков частиц высокой энергии, терморезисторов. Поликристаллический SiC используют в производстве нелинейных резисторов (варисторов). Кроме того, на основе порошкообразного SiC производят высокотемпературные нагреватели и волноводные поглотители, а на основе пленок аморфного SiC — светодиоды и солнечные элементы. SiC является перспективным полупроводниковым материалом для высокотемпературной и высокочастотной электроники.

Таблица 1.3. Физические характеристики монокристаллических полупроводников

Параметры	Монокристаллические полупроводники			
	Алмаз	Si	GaAs	SiC
Постоянная решетки, А	3,567	5,431	5,653	4,359
Плотность, г/см ³	3,52	2,42	5,32	3,16
Теплопроводность, Вт/см·К	20–25	1,5–2	0,5	4,9
Диэлектрическая постоянная	5,68	11,7	10,9	9,7
Максимум спектральной чувствительности, мкм	0,23	1,1	1,5	0,27
Коэффициент преломления	2,41	3,44	3,75	2,48
Запрещенная зона, эВ	5,47	1,11	1,43	2,23
Электроны	1800	1350	8600	1000
Дырки	2100	450	400	70
Скорость насыщения, 10 ⁷ см/с	2,7	1,0	2,0	2,7
Напряжение пробоя, 10 ⁵ В/см	100	3	4	30
Радиационная стойкость	высокая	низкая	низкая	низкая
Теплостойкость, °С	1000	200		
Твердость (по Кнупу), кг/мм ²	10000	1000	731	

Арсенид галлия

Кристаллический арсенид галлия был впервые синтезирован в 1954 г., и сразу же было обнаружено, что он является полупроводником с высоким удельным сопротивлением. Легируя его различными добавками, можно получать кристаллы с электронной и дырочной проводимостью.

Используется при изготовлении высокочастотных интегральных схем (ИС) и дискретных микроэлектронных приборов. Помимо высокого удельного сопротивления монокристаллы нелегированного GaAs, применяются при изготовлении светодиодов и лазеров. Арсенид галлия широко используется в оптоэлектронике для изготовления инжекционных лазеров, свето- и фотодиодов, фотокатодов, является прекрасным материалом для генераторов СВЧ-колебаний (так называемых генераторов или диодов Ганна).

Применяется для изготовления туннельных диодов, способных работать при более высоких температурах, чем кремниевые, и на более высоких частотах, чем германиевые. Монокристаллы полупроводящего арсенида галлия, легированные хромом, используются в инфракрасной оптике. Монокристаллы GaAs, легированные цинком или теллуром, применяют в производстве высокочастотных и оптоэлектронных приборов.

Лейкосапфир

Перспективным материалом является лейкосапфир. Это синтетический сапфир — монокристаллическая форма корунда, Al_2O_3 . Использование лейкосапфира в различных областях обусловлено его исключительными свойствами, такими как высокая прозрачность; устойчивость к УФ-излучению; устойчивость к механическим повреждениям и высоким температурам; высокие диэлектрические свойства; особенности кристаллической решетки, позволяющие выращивать на нем эпитаксиальные слои; высочайшая прочность; малый коэффициент трения; возможность сделать прочными очень тонкие изделия (острие лезвия скальпеля); химическая и биологическая пассивность. Лейкосапфир широко применяют в технике.

В оптике используются сапфировые линзы, призмы, световоды, элементы лазеров. В микроэлектронике лейкосапфир является единственным материалом для изготовления основы радиационно стойких микросхем, используемых на АЭС и в космосе, надежных микросхем памяти, гибридных СВЧ-микросхем. В оптоэлектронике лейкосапфир применяется для изготовления подложек светоизлучающих диодов (СИД) высокой яркости (HB LED) и твердотельных лазеров, дающих синий, белый, зеленый свет, важнейший материал планарной оптики. В машино- и приборостроении из лейкосапфира изготавливают:

- приборные смотровые окна и иллюминаторы, выдерживающие сверхвысокие температуры и перепады давления или вакуум, устойчивые к агрессивным средам, механическим повреждениям и излучениям;
- износостойчивые окна сканеров;

- износостойчивые детали (подшипники, нитеводы, направляющие);
- трубы плазмогенераторов и тензодатчиков (датчиков давления).

В медицине лейкосапфир применяют для изготовления прозрачных и сверхтонких лезвий для хирургии, химически пассивных оптических элементов диагностических приборов, выдерживающих высокотемпературную стерилизацию. В оборонной промышленности лейкосапфир используется для изготовления сверхпрочных и оптически совершенных защитных колпаков для головных частей самонаводящихся ракет, визиров и окон, устойчивых к УФ- и ИК-излучениям, КНС-микросхем, устойчивых к ионизирующим излучениям, СВЧ-компонентов радиолокационных систем. Комбинация благоприятных химических, электрических, механических, оптических, поверхностных, тепловых и других свойств делает лейкосапфир предпочтительным материалом для точных систем.

Алмаз

Помимо применения в ювелирной промышленности, благодаря физическим свойствам существует возможность применять алмаз в микроэлектронике. Алмаз — один из лучших изоляторов в отличие от кремния, который даже в чистом виде является полупроводником. Как изолятор алмаз характеризуется чрезвычайно высокой сопротивляемостью электрическому пробую, и потому на его основе можно изготавливать более миниатюрные электронные устройства, чем по кремниевой технологии. При легировании бором, азотом или фосфором алмаз превращается в отличный полупроводник. Состояние развития микроэлектронного производства достигло такого уровня, когда требуются новые опыты и исследования алмазного материала. Да и другие отрасли промышленности также заинтересованы в таком материале. Ведутся исследовательские работы по созданию элементов памяти нового поколения на основе аллотропных модификаций углерода, включая алмаз. Целесообразно применение алмаза

в перспективном направлении МЭМС (микроэлектромеханические системы, или сокращенно МЭМС). Это множество микроустройств самых разнообразных конструкций и назначения, производимых сходными методами с использованием модифицированных групповых технологических приемов микроэлектроники (например миниатюрные детали: гидравлические и пневмоклапаны, струйные сопла принтера, пружины для подвески головки винчестера, микродатчики и исполнительные устройства, инструменты: скальпели и пинцеты для работы с объектами микронных размеров, аналитические микролаборатории на чипе).

Однако применение вышеуказанных материалов ограничено сложностью их поверхностной обработки. Применение твердых минералов и кристаллов для изделий микроэлектроники, медицины и других отраслей промышленности обязывает выполнять непрерывно ужесточающиеся требования к шероховатости поверхности обрабатываемого материала и минимизации дефектов, приносимых процессом обработки.

Следовательно, актуальными являются задачи обработки изделий из лейкосапфира, моно- и поликристаллического алмаза и других твердых материалов с достижением требуемых для применения в промышленности выходных качественных параметров, а также задачи автоматизации процесса изготовления больших партий изделий из этих материалов.

1.2. Особенности процесса разрушения поверхностного слоя при механической обработке твердых хрупких кристаллических материалов

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

плоскопараллельность сторон, изгиб и большой разброс по толщине. Глубина механически нарушенного слоя является основной характеристикой качества обработки полупроводниковых пластин. Этот слой распространяется от обработанной поверхности в глубину 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. С геометрической точки зрения качество определяется неровностями, выступами и впадинами реальной поверхности, с физической — отклонением свойств верхних слоев материала от свойств материала сердцевины. Рассматривая реальную необработанную подложку в разрезе, можно выделить рельефный слой, определяющий геометрические отклонения от идеального поверхностного слоя; трещиноватый

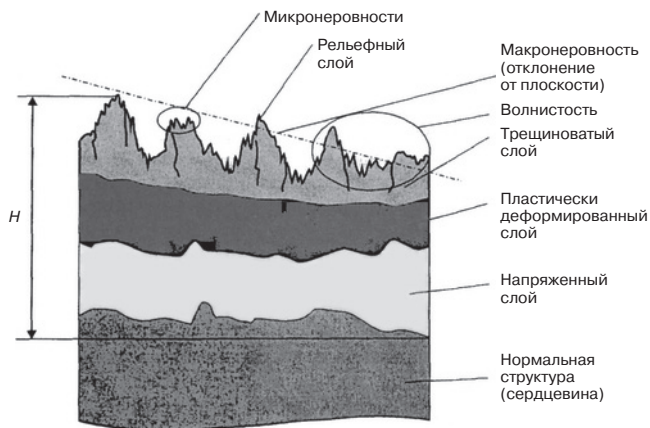


Рис. 1.1. Поверхность пластины. Макронеровности — единичные, неповторяющиеся отклонения поверхности (конусность, непараллельность, овальность). Волнистость — периодически повторяющиеся выступы и впадины на поверхности. Микронеровности — выступы и впадины на небольших участках поверхности

слой с нарушенной целостностью поверхности; пластически деформированный слой; напряженный, упругодеформированный слой (рис. 1.1).

На рис. 1.1 H — высота дефектного слоя, величина которого 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, а также нагрев поверхностного слоя, химические явления, которые имеют место в зоне обработки: окисление, образование других химических соединений.

Слой материала, подлежащего удалению в процессе последующей обработки пластины, называется припуском на обработку (равным H). 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 больше, чтобы удалить дефектный слой H , но после предварительной обработки появляется новый дефектный слой, только меньшего размера. На рис. 1.2 приведены примеры дефектов пластин.

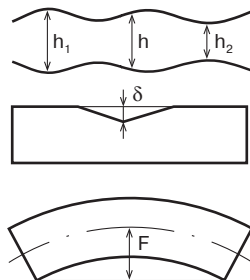


Рис. 1.2. Примеры дефектов пластин: $\Delta h = h_2 - h_1$ — разнотолщинность; δ — неплоскость; F — прогиб

1.3. Особенности обработки твердых высокопрочных материалов для микроэлектроники

Одной из важнейших областей применения твердых материалов является микроэлектроника. Интегральная и функциональная микроэлектроника являются фундаментальной базой развития всех современных систем радиоэлектронной аппаратуры. Независимо от выполняемых функций рабочие характеристики всех элементов определяются свойствами используемых материалов, т. е. выходные параметры аппаратуры находятся в прямой зависимости от применяемых материалов. В связи с этим важной задачей является обработка новых материалов для применения изделий из них в микроэлектронике.

В пленочных интегральных микросхемах (ИМС) элементы создаются осаждением пленок на специальные платы из диэлектрических материалов — подложки. Подложка — заготовка, предназначенная для нанесения на нее элементов гибридных и пленочных 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.

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

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

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

Существенное влияние на надежность и эксплуатационные характеристики монокристаллов для микроэлектроники оказывают изменения структуры и свойств поверхностных слоев, происходящие в процессе обработки. На отмеченные свойства влияют жесткость крепления пластин на станке и параметры самой обработки.

Полупроводниковые микросхемы на лейкосапфировых подложках изготавливаются по эпитаксиально-планарной и диффузионно-планарной технологиям. В первом случае они реализуются на базе эпитаксиальных слоев, выращенных на подложках, выполняющих роль механического носителя. Во втором случае диффузия легирующих примесей осуществляется непосредственно в приповерхностную область подложек на заданную глубину.

Эпитаксия — это метод послойного выращивания одного кристаллического твердого тела на поверхности другого (называемого подложкой), при котором растущий кристалл наследует кристаллографическую структуру подложки. Подложка, изготовленная из кристаллов (кремния, лейкосапфира, алмаза и других твердых материалов), выполняет роль механического носителя и отводит тепло от микросхемы в процессе ее работы. Поэтому для изготовления подложек применяются кристаллические минералы, обладающие большой твердостью и высокой теплопроводностью (лейкосапфир, алмаз). В настоящее время формирование поверхности

нанометрового рельефа для последующего этапа эпитаксии таких материалов является большой проблемой.

Качество поверхностного слоя подложек существенно влияет на структурное совершенство эпитаксиального слоя. Наличие дислокаций, микротрещин приводит к образованию дефектов в этих слоях, причем их плотность, как правило, выше, чем в подложках. Дислокации и дефекты упаковки формируются от подложки и наследуют ее отрицательные свойства, ухудшая эксплуатационные свойства микросхем. Полировка мелкозернистой керамики снижает микронеровности, однако вызывает существенные и трудноустраняемые загрязнения ее поверхности. Поэтому такая операция не позволяет получить подложки, пригодные для тонкопленочных ИС.

Традиционными способами обработки лейкосапфира являются шлифование и полирование. При необходимости снятия больших припусков с деталей применяется шлифование связанным абразивом, когда обработка ведется на режимах с максимально возможной производительностью. Рост скорости удаления материала обеспечивается за счет большого числа абразивных зерен на производящей инструментальной поверхности, а улучшение качества обработки — за счет снижения усилий резания единичными зернами инструмента. Для этого ширину алмазозносного слоя делают значительно больше, чем обрабатываемая поверхность пластины, и обработка производится только при вращении инструмента и его подаче на врезание по всей обрабатываемой поверхности.

Так, в работе Г. Брандта описан способ, когда во время шлифования обрабатываемая пластина закрепляется на столе станка, а инструмент диаметром 410 мм вращается с частотой 1450 мин^{-1} и подается на деталь в соответствии с предварительно заданной программой. Применяются алмазные чашечные круги АЧК на связке М1 с размером зерен 125/100, 100/80 мкм концентрацией 100%, марка алмаза — АС15, АС20, АС32, скорость инструмента — 5 м/сек. При этом достигается шероховатость поверхности Ra менее

0,6 мкм, а глубина нарушенного слоя составляет $h = 11$ мкм. Скорость удаления припуска может достигать $1000 \text{ мкм} \cdot \text{мин}^{-1}$.

На этапах финишной обработки лейкосапфира рядом преимуществ обладает шлифование свободным абразивом. Современные станки для шлифования свободным абразивом имеют электронные устройства плавного пуска и задания давления, позволяющие устранить дефекты, связанные с повышенной хрупкостью. Однако, несмотря на введение контроля за процессом обработки, снижающим трудоемкость операций, недостатки данного метода не устраняются. Характерным дефектом при шлифовании свободным абразивом является образование царапин, которое вызывается кинематикой относительного движения пластин по полировальному кругу, а причиной служит большая прочность зерен алмаза, которые, выдерживая большие нагрузки, внедряются в поверхность полировального круга. Абразив с корундовыми зёрнами не образует царапин, но из-за низкой производительности малоперспективен в случае обработки лейкосапфира.

Магнитно-абразивная обработка основана на использовании сил неомогенного квазистационарного магнитного поля, действующего на частицы, обладающие абразивными и ферромагнитными свойствами. Технически магнитно-абразивная обработка реализуется путем внесения ферромагнитных абразивных частиц в свободно перемещаемый воздушный зазор между полюсами электромагнита и деталью. В результате ориентации ферромагнитных частиц в рабочем зазоре по направлению силовых линий магнитного поля обеспечивается практически постоянный контакт между острой кромкой рабочих элементов и поверхностью пластины. При удалении материала сила трения приводит к перемещению абразивных частиц, однако момент вращения ориентирует частицы в такое положение, что острые кромки снова начинают работать. Этот метод позволяет совмещать предварительную и финишную обработки благодаря возможности управления жесткостью абразивного инструмента в осевом и продольном направлениях. Отсутствие связки, а следовательно, трения связки о поверхность пласти-

ны снижают температуру в процессе обработки; проникновение частиц диспергированного материала между абразивными зернами устраняет вероятность «засаливания» абразивного инструмента, в результате чего отпадает необходимость процесса приработки. Недостатками данного метода являются сложность проведения высокоточной обработки, отсутствие высококачественных магнитных абразивов и, как следствие, недостаточно высокая производительность и качество обработки.

Для обоснования способа крепления пластины лейкосапфира на станке интересен опыт использования изотропной диоксидной керамики при обработке материалов резанием в качестве режущей пластины, т. е. фактически при решении обратной задачи. Прежде всего авторы работ, изучавшие стойкость диоксидной керамики, отмечали ее значительную хрупкость. Так, А. М. Вульф показал, что пластины из Al_2O_3 имеют склонность к выкрошиванию и даже поломке при частых врезаниях режущей кромки. Для борьбы с этими явлениями была предложена ручная подача при врезании и выходе режущей пластины, а также использование упругих прокладок под пластину, например прессованной бумаги. Толщина прокладки $b = 0,4–0,6$ мм. На стойкость к трещинообразованию существенную роль оказывала жесткость крепления пластин к державке. В работе проф. Рудника С. С. показано, что при увеличении жесткости (I , кг/мм) с 800; 1000 и до 2000 стойкость T (мин) возрастала соответственно с 6; 27 до 52.

Наилучшие результаты по стойкости были получены при использовании в качестве подложек под режущие пластины твердосплавных пластин. Исследования авторов G. Iacger, R. Krostman показали, что прочность режущих пластин из диоксида алюминия на сжатие резко уменьшается при нагревании выше $800^\circ C$, а на разрыв — при нагревании выше $1200–1250^\circ C$.

Усталостная прочность изучалась в работе А. М. Вульфа. Результаты испытаний на усталостную прочность приведены в табл. 1.4.