

Содержание

| | |
|---|-----------|
| Предисловие | 11 |
| Введение | 12 |
| Глава 1. Пробои на катоде магнетрона | 16 |
| 1.1. Что такое пробой..... | 16 |
| 1.2. Механизм возникновения пробоев на катоде..... | 17 |
| 1.3. Причины пробоев на катоде при реактивном магнетронном распылении..... | 19 |
| 1.4. Классификация пробоев по причинам их возникновения..... | 29 |
| 1.4.1. Естественный окисел и его устранение с поверхности мишени..... | 29 |
| 1.4.2. Конструктивные способы устранения диэлектрика, возникающего в реактивном процессе..... | 34 |
| 1.4.3. Устранение диэлектрика, образовавшегося из-за возврата распыленных атомов на мишень..... | 36 |
| Литература..... | 38 |
| Глава 2. Процесс реактивного магнетронного распыления со среднечастотным источником питания магнетрона | 42 |
| 2.1. Устранение причин пробоев на катоде магнетрона с помощью импульсного СЧ ИП..... | 42 |
| 2.2. Процессы в плазме среднечастотного разряда..... | 45 |
| 2.2.1. Форма импульсов тока во время перезарядки поверхности слоя диэлектрика..... | 45 |
| 2.2.2. Стадии развития разряда во время рабочих импульсов..... | 50 |
| 2.3. Влияние параметров СЧ импульсов на скорость и механизм осаждения пленки..... | 55 |
| 2.4. Работа ИП при возникновении дуги..... | 69 |
| 2.4.1. Способы обнаружения пробоя..... | 69 |

| | |
|---|------------|
| 2.4.2. Влияние времени задержки реакции ИП после обнаружения пробоя на стабильность реактивного процесса напыления..... | 71 |
| 2.4.3. Влияние времени выключения импульсного СЧ ИП после пробоя на стабильность реактивного процесса напыления..... | 72 |
| 2.5. Решение проблемы «исчезающего анода» при реактивном магнетронном разряде..... | 73 |
| 2.5.1. Проблема «исчезающего анода»..... | 73 |
| 2.5.2. Дуальное магнетронное распыление..... | 76 |
| 2.5.3. Мультианодное распыление..... | 87 |
| Литература..... | 88 |
| Глава 3. Процессы в плазме у поверхности растущей пленки..... | 96 |
| 3.1. Потоки частиц на подложку из плазмы разряда..... | 96 |
| 3.2. Электрическое смещение на подложке..... | 117 |
| 3.2.1. Электрически изолированная подложка..... | 117 |
| 3.2.2. Отрицательное постоянное смещение..... | 121 |
| 3.2.3. Среднечастотное импульсное отрицательное смещение..... | 129 |
| 3.2.4. Среднечастотное импульсное положительное смещение..... | 145 |
| 3.3. Влияние дополнительного ВЧ поля в импульсном магнетронном распылении..... | 148 |
| 3.4. Температура поверхности растущей пленки..... | 159 |
| Литература..... | 168 |
| Глава 4. Особенности реактивного магнетронного распыления..... | 173 |
| 4.1. Причины нестабильности реактивного распыления..... | 173 |
| 4.2. Стабилизация процесса реактивного магнетронного распыления..... | 179 |
| 4.2.1. Способы устранения гистерезиса из характеристик реактивного процесса модификацией конструкции напылительной установки..... | 179 |
| 4.2.2. Стабилизация и управление реактивным процессом по парциальному давлению реактивного газа..... | 193 |
| 4.3. Измерение парциального давления реактивного газа внешними по отношению к разряду устройствами контроля..... | 195 |

| | |
|--|-----|
| 4.4. Стабилизация процесса реактивного магнетронного распыления по электрическим параметрам разряда..... | 203 |
| 4.4.1. Причины изменения электрических параметров разряда при напуске реактивного газа..... | 203 |
| 4.4.2. Особенности вольт-амперных характеристик реактивного магнетронного разряда при фиксированном потоке реактивного газа..... | 215 |
| 4.4.3. Стабилизация реактивного процесса стабилизацией напряжения разряда и контроль напуска газа по току разряда..... | 225 |
| 4.4.4. Стабилизация процесса по току разряда и управление напуском реактивного газа по напряжению разряда..... | 228 |
| 4.5. Достижение долговременной стабильности процесса реактивного магнетронного распыления..... | 234 |
| 4.6. Влияние температуры мишени на процесс реактивного распыления..... | 243 |
| Резюме..... | 253 |
| Литература..... | 253 |

Глава 5. Получение пленок тройных и более сложных

| | |
|--|------------|
| химических соединений..... | 261 |
| 5.1. Одновременное реактивное магнетронное распыление различных мишеней..... | 261 |
| 5.1.1. Особенности процесса реактивного магнетронного сораспыления различных мишеней в среде с кислородом..... | 261 |
| 5.1.2. Покрyтия с повышенной твердостью на основе нитридов переходных металлов..... | 266 |
| 5.1.3. Твердые покpытия на основе тройных соединений: окислов и карбидов..... | 303 |
| 5.2. Магнетронное распыление в среде двух реактивных газов..... | 307 |
| 5.2.1. Оксинитриды..... | 307 |
| 5.2.2. Получение пленок оксинитридов двух материалов при магнетронном сораспылении..... | 327 |
| 5.2.3. Другие тройные соединения: карбонитриды и карбооксинитриды..... | 331 |

| | |
|--|------------|
| Литература..... | 334 |
| Глава 6. Структура тонких пленок и способы управления ею..... | 341 |
| 6.1. Развитие микроструктуры и появление предпочтительной ориентации в растущей пленке..... | 341 |
| 6.2. Модель структурных зон..... | 342 |
| 6.3. Двухосно ориентированные тонкие пленки и механизмы формирования их структуры на наклоненной подложке..... | 348 |
| 6.4. Экспериментальное подтверждение модели структурных зон..... | 354 |
| 6.4.1. Пленки TiN..... | 355 |
| 6.4.2. Пленки окиси циркония, стабилизированной иттрием (YSZ)..... | 357 |
| 6.4.3. Пленки MgO..... | 360 |
| 6.4.4. Пленки хрома..... | 362 |
| 6.4.5. Пленки AlN..... | 362 |
| 6.5. Влияние параметров нанесения на структуру тонких пленок и степень их биаксиальной ориентации..... | 363 |
| 6.5.1. Условия возникновения ориентации в плоскости..... | 363 |
| 6.5.2. Расстояние мишень — подложка..... | 364 |
| 6.5.3. Величина общего давления в разряде..... | 366 |
| 6.5.4. Величина угла между мишенью и подложкой — α . Движущиеся подложки..... | 367 |
| 6.5.5. Ионная бомбардировка..... | 373 |
| 6.5.6. Толщина пленки..... | 374 |
| 6.5.7. Остаточные газы..... | 375 |
| 6.5.8. Легирующие присадки..... | 378 |
| 6.5.9. Конфигурация магнитной системы магнетронов..... | 380 |
| 6.5.10. Положительное смещение подложки..... | 382 |
| Резюме..... | 383 |
| Литература..... | 384 |
| Глава 7. Способы равномерного нанесения пленки из протяженного магнетронного источника..... | 387 |
| 7.1. Факторы, влияющие на неоднородность толщины покрытия при нереактивном процессе..... | 388 |

| | |
|--|------------|
| 7.1.1. Влияние неоднородности магнитного поля..... | 388 |
| 7.1.2. Влияние соотношения размеров магнетрона и подложки..... | 389 |
| 7.1.3. Неоднородности глубины зоны эрозии, возникающие из-за наличия ее закругления на концах мишени протяженного магнетрона..... | 391 |
| 7.1.4. Влияние положения анодов на равномерность толщины пленки..... | 398 |
| 7.2. Дополнительные причины неравномерности распыления при реактивном распылении..... | 403 |
| 7.2.1. Влияние состояния поверхности анода..... | 403 |
| 7.2.2. Влияние соотношения длин протяженного магнетрона и системы подачи реактивного газа..... | 403 |
| 7.3. Выравнивание неоднородностей нанесенной пленки локальной регулируемой подачей реактивного газа или аргона..... | 404 |
| Литература..... | 407 |
| Глава 8. Основы моделирования реактивного разряда..... | 409 |
| 8.1. Моделирование изменения параметров процесса реактивного нанесения во времени..... | 409 |
| 8.2. Моделирование установившегося процесса реактивного нанесения..... | 413 |
| 8.3. Представление вольт-амперных характеристик разряда..... | 417 |
| 8.4. Моделирование процессов в разряде в течение периода импульса..... | 422 |
| 8.5. Моделирование процессов при среднечастотном импульсном распылении..... | 428 |
| 8.6. Моделирование неустановившихся процессов реактивного распыления..... | 429 |
| 8.6.1. Ход процесса при включении разряда..... | 430 |
| 8.6.2. Ход процесса во время паузы в разряде..... | 432 |
| 8.6.3. О быстродействии устройств управления..... | 436 |
| 8.7. Экспериментальные исследования процессов релаксации в реактивном разряде после каких-либо резких изменений условий разряда..... | 439 |

| | |
|---|-----|
| 8.7.1. Самопроизвольные переходы реактивного разряда из одного состояния в другое..... | 439 |
| 8.7.2. Переходы реактивного разряда из одного состояния в другое под действием систем управления..... | 443 |
| 8.8. Особенности моделирования процесса реактивного нанесения нитридов кремния и алюминия..... | 443 |
| 8.9. Примеры применения моделей реактивного распыления..... | 445 |
| 8.9.1. Пример применения уточненной расчетной модели для процесса реактивного распыления алюминия в смеси аргона и азота..... | 445 |
| 8.9.2. Пример применения уточненной расчетной модели для процесса реактивного распыления кремния. Сравнение двух процессов реактивного распыления кремния в смеси аргона и одного из реактивных газов: кислорода или азота..... | 448 |
| Литература..... | 454 |

Глава 9. Вакуумные напылительные установки фирмы

| | |
|--|------------|
| ООО «ЭСТО-Вакуум»..... | 457 |
| 9.1. Напылительные установки фирмы ООО «ЭСТО-Вакуум», выпускавшиеся до 2004 года..... | 457 |
| 9.2. Современные напылительные установки серии Caroline D12..... | 458 |
| 9.2.1. Вакуумная система установок серии Caroline D12..... | 460 |
| 9.2.2. Унифицированные импульсные ИП, используемые в установках серии Caroline D12..... | 461 |
| 9.2.3. Установка вакуумного напыления Caroline D12 A..... | 467 |
| 9.2.4. Установка вакуумного напыления Caroline D12 B..... | 470 |
| 9.2.5. Установка вакуумного напыления Caroline D12 B2..... | 472 |
| 9.2.6. Установка вакуумного напыления Caroline D12 C..... | 473 |
| 9.2.7. Установка вакуумного напыления Caroline D12 B1..... | 473 |
| 9.3. Технологические особенности применения магнетронных установок серии Caroline D12..... | 475 |
| 9.3.1. Нанесение резистивного слоя на магнетронной установке..... | 475 |
| 9.3.2. Нанесение металлизации на магнетронной установке..... | 477 |

| | |
|---|------------|
| 9.3.3. Получение чередующихся слоев различных диэлектриков на основе кремния в одном процессе на магнетронной установке..... | 478 |
| 9.4. Резюме по напылительным установкам серии Caroline D12..... | 479 |
| Литература..... | 480 |
| Глава 10. ТСП источники плазмы..... | 482 |
| Глава 11. Вакуумные установки для ионного и плазмохимического травления фирмы ООО «ЭСТО-Вакуум»..... | 489 |
| 11.1. Установка для реактивного ионноплазменного травления «Каролина PE 4» («Эра-3М», «Эра-4»)..... | 489 |
| 11.2. Шлюзовая установка реактивного ионноплазменного травления Caroline PE 11 («ЭРА 5»)..... | 494 |
| 11.3. Унифицированные установки плазмохимического и ионно-лучевого травления серии Caroline 12..... | 498 |
| 11.4. Установка ионно-лучевого травления Caroline IE 12..... | 499 |
| 11.5. Установка плазмохимического травления Caroline PE 12..... | 501 |
| 11.6. Шлюзовая установка плазмохимического травления Caroline PE 15..... | 502 |
| Глава 12. Применения установок плазмохимического травления с устройствами ТСП разряда..... | 503 |
| 12.1. Травление монокристаллического пьезокварца через нанесенную металлическую маску на глубину более 100 мкм..... | 503 |
| 12.2. Скоростное анизотропное травление монокристаллического кремния..... | 505 |
| 12.3. Среднечастотная модуляция ВЧ мощности при плазмохимическом травлении..... | 506 |
| 12.4. Другие примеры применения установок с ТСП источниками для ионно- и плазмохимического травления..... | 507 |
| Глава 13. Установка Caroline PECVD 15 для плазмостимулированного химического осаждения из паров (PECVD) с применением ТСП источника..... | 510 |

| | |
|---|------------|
| Литература к главам 10—13..... | 512 |
| Глава 14. Рекомендации по комплектации вакуумных участков для производства различных изделий электронной техники вакуумно-технологическим оборудованием фирмы «ЭСТО-Вакуум»..... | 515 |
| 14.1. Участок производства ГИС..... | 515 |
| 14.2. Участок производства СВЧ ГИС..... | 518 |
| 14.3. Производство ГИС с многоуровневой разводкой..... | 519 |
| 14.4. Участок производства полупроводниковых приборов и ИС..... | 520 |
| Резюме..... | 522 |
| Приложение | |
| Общепринятые в иностранной литературе сокращения..... | 523 |