

次世代半導体用の難加工結晶材料のための 超精密加工技術

SAMPLE

監修
會田 英雄
土肥 俊郎

はじめに

シリコン半導体が現代のハイテク技術の数々を担っていることは、本書の読者の多くが知るところであろう。近年では、ここにSiC、GaNといった新たな結晶材料群が加わることで、これまでよりも一層の高機能化、高効率化したデバイスの出現が期待されている。これらの材料はその結晶成長の難しさから、長らく大型結晶が得られずにいたが、長年の地道な研究開発により、実用レベルのサイズと品質が達成されつつある。新素材による新デバイスの実用化が一気に現実味を帯び始めている。

一方、これらの材料を用いるために必要な各種の精密基板加工技術は、未だに決定打を欠いている。新材料はいずれも高硬度脆性材料であるとともに、高い熱的・化学的安定性を備えている。加工が著しく難しく、難加工材料にカテゴライズされている。シリコン加工技術をベースとした従来加工の延長線で議論しては、来るべき新デバイスの本格的実用化に対して加工技術がボトルネックとなりかねない。加工開発を一気に加速していく必要がある。

本書はこのような現状を鑑みて、次世代半導体用の難加工結晶材料に対する超精密加工技術に特化した専門書籍として編集を行った。精密加工に関わる専門書籍が多数存在する中、当該分野の第一線で活躍されている多くの研究者・技術者の方々にご協力をいただくことで、これらの結晶材料基板加工に特化した特色ある専門書籍として完成した。

全8章におよぶ本書の構成は以下のとおりである。

まず第1章において、脚光を浴びる各種の結晶材料、デバイス技術の状況を議論する。目前に迫る新デバイス開発の最前線を理解し、デバイス実現に向けた加工技術開発の重要性や意義を改めて認識いただきたい。

第2章においては、各種の新結晶材に対する基板加工技術の実状を整理した。極めてホットな領域であると同時に、製造上の企業秘密やノウハウを含むセンシティブな状況もある。最新結晶材料に対する基板製造加工に実際に携わる専門家に執筆を依頼しており、必ずしも全ての情報が開示されていない点をご容赦いただきたい。

第3章および第4章では、基板製造に関わる加工装置および加工副資材を取り上げた。加工装置や加工副資材の基礎を解説しつつ、次世代材料への応用発展を見据えたポイントを幅広く紹介した。

第5章では、基板加工技術をいったん離れ、デバイスプロセスで必要となる各種の精密加工技術を議論した。新デバイスが本格的な普及期に入れば、いずれ必ずデバイスプロセスでの加工技術にも革新が求められることとなる。現状技術を総括的に把握しつつ、将来課題に対する議論の出発点としていただきたい。

第6章は、基板加工に関わる各種の評価計測技術を総合的に取り上げた。基板品質保証として重要な表面品質ならびに形状品質の計測技術を取り上げるとともに、加工変

質層評価技術に重点を置き、次世代結晶材料のためのさまざまな変質層評価手法を紹介した。変質層評価技術は、次世代結晶素材のための加工技術開発促進のための重要な武器である。

第7章は、次世代加工技術開発の基礎となる加工メカニズム解明に向けた取り組みにフォーカスした。すなわち、加工現象の「見える化」のための最新計測評価技術の数々を取り上げた。「見える化」によって加工メカニズムが明らかとなれば、次世代材料用の加工装置、加工副資材開発のための大きなヒントを得ることになるだろう。

最後に第8章では、次世代の高効率・高品位加工技術の数々を取り上げた。新しくユニークな発想のもとで生まれた最新の加工技術が実用化されて基板加工工程に組み込まれていくことを願うとともに、新たな加工技術創出のためのヒントとなることを期待したい。

本書の発刊に際して、書籍企画にご賛同いただき編集委員を引き受けてくださった先生方、ご多忙にもかかわらずご執筆を快諾いただいた執筆者の皆さま、ならびに出版元の株式会社R&D支援センター守谷慎太郎氏に、厚くお礼を申し上げます。

2024年4月

長岡技術科学大学 會田 英雄
株式会社Doi Laboratory 土肥 俊郎

目 次

はじめに	2
------------	---

會田 英雄

土肥 俊郎

第1章 化合物半導体の結晶育成技術とデバイス応用	29
--------------------------------	----

はじめに	30
------------	----

山本 秀和

1 ワイドギャップ半導体パワーデバイスの優位性と課題	30
1.1 ワイドギャップ半導体パワーデバイスの優位性	30
1.2 ワイドギャップ半導体パワーデバイスの課題	31
2 結晶/ウェーハ製造技術	31
2.1 シリコン単結晶/ウェーハの製造	31
2.2 ワイドギャップ半導体結晶/ウェーハの製造	31
3 パワーエレクトロニクス機器の信頼性	32
3.1 パワーエレクトロニクス機器の故障モード	32
3.2 ワイドギャップ半導体パワーデバイスの信頼性への不安	33

第1節 SiC 結晶技術の現状と課題	34
--------------------------	----

近藤 宏行

1 はじめに	34
2 SiC 単結晶の多形	35
3 SiC 単結晶の結晶欠陥	35
4 SiC 単結晶の結晶成長技術の現状と今後の課題	36
4.1 昇華法成長	36
4.2 結晶成長技術の今後の課題	38

第2節 GaN 結晶技術の現状と課題	40
--------------------------	----

只友 一行

1 まえがき	40
2 ワイドバンドギャップ (WBG) 半導体	41
2.1 ワイドギャップ半導体の概要	41

2.2	ワイドギャップ半導体の性能指数	43
3	GaN結晶の課題と各種成長方法	44
3.1	GaN結晶成長法の概要	44
3.2	GaN結晶の課題:貫通転位と結晶格子の湾曲(反り)	45
3.3	高圧融液成長法	47
3.4	高圧溶液成長法(HPSG:High Pressure Solution Growth)	47
3.5	アモノサーマル法(Ammonothermal method)	48
3.6	Naフラックス法(Na-Flux method)	49
3.7	HVPE法(水素化物気相エピタキシャル成長:Hydride Vapor Phase Epitaxy method)	50
3.8	OVPE法(酸化物気相エピタキシャル成長:Oxide Vapor Phase Epitaxy method)	51
4	GaN基板に関する今後の課題とまとめ	51
4.1	今後の課題	51
4.2	低コスト化	52

第3節 AlN結晶技術の現状

鈴木 崇志

1	はじめに	54
1.1	AlN単結晶成長技術	54
1.1.1	AlN単結晶成長における坩堝材料の選定	55
1.1.2	AlN単結晶成長における種結晶の選定	56
1.2	AlN単結晶の品質	57
1.2.1	AlN単結晶の結晶品質の評価	57
1.2.2	紫外線吸収	58
2	AlN基板を用いたUV-C LED	59
3	今後の展望	59

第4節 Ga₂O₃結晶技術の現状と課題

佐々木 公平

1	はじめに	61
2	Ga ₂ O ₃ 結晶成長技術	62
2.1	バルク結晶成長	62
2.2	エピタキシャル成長	63
3	まとめ	66

第5節	ダイヤモンド結晶技術の現状と課題	68	鹿田 真一
1	はじめに	68	
2	結晶成長	68	
2.1	高温高压	68	
2.1.1	温度差法	69	
2.1.2	成長速度とサイズ	70	
2.2	気相合成	70	
2.2.1	合成概要	71	
2.2.2	大面積基板合成	72	
3	結晶性・転位	73	
3.1	転位	73	
3.1.1	高温高压結晶	73	
3.1.2	CVD結晶	74	
3.1.3	CVD結晶によるエピタキシャル膜	75	
3.2	転位終端の可能性	75	
4	終わりに	76	
第2章	基板加工技術の現状と課題	79	
	はじめに	80	會田 英雄
第1節	SiC基板加工	83	長屋 正武
1	はじめに	83	
2	プロジェクトの目標	84	
3	開発した要素技術	85	
4	要素技術を組み合わせた一貫加工プロセス	91	
5	開発の成果と今後の期待	95	
6	謝辞	96	
第2節	GaN基板加工	97	皿山 正二

1	GaN結晶加工における課題～なぜGaN結晶加工が難しいか	97
1.1	機械的・化学的特性による要因	97
1.1.1	機械的特性：硬度と脆性	97
1.1.2	化学的特性	98
1.2	結晶成長起因の要因	99
1.3	結晶構造・結晶面起因の要因	101
2	GaN結晶の基板加工技術	102
2.1	スライス（切断）加工	102
2.2	研削・機械研磨加工	103
2.2.1	研削・機械研磨で用いられる砥粒・砥石・スラリー	103
2.2.2	研削加工	105
2.2.3	機械研磨加工	106
2.2.4	研削と機械研磨の比較	107
2.3	CMP加工	108
3	終わりに	110

第3節 AlN基板加工技術の現状と課題 113

鈴木 崇志

1	はじめに	113
2	AlN単結晶基板の基板加工	113
3	AlN単結晶基板の品質課題	114
3.1	スクラッチ	114
3.2	サブサーフェスダメージ	115
3.3	ヒロック	116
4	大口径AlN単結晶基板	117

第4節 Ga₂O₃基板加工 119

渡辺 信也

1	酸化ガリウムの特徴	119
2	ウエハ製造工程	120
3	まとめ	122

第5節 宝飾用ダイヤモンド加工とその歴史 123

原田 裕幸

1	はじめに	123
---	------	-----

2	ダイヤモンド研磨の歴史	123
2.1	古代エジプト、インド	123
2.2	13～14世紀頃	124
2.3	16～17世紀	125
2.4	17世紀	126
2.5	19世紀	126
2.6	20世紀	128
3	宝飾用ダイヤモンド研磨基本工程	131
4	おわりに	135

第3章 基板製造のための各種加工装置 137

はじめに	138
------------	-----

小堀 康之

第1節 基板の切断 - ワイヤソーによる GaN の切断を例に - 141

橋本 忠朗

1	はじめに	141
2	ワイヤソーによる結晶切断の概要	141
3	バルク GaN 結晶のマルチワイヤソーによる切断	143
4	まとめ	146

第2節 基板の面取加工 - ウェハ面取加工装置と砥石の仕組 - 147

尾崎 雅英

1	はじめに	147
2	面取り加工装置に求められる性能	147
3	NC制御によるツインコンタリング方式を採用した面取り加工装置の概要	149
3.1	装置構成	149
3.2	研削部（総型研削部（外周用・ノッチ用）、コンタリング部）	149
4	SiC ウェハへの加工事例と課題	152
4.1	加工プロセス1の場合	152
4.2	加工プロセス2の場合	153
5	おわりに	154

第3節 基板の研削加工 -研削加工の仕組 装置と工具- 155

後藤 和彦

1	概論～プロローグ	155
2	研削加工に求められる課題	155
3	研削加工での具体的対応策	156
4	研削装置の構成と構造	156
4.1	揺動機構の構造	156
4.2	揺動機構の目的	157
4.3	揺動機構の効果	158
5	研削装置で使用する砥石と研削液というアイテム	159
5.1	研削液の重要な作用	159
5.2	砥石自生作用の促進	159
6	研削性能を発揮させる動作フローと加工レシピ	161
6.1	揺動機構の複合動作	161
6.1.1	間欠動作砥石進行中/砥石揺動連動	161
6.1.2	間欠動作砥石停止中/砥石揺動連動	161
6.2	多段ステップ加工	163
6.3	スパークアウト/ゼロカット揺動	163
7	総論～エピローグ	163

第4節 基板のラップ加工 -ラップ盤の説明 両面ラップ加工データの紹介- ... 164

豊田 和彦

1	はじめに	164
1.1	ラップ盤, ポリッシュ盤の種類	165
1.2	片面加工機と両面加工機	165
2	片面加工と両面加工の加工プロセス	166
2.1	従来からの片面加工と両面加工との違い	166
3	単結晶 SiC 両面加工	167
3.1	単結晶、多結晶 SiC のコストダウン加工方法	167
3.2	GaN や SiC の両面加工例	169
4	おわりに	173

第5節 基板のポリッシュ加工 -CMP加工と加工機- 174

宮下 忠一

1	基板製造における CMP 加工	174
---	-----------------------	-----

2	基板用CMP加工装置	175
2.1	バッチ式片面研磨装置	175
2.1.1	ローラー支持方式	175
2.1.2	軸支持方式	176
2.2	枚葉式片面研磨装置	177
2.3	両面研磨装置	178
2.4	難加工基板向け高速高圧研磨装置	179

第4章 研削・研磨加工のための副資材類 183

はじめに	184
	伊東 利洋
1 スライシング	184
2 ラッピング	184
3 研磨フィルム	184
4 研削砥石	185
5 CMPスラリー	185
6 研磨パッド	185
7 半固定砥粒研磨工具「LHAパッド®」	185
8 研削・研磨加工のための副資材類	185

第1節 ワイヤソー 187

	萩原 直樹
1 概要	187
1.1 背景	187
2 ワイヤソー加工方式	187
2.1 遊離砥粒	187
2.2 固定砥粒	187
3 ワイヤソー加工実例	188
3.1 SiC	188
3.1.1 マルチワイヤソー加工	188
3.1.2 シングルワイヤソー加工	189
3.2 GaN	190
3.3 ダイヤモンド	190

第2節 ダイヤモンドスラリー 191

田中 匡志

- 1 はじめに 191
- 2 ダイヤラップ研磨 191
- 3 SiC研削・ラップ研磨加工と評価 192
- 4 考察 195

第3節 研磨フィルム（ダイヤモンド砥粒研磨フィルム） 197

山口 直宏

- 1 はじめに 197
- 2 研磨フィルムについて 197
 - 2.1 研磨フィルムの概要 197
 - 2.2 研削加工方式との比較 198
- 3 研磨フィルム用いる研磨装置について 199
 - 3.1 エッジ部（ノッチ・オリフラ部）研磨用装置 199
 - 3.2 表裏面（平面）研磨用装置 201
- 4 超難加工材料向けアプリケーション例 202
 - 4.1 面取り加工（低ダメージ面取り加工、低歪み加工） 202
 - 4.2 エッジ部、ノッチ部の鏡面加工（ウェーハ端面部の鏡面加工） 202
 - 4.3 テラス加工（トップエッジ部の研磨加工） 203
 - 4.4 接合処理を目的とした平面研磨加工 204
 - 4.5 エッジ部周辺のメタル膜等の残渣（不要膜）除去加工 205
 - 4.6 バックグランド加工（薄化工程）歩留まり改善、エッジトリミング加工 206
 - 4.7 接合（接着）ウェーハのエッジトリートメント処理 207
- 5 次世代研磨フィルムについて 207
- 6 おわりに 208

第4節 研削砥石 209

瀬川 悟志

- 1 はじめに 209
- 2 研削砥石の構成要素 209
- 3 高能率・高品質化のための工夫 210
- 4 研削性能の半導体材料依存性 211
- 5 おわりに 213

第5節	CMP スラリー	215
	高見 信一郎	
1	はじめに	215
2	SiC 半導体基板研磨の基礎	215
2.1	SiC の研磨方法	215
2.2	SiC の研磨スラリー	216
2.3	SiC 基板研磨の目的	216
2.4	SiC 用途研磨スラリーの研磨能率	217
2.5	SiC 用途研磨スラリーの研磨精度	218
3	SiC 半導体基板の多段研磨による高品質化	219
3.1	SiC 研磨精度の深掘り	219
3.2	SiC 研磨微小欠陥がエピ後の表面品質に与える影響	220
3.3	SiC 研磨プロセスの多段化	220
4	SiC 半導体基板の実際の研磨プロセス	222
4.1	研磨プロセスの実際	222
4.2	研磨条件に合わせたSiC 研磨スラリーの選択	222
5	おわりに	223
第6節	研磨パッド	225
	松下 隆幸	
1	はじめに	225
2	研磨パッドの働き	225
2.1	研磨パッドの表面状態	225
2.2	コンタクトエリアとコンタクトポイント	227
2.3	研磨パッドの圧縮挙動と粘弾性特性	228
3	研磨パッドの種類	229
3.1	硬質発泡タイプ	229
3.2	不織布タイプ	230
3.3	スウェードタイプ	230
4	研磨パッドに対する要求性能	230
4.1	シリコンウェーハ用研磨パッド	230
4.2	デバイスウェーハ用研磨パッド	231
4.3	難研磨物用研磨パッド	231
5	研磨パッドと研磨性能	232
5.1	研磨パッドの種類と研磨性能（研磨レート・表面粗さ・平坦性）	232

5.2	研磨パッドの溝と研磨性能（研磨レート・表面粗さ）	233
5.3	研磨パッドの目詰まりとその対策	234
6	研磨パッドの適用例	235
7	まとめ	235

第7節 半固定砥粒研磨工具「LHAパッド」

北嶋 将太、倉見 比奈子、井上 正

1	はじめに	237
2	LHAパッドとは	239
3	LHAパッドの研磨性能	241
4	廃棄物の削減効果	243
5	今後の展望～両面研磨の取組み～	244

第8節 添加剤

齋藤 陽介

1	はじめに	246
2	加工液の化学的作用	246
2.1	分散剤	246
2.2	潤滑剤	248
2.3	浸透剤	249
2.4	その他の添加剤	250
3	遊離砥粒加工による添加剤の選定	251
3.1	切断加工用クーラント剤への応用	251
3.1.1	遊離砥粒加工における分散性について	251
3.1.2	遊離砥粒クーラントにおける浸透性について	252
3.1.3	遊離砥粒クーラントにおける潤滑性について	253
4	添加剤の化学物質規制、環境対応について	253

第5章 デバイスプロセスのための加工装置・加工技術

はじめに

有田 潔

1	ワイドバンドギャップ半導体デバイスとその加工技術	256
1.1	日本におけるパワー半導体デバイスとその加工技術の重要性	256
1.2	ワイドバンドギャップ半導体ウエハのための加工工法	256

第1節	バックグラインド	258	石川 一政
1	背景	258	
2	研削装置の課題と高剛性研削盤	258	
2.1	従来型研削盤の課題	258	
2.2	高剛性研削盤HRGシリーズの紹介	260	
3	SiC研削プロセス	264	
3.1	SiCウェーハ製造工程と研削に求められる技術	264	
3.2	SiCデバイス工程と研削に求められる技術	265	
4	今後の課題と展望	267	
第2節	CMP	268	檜山 浩國
1	はじめに	268	
2	半導体の歴史とCMP	268	
3	CMP装置と技術	270	
3.1	CMPの歴史	270	
3.2	CMP装置	272	
4	おわりに	275	
第3節	ブレードダイシング	277	久保 祐一
1	SiC/GaN基板の特徴	277	
1.1	SiC/GaN基板	277	
1.2	SiC/GaNの半導体基板	277	
2	SiC/GaNの加工方法	278	
3	使用するダイシングブレード	279	
4	SiC/GaNのダイシング技術	280	
4.1	SiC/GaN加工用ブレード	280	
4.2	ダイシングテープの選定	281	
4.3	SiC基板の特徴	283	
4.4	SiC基板の加工事例	283	

第4節	ステルスダイシング	285
	久野 耕司	
1	はじめに	285
2	ステルスダイシングの概要説明	285
2.1	ステルスダイシングとは	285
2.1.1	レーザ照射工程	285
2.1.2	分割工程	286
2.2	ステルスダイシングの特長	287
3	ステルスダイシングの構成	288
3.1	エンジン全体の構成	288
3.2	デバイスに適したエンジン構成	289
3.3	LBAの搭載	290
4	加工例	291
4.1	ダイシングプロセス	291
4.1.1	SiCのダイシング加工結果	291
4.1.2	GaNのダイシング加工結果	292
4.1.3	Ga ₂ O ₃ のダイシング加工の取り組み	293
4.2	スライシングプロセス	293
5	まとめ	294
第5節	プラズマダイシング	297
	鈴木 宏之	
1	はじめに	297
2	プラズマダイシング工法の特徴	297
2.1	従来工法との比較	297
2.2	プラズマダイシング装置	298
2.3	プラズマダイシングの4つのメリット	299
2.3.1	高抗折強度	299
2.3.2	パーティクルレス	300
2.3.3	高生産性（小チップ）	301
2.3.4	異形チップレイアウト	302
2.4	プロセスフロー	302
3	加工応用事例	303
3.1	シリコン半導体（Si、SiO ₂ 、SiN材料の加工）	303
3.2	化合物半導体（SiC材料の加工）	305

4	さいごに	306
---	------------	-----

第6章 基板の計測・評価技術 309

はじめに	310
------------	-----

石川 由加里

第1節 基板形状の計測・評価技術 312

小川 光弘、近藤 利幸

1	はじめに	312
2	基板測定方式の各種手法	313
3	各種測定方式の特長	314
4	おわりに	319

第2節 コンフォーカル微分干渉 - 基板表面形状検査技術 - 320

藤木 翔太

1	はじめに	320
2	ワイドギャップ半導体検査に適した光学系	322
3	CMP後のワイドギャップ半導体検査技術	323
4	ワイドギャップ半導体に求められる欠陥分類技術	325
5	多種解析装置との連携	326
6	おわりに	327

第3節 ミラー電子式検査装置 - 表面電位変化を利用した結晶欠陥と潜傷の検出 - 329

小林 健二

1	はじめに	329
2	SiC ウェーハの欠陥と欠陥検出技術	329
2.1	SiC ウェーハの特徴と欠陥	329
2.2	SiC ウェーハ欠陥検査技術	330
3	ミラー電子顕微鏡技術	331
3.1	第三の顕微鏡	331
3.2	ミラー電子顕微鏡の光学系と像形成原理	331
3.2.1	ミラー電子顕微鏡の光学系	331
3.2.2	像形成原理	332

3.3	ミラー電子顕微鏡の特長	334
4	ミラー電子式検査装置 Mirelis VM1000	335
5	Mirelis VM1000による SiC ウェーハ検査の実例	336
5.1	SiC バルクウェーハ品質管理	336
5.1.1	SiC バルクウェーハ欠陥と検出事例	336
5.1.2	潜傷の解析結果	338
5.2	SiC エピウェーハ品質管理	339
5.2.1	SiC エピウェーハ欠陥の非破壊管理	339
5.2.2	SiC エピウェーハ欠陥分類精度向上	340
6	おわりに	341

第4節 カソードルミネッセンス-発光変化を利用した欠陥とスクラッチと潜傷の検出- 343

中川 健

1	カソードルミネッセンス (Cathodoluminescence : CL) とは	343
2	CLの原理	344
3	CL測定装置について	345
3.1	励起源	346
3.2	集光系	346
3.3	分光系	347
3.4	検出系	347
3.5	制御・データ処理系	347
4	化合物半導体のCL評価	348
4.1	GaN/エピ基板の欠陥評価	348
4.2	InP基板表面のダメージ誘起の発光中心の観察	349
4.3	LEDデバイス (GaN) の評価	350
5	化合物半導体基板のCL評価	351
6	おわりに	352

第5節 多光子顕微鏡-発光効率変化を利用した欠陥とスクラッチと潜傷の3次元検出- 354

石川 由加里

1	多光子励起顕微鏡とは	354
2	ワイドバンドギャップ半導体への応用	355
3	加工導入欠陥の検出	356
3.1	スクラッチの検出	356
3.2	加工変質層厚推定のためのモデル実験	358

第6節 ラマン分光-ラマンシフトを利用した応力計測と分布評価-… 363

足立 真理子

1	概要	363
2	レーザーラマン顕微鏡の原理と加工プロセス評価時の要点	363
2.1	ラマン分光法の原理	363
2.2	応力測定	365
2.3	レーザーラマン顕微鏡の原理	366
3	分析事例と測定の要点	367
3.1	SiC加工基板の応力評価	367
3.1.1	SiC基板表面加工プロセスの応力評価事例	367
3.1.2	Z（内部）方向測定の要点	368
3.1.3	レーザー波長と分析深さ	368
3.2	ガリウムナイトライド（以下、GaN）加工基板の応力評価	369
3.3	Si加工基板の基板全面応力評価	371
4	まとめ	373

第7節 X線回折法-X線回折の乱れを利用した欠陥と歪の評価-… 374

稲葉 克彦

1	はじめに	374
2	X線回折法とX線ロックングカーブ測定法	374
2.1	X線回折法の基礎	374
2.2	X線ロックングカーブ測定法とは	375
2.3	X線回折測定の際のX線の侵入深さ	376
2.4	XRC測定の応用-格子面の反りの解析	376
2.5	単結晶基板表面の加工層の評価	377
3	X線トポグラフィ法（XRT）	378
4	まとめ	379

第8節 電子線後方散乱回折-電子線回折の乱れを利用した歪の計測と分布評価-… 382

横江 大作

1	加工影響層	382
1.1	機械加工による影響	382
1.2	結晶歪みとその問題点	382
2	EBSD測定	383
2.1	EBSD測定	383

2.2	EBSD測定による結晶歪み解析	384
2.3	Wilkinson測定	385
2.4	試料調製および測定	386
2.5	Wilkinson解析結果	387

第9節 透過型電子顕微鏡 - 電子線回折を利用した転位解析 - 389

菅原 義弘

1	電子顕微鏡解析の意義	389
2	観察試料の作製方法	390
3	転位構造の解析手法	392
3.1	平行電子線と収束電子線	392
3.2	明視野・暗視野法	393
3.3	大角度収束電子線回折法	394
4	GaN結晶中の転位構造解析	395

第7章 加工メカニズム解明に向けた取り組み 399

はじめに 400

畝田 道雄

第1節 加工中のスラリー挙動（その1） 402

畝田 道雄

1	はじめに	402
2	ウェーハとパッドの接触状態の見える化	402
3	スラリー挙動の見える化	404
3.1	マクロ的視点から	404
3.2	ミクロ的視点から	406

第2節 加工中のスラリー挙動（その2） 409

福田 明

1	はじめに	409
2	可視化観察方法および実験装置	409
3	実験方法	412
4	実験結果	413

4.1	鉛直断面の可視化観察結果	413
4.2	鉛直断面の流速分布解析結果	414
5	考察	416
6	おわりに	417
7	謝辞	417
第3節	両面研磨中のウエハ挙動	419
	橋本 洋平	
1	はじめに	419
2	ウエハ挙動の解析手法	419
2.1	両面研磨プロセス	419
2.2	ウエハ回転数の解析手法	420
3	推定されるウエハ挙動	422
4	おわりに	424
第4節	光弾性法による加工ストレスの可視化	425
	磯部 浩巳	
1	はじめに	425
2	光弾性法と位相差分布撮影方法	425
3	光弾性法を応用した加工現象の可視化事例	427
3.1	準静的な二次元切削	427
3.2	超音波切削時の応力分布変動の可視化	429
3.3	回転工具における応力分布の可視化	430
第5節	精密研削・精密研磨の加工メカニズム解明を目的とした加工変質層の構造推定	433
	大宮 奈津子	
1	はじめに	433
2	一般的な加工変質層の構造推定方法	433
3	難加工材基板の加工変質層の構造推定方法～Ga _N 基板を例に	435
3.1	CLイメージング法によるGa _N 基板の観察	435
3.2	CMP時間依存CLイメージング法による加工変質層の構造推定	436
4	おわりに	438

第6節 研磨プロセスのスマート化を支えるモデルベースシミュレーション … 440

鈴木 教和

1 緒言	440
2 研磨プロセスのモデル化	441
2.1 半導体CMPのモデルベースシミュレーションの概要	441
2.2 機械の運動を考慮したキネマティックモデル	442
2.3 研磨効率モデル	443
2.4 パラメータ同定	444
3 検証実験の結果と考察	446

第7節 研磨プロセスの知能化への挑戦 … 450

畝田 道雄

1 はじめに	450
2 予測するパラメータと評価方法	450
3 重回帰分析を用いた予測の方法と結果	451
4 装置特性を考慮した予測の結果と有効性	453

第8章 新加工技術への道 … 455

はじめに … 456

土肥 俊郎

第1節 真空紫外光援用研磨 … 460

久保田 章亀

1 はじめに	460
2 真空紫外光援用研磨の開発経緯	460
3 真空紫外光援用研磨	461
4 真空紫外光援用研磨によるダイヤモンドの研磨実施例	463
5 おわりに	464

第2節 触媒表面基準エッチング (CARE) … 467

佐野 泰久

1 はじめに	467
2 基礎概念および加工装置	467

3	加工特性	468
3.1	加工後表面	468
3.2	加工速度	469
4	加工メカニズム	470
5	加工の効果	471
6	おわりに	471

第3節 固体電解質応用電気化学融合研磨 474

村田 順二

1	はじめに	474
2	提案するECMPの原理	474
3	ECMP装置構成	475
4	研磨特性	476
4.1	材料除去速度	476
4.2	加工面形状および表面粗さ	477
5	おわりに	479

第4節 プラズマCMP加工技術 480

會田 英雄

1	はじめに	480
2	プラズマCMP加工法のコンセプト	480
3	プラズマCMP加工装置	481
4	プラズマCMPによる各種材料の加工特性	483
5	おわりに	483

第5節 ダイラタンシー発現により高能率・高品位加工を両立するスマート加工 485

瀬下 清

1	はじめに	485
2	スマート加工プロセスを構築する基本コンセプト	485
2.1	高剛性高速圧加工装置の基本概念	485
2.2	ダイラタンシー・パッドの基本概念	486
3	ダイラタンシー・パッドの研磨加工性能	488
3.1	高加工能率化のメカニズム	488
3.2	高品位・低ダメージ加工のメカニズム	489
4	スマート加工プロセス	491

4.1	スマート加工プロセスによる加工時間の短縮	492
4.2	スマート加工技術の最終品質検証（エピタキシャル成長による評価）	494
5	スマート加工技術のむすび	494

第6節 ベルジャー研磨 498

黒河 周平

1	はじめに	498
2	密閉耐圧チャンバー（Bell-jar）型CMP装置	498
3	異なる加工雰囲気下での4H-SiCの基本的加工特性	500
3.1	実験条件	500
3.2	実験結果	501
4	化学的作用を持つ砥粒と酸化剤による加工レート向上効果	502
4.1	KMnO ₄ を添加したMnO ₂ スラリーによる加工レートへの影響	502
4.2	填充気体成分比率による加工レートへの影響	504
5	おわりに	505

第7節 UV（紫外線）直接照射アシスト研磨 506

松井 伸介

1	はじめに	506
2	UV照射アシスト研磨と装置構成	506
3	UV直接照射アシスト研磨の加工特性	509
4	まとめ	511

第8節 ガスクラスターイオンビーム（GCIB）加工 513

豊田 紀章

1	ガスクラスターイオンビーム（GCIB）について	513
1.1	はじめに	513
1.2	ガスクラスターイオンビームの照射効果	513
1.3	ガスクラスターイオンビーム装置	514
2	ガスクラスターイオンビームによる加工	515
2.1	表面平坦化	515
2.2	GCIB照射位置制御を用いたトリミング加工	516
3	おわりに	517

第9節 低ダメージ電界ダイヤモンドポリシング技術 519

千葉 翔悟

- 1 はじめに 519
- 2 高硬質樹脂パッドによるダイヤモンドポリシングの加工特性 519
 - 2.1 金属製定盤と高硬質樹脂パッドにおける研磨界面の砥粒挙動 519
 - 2.2 高硬質樹脂パッドが加工変質層低減に及ぼす影響 521
- 3 電界砥粒制御技術が研磨効率の向上に及ぼす影響 523
 - 3.1 遊離砥粒研磨法と電界砥粒制御技術 524
 - 3.2 電界研磨装置の構成 525
 - 3.3 電界ダイヤモンドポリシングの研磨特性 525
- 4 おわりに 527

第10節 GaN・SiC等に対応した次世代型精密研削・研磨加工技術 529

永橋 潤司

- 1 固定砥粒定盤を用いた化合物半導体の平坦・平滑加工 529
 - 1.1 SiC ウェハの高効率・高精度加工 529
 - 1.1.1 ラッピング技術と研削技術 529
 - 1.1.2 固定砥粒定盤 530
 - 1.1.3 固定砥粒定盤によるラッピング加工データ 531
 - 1.1.4 固定砥粒定盤による両面ラップ加工 532
 - 1.1.5 固定砥粒定盤による高速ラッピング技術 533
 - 1.1.6 CMP 負荷の低減を目指した超微粒子固定砥粒定盤 535
 - 1.2 GaN ウェハに対する固定砥粒定盤加工 536
 - 1.2.1 GaN ウェハのラッピング技術と研削技術 536
 - 1.2.2 固定砥粒定盤による GaN ウェハ加工 536
 - 1.2.3 固定砥粒定盤による GaN ウェハ加工データ 536
- 2 遊離砥粒加工と固定砥粒加工 538

次世代半導体用の難加工結晶材料のための超精密加工技術

SAMPLE

第1章

化合物半導体の結晶育成技術とデバイス応用

SAMPLE

はじめに

グリーンパワー山本研究所

山本 秀和

1 ワイドギャップ半導体パワーデバイスの優位性と課題

1.1 ワイドギャップ半導体パワーデバイスの優位性

ワイドギャップ半導体は、構成原子あるいはイオンの半径が小さいため、原子/イオン間の距離が短く、原子/イオン間の結合力が大きい。そのため、パワーデバイスとして広く流通しているシリコンと比較して優位な物性値を有している¹⁾。絶縁破壊電界が高いので、同じ厚さであればシリコンの10倍以上の高電圧に耐えられる。図1は、広くパワーデバイスの性能指数（FOM：Figure of Merit）として用いられているバリガ指数とバンドギャップの関係である。図中、 E_b は絶縁破壊電界、 ϵ は誘電率、 μ_n は電子の移動度である。バンドギャップが大きくなると、おおよそ指数関数的にFOMが大きくなる。これは、ワイドギャップ半導体がパワーデバイスとして高いポテンシャルを有していることを示している。この数値はあくまで指標であり、実デバイスで性能が発揮されるかは、試作してみないとわからない。さらに、デバイスの量産においては、

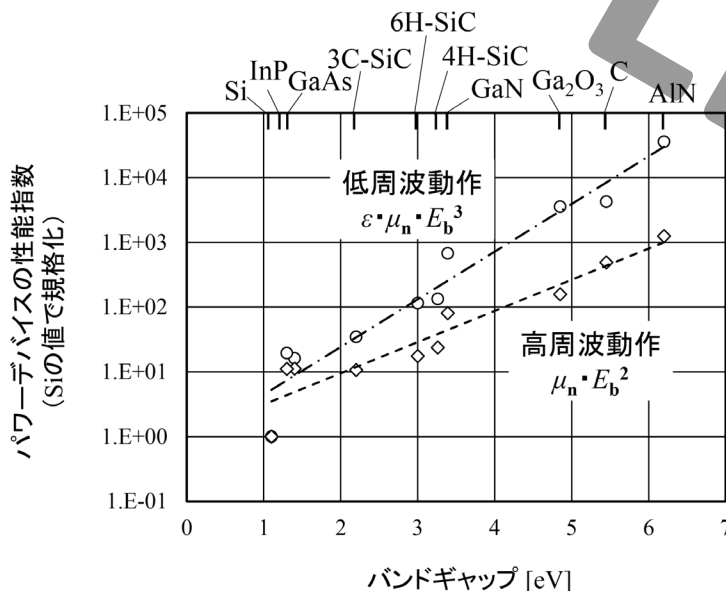


図1 パワーデバイスの性能指数とバンドギャップ依存性

さまざまな阻害要因が発生する。

1.2 ワイドギャップ半導体パワーデバイスの課題

ワイドギャップ半導体の構成原子/イオン間の結合力が強いということは、電氣的に安定だけでなく、機械的、熱的、さらに化学的にも安定である。これは諸刃の剣であり、シリコンと比較して、ウェーハおよびチップ製造プロセスを格段に難しくしている。そのため、試作されたパワーデバイスの性能が良好であるにも関わらず、製造コストが高く、大量生産に至らない状況が長く続いている。

ワイドギャップ半導体パワーデバイスにおける最大の課題のひとつは、結晶/ウェーハの製造技術である。とくに、高品質の結晶/ウェーハの製造が難しく、デバイスの量産化および信頼性の向上に不安を抱えている。

2 結晶/ウェーハ製造技術

2.1 シリコン単結晶/ウェーハの製造

シリコンは1500℃程度に加熱すると溶解するため、シリコン単結晶は融液法で製造されている。融液法では、数mm程度の種結晶を用いたダッシュネッキングと呼ばれる手法を用いることにより、完全無転位での結晶育成が可能である。また、ウェーハ加工技術も長年の開発に裏付けられた超平坦化が実現できている。これらの技術を反映させた高品質ウェーハがシリコン集積回路の製造を可能にしてきた。シリコンパワーデバイスに関しても、この結晶/ウェーハ製造技術の展開により、量産化が実現できた。

歴史的に、シリコン集積回路においては、何度もウェーハ供給危機にみまわれてきた。それに対しては、その都度大手のシリコンウェーハ製造メーカーである信越半導体およびSUMCOがウェーハ増産体制を確立してくれたことにより、ウェーハ供給危機を回避できた。この2大ウェーハメーカーが日本メーカーであったことが、日本のデバイスメーカーにとって有利に働いた。シリコン単結晶/ウェーハは、それが可能な製造法であったといえる。

2.2 ワイドギャップ半導体結晶/ウェーハの製造

SiCおよびGaNは融点が高く、人類が製造可能な装置では、融液法での結晶製造はいまのところ不可能である。そのため、結晶の大口径化および結晶品質の向上が難しい。SiC単結晶では、シリコン融液を用いた液相からの製造法も開発されているが、この手法は厳密な意味での“SiC”の融液成長ではない。また、SiCウェーハに関しては、日本の大手メーカーが撤退してしまったことが、日本のデバイスメーカーにとっては大きな

打撃であった。

一方、 Ga_2O_3 は融液法での結晶育成が可能である。また、ミスト法と呼ばれる製造法での結晶育成も行われており、ともに低コストでの結晶育成に期待がもてる。シリコンを含めた他のパワーデバイスと異なり、 Ga_2O_3 パワーデバイスは日本が主導権を握っているのも心強い。

さらに、ワイドギャップ半導体は固いため、ウェーハ加工が難しい超難加工材料である。本書はワイドギャップ半導体の加工技術がテーマであり、第2章以降でさまざまな先端技術の開発状況が述べられている。

3 パワーエレクトロニクス機器の信頼性

3.1 パワーエレクトロニクス機器の故障モード

図2は、パワーエレクトロニクス機器の故障モードである²⁾。機器の不良は、キャパシタやゲートドライバなどでも発生しているが、もっとも大きな不良要因はパワーデバイスである。これは古いデータであり、パワーデバイスとしては信頼性の高いシリコンパワーデバイスを適用した場合であると考えられる。信頼性の低いパワーデバイスを適用した場合は、パワーデバイスによる不良が増加することになる。

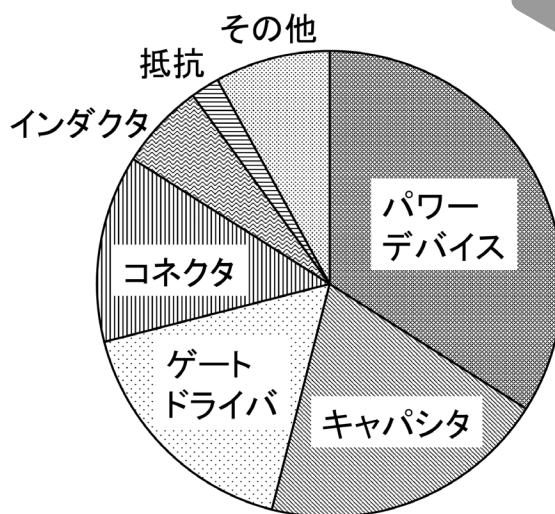


図2 パワーエレクトロニクス機器の故障モード

3.2 ワイドギャップ半導体パワーデバイスの信頼性への不安

現状、もっとも生産数量の多いワイドギャップ半導体パワーデバイスは、SiCを用いたデバイスである。最近、SiCパワーデバイスを電気自動車に適用するような動きがでてきている。シリコンと異なり、SiC ウェーハは簡単に生産量を増やせる製造方法が確立していない。もし、SiCパワーデバイスが急激に使用されだした場合、SiC ウェーハの供給不足に陥ることになる。とくに高品質のウェーハは、デバイスメーカー間での奪い合いとなる。その場合、日本は低品質のウェーハを使用せざるを得なくなる。そして、さらにパワーデバイスの信頼性を低下させることになる。このような負のスパイラルに陥らないよう、SiC結晶/ウェーハの製造技術を向上させなければならない。

パワーデバイスの信頼性は、人の命に関わる。例えば電車への適用であれば、数台で編成された車両のうちの複数台の車両にインバータが搭載されている。仮に1台のインバータに不良が発生しても、他のインバータで走行が可能である。一方、自動車の場合は1台のインバータしか搭載されていない。そのインバータに不良が発生した場合、急停車あるいは暴走につながる可能性がある。デバイス開発者は、人の命を預かるデバイスを開発しているという覚悟を持って開発を行う必要がある。

参考文献

- 1) 山本秀和：「ワイドギャップ半導体パワーデバイス」、コロナ社、p.21(2015).
- 2) S. Yang, D. Xiang, L. Ran and P. Tavner: "An Industry-Based Survey of Reliability in Power Electronic Converters", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, 47, p.1441-1451(2011).