

「低炭素社会を実現する
新材料パワー半導体プロジェクト」

事業原簿【公開】

担当部	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 電子・材料・ナノテクノロジー部
-----	--

—目次—

概要

プロジェクト用語集

I. 事業の位置付け・必要性について	I-1
1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性	I-1
1.1 NEDOが関与することの意義	I-1
1.2 実施の効果(費用対効果)	I-3
2. 事業の背景・目的・位置づけ	I-6
2.1 事業の背景	I-6
2.2 事業の目的	I-9
2.3 事業の位置付け	I-10
II. 研究開発マネジメントについて	II-1
1. 事業の目標	II-1
1.1 事業の全体目標	II-1
1.2 研究開発項目毎の詳細な目標	II-2
1.2.1 高品質・大口径 SiC 結晶成長技術開発／革新的 SiC 結晶成長技術開発	II-2
1.2.1.1 高品質・大口径 SiC 結晶成長技術開発	II-3
1.2.1.1.1 高品質・大口径 SiC 結晶成長技術開発(その1)	II-3
1.2.1.1.2 高品質・大口径 SiC 結晶成長技術開発(その2)	II-3
1.2.1.2 革新的 SiC 結晶成長技術開発	II-3
1.2.1.2.1 革新的 SiC 結晶成長技術開発(その1)	II-3
1.2.1.2.2 革新的 SiC 結晶成長技術開発(その2)	II-4
1.2.2 大口径 SiC ウエハ加工技術開発	II-4
1.2.3 SiC エピタキシャル膜成長技術	II-6
1.2.3.1 大口径対応技術	II-6
1.2.3.2 高速・厚膜成長技術	II-7
1.2.4 SiC 高耐圧スイッチングデバイス製造技術	II-8
1.2.4.1 新規耐圧構造デバイス	II-9
1.2.4.2 高耐圧大容量デバイス／変換器技術	II-9
1.2.5 SiC ウエハ量産化技術開発	II-11
1.2.5.1 SiC ウエハ量産化技術開発(その1)	II-11
1.2.5.2 SiC ウエハ量産化技術開発(その2)	II-11
1.2.6 大口径 SiC ウエハ加工要素プロセス検証	II-12
1.2.7 SiC 高耐圧大容量パワーモジュール検証	II-12
1.2.8 大口径対応デバイスプロセス装置開発	II-13
1.2.8.1 大口径対応デバイスプロセス装置開発(その1)	II-13
1.2.8.2 大口径対応デバイスプロセス装置開発(その2)	II-13
1.2.9 高耐熱部品統合パワーモジュール化技術開発	II-14
1.2.10 共通基盤評価技術	II-14
1.2.11 応用技術調査検討	II-15

2. 事業の計画内容	II-16
2.1 研究開発の内容	II-16
2.1.1 高品質・大口徑 SiC 結晶成長技術開発／革新的 SiC 結晶成長技術開発	II-16
2.1.1.1 高品質・大口徑 SiC 結晶成長技術開発	II-16
2.1.1.1.1 高品質・大口徑 SiC 結晶成長技術開発(その1) (SiC ウエハ量産化技術開発[助成事業]を含む)	II-16
2.1.1.1.2 高品質・大口徑 SiC 結晶成長技術開発(その2) (SiC ウエハ量産化技術開発[助成事業]を含む)	II-18
2.1.1.2 革新的 SiC 結晶成長技術開発	II-20
2.1.1.2.1 革新的 SiC 結晶成長技術開発(その1)－ガス法－	II-20
2.1.1.2.2 革新的 SiC 結晶成長技術開発(その2)－溶液法－	II-22
2.1.2 大口徑 SiC ウエハ加工技術開発 (大口徑 SiC ウエハ加工要素プロセス検証を含む)	II-25
2.1.3 SiC エピタキシャル膜成長技術	II-29
2.1.3.1 大口徑対応技術	II-29
2.1.3.2 高速・厚膜成長技術	II-32
2.1.4 SiC 高耐圧スイッチングデバイス製造技術	II-34
2.1.4.1 新規耐圧構造デバイス	II-34
2.1.4.2 高耐圧大容量デバイス／変換器技術 (SiC 高耐圧大容量パワーモジュール検証を含む)	II-35
2.1.4.3 大口徑対応デバイスプロセス装置[助成事業]	II-38
2.1.4.3.1 大口徑対応デバイスプロセス装置(その1)	II-38
2.1.4.3.2 大口徑対応デバイスプロセス装置(その2)	II-38
2.1.5 共通基盤評価技術開発	II-39
2.1.6 応用技術調査検討	II-44
2.2 研究開発の実施体制	II-46
2.3 研究開発の運営管理	II-49
2.4 研究開発成果の実用化、事業化に向けたマネジメントの妥当性	II-49
3. 情勢変化への対応	II-50
4. 中間評価結果への対応	II-51
5. 評価に関する事項	II-52
III. 研究開発成果について	
1. 事業全体の成果	III-1
2. 研究開発項目毎の成果	III-5
2.1 高品質・大口徑 SiC 結晶成長技術開発／ 革新的 SiC 結晶成長技術開発	III-5
2.1.1 高品質・大口徑 SiC 結晶成長技術開発	III-5
2.1.1.1 高品質・大口徑 SiC 結晶成長技術開発(その1) (SiC ウエハ量産化技術開発[助成事業]を含む)	III-5
2.1.1.2 高品質・大口徑 SiC 結晶成長技術開発(その2) (SiC ウエハ量産化技術開発[助成事業]を含む)	III-8
2.1.2 革新的 SiC 結晶成長技術開発	III-11
2.1.2.1 革新的 SiC 結晶成長技術開発(その1)－ガス法－	III-11

2.1.2.2 革新的 SiC 結晶成長技術開発(その2)ー溶液法ー	Ⅲ-14
------------------------------------	------

2.2 大口径 SiC ウエハ加工技術開発	
(大口径 SiC ウエハ加工要素プロセス検証を含む)	Ⅲ-18
2.3 SiC エピタキシャル膜成長技術	Ⅲ-22
2.3.1 大口径対応技術	Ⅲ-22
2.3.2 高速・厚膜成長技術	Ⅲ-25
2.4 SiC 高耐圧スイッチングデバイス製造技術	Ⅲ-28
2.4.1 新規耐圧構造デバイス	Ⅲ-28
2.4.2 高耐圧大容量デバイス／変換器技術	
(SiC 高耐圧大容量パワーモジュール検証を含む)	Ⅲ-31
2.4.3 大口径対応デバイスプロセス装置	Ⅲ-35
2.4.3.1 大口径対応デバイスプロセス装置(その1)	Ⅲ-35
2.4.3.2 大口径対応デバイスプロセス装置(その2)	Ⅲ-35
2.5 共通基盤評価技術開発	Ⅲ-37
2.6 応用技術調査検討	Ⅲ-40

IV. 実用化、事業化の見通しについて	IV-1
1. 実用化、事業化の見通し	IV-1
1.1 ウエハ関連技術(結晶成長、加工、大口径エピ)	IV-1
1.1.1 集中研開発技術の実用化・事業化の見通し	IV-1
1.1.2 日進分室開発技術の実用化・事業化の見通し	IV-1
1.1.3 富津サイト(分室)開発技術の実用化・事業化の見通し	IV-1
1.2 デバイス／変換技術・機器技術	IV-1
1.2.1 集中研開発技術の実用化・事業化の見通し	IV-1
1.2.2 伊丹分室開発技術の実用化・事業化の見通し	IV-1
1.3. 集中研開発技術の実用化、事業化の方策	IV-2
1.4 大口径対応デバイスプロセス装置開発における	
実用化・事業化の見通し	IV-3
1.4.1 日新イオン機器における実用化・事業化の見通し	IV-3
1.4.2 日立国際電気における実用化・事業化の見通し	IV-4

添付資料

特許、論文、外部発表等リスト

1. 結晶成長技術開発	添付資料-1
1.1 高品質・大口径 SiC 結晶成長技術開発	添付資料-1
1.1.1 高品質・大口径 SiC 結晶成長技術開発(その1)	
(SiC ウエハ量産化技術(助成事業)を含む)	添付資料-1
1.1.2 高品質・大口径 SiC 結晶成長技術開発(その2)	
(SiC ウエハ量産化技術(助成事業)を含む)	添付資料-3
1.2 革新的 SiC 結晶成長技術開発	添付資料-4
1.2.1 革新的 SiC 結晶成長技術開発(その1) ガス法	添付資料-4
1.2.2 革新的 SiC 結晶成長技術開発(その2) 溶液法	添付資料-5
2. 大口径 SiC ウエハ加工技術開発	
(大口径 SiC ウエハ加工要素検証を含む)	添付資料-7
3. エピタキシャル膜成長技術開発	添付資料-8

3.1 大口径対応技術	添付資料-8
3.2 高速・厚膜成長技術	添付資料-9
4. デバイス/変換器技術・機器技術開発	添付資料-10
4.1 新規耐圧構造デバイス	添付資料-10
4.2 高耐圧大容量デバイス/変換器技術 (SiC 高耐圧大容量パワーモジュール検証を含む)	添付資料-11
5 大口径対応デバイスプロセス装置開発	添付資料-12
5.1 大口径対応デバイスプロセス装置開発(その1)	添付資料-12
5.2 大口径対応デバイスプロセス装置開発(その2)	添付資料-12
6. 共通基盤評価技術開発	添付資料-13
パワーデバイスロードマップ線表	添付資料-15
プロジェクト基本計画	添付資料-16

概要

最終更新日

平成24年8月1日

プログラム名	ナノテク・部材イノベーションプログラム、ITイノベーションプログラム						
プロジェクト名	低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト	プロジェクト番号	P10022				
担当推進部/ 担当者	電子・材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 芦田 純生（平成24年8月現在） 経済産業省 研究開発課 武良 佑介（平成22年7月～平成23年3月） 電子・材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 芦田 純生／佐藤 文 （平成23年3月～平成23年6月）						
0. 事業の概要	SiC パワーデバイスの事業本格化に向け、大口径(150mm:6 インチ)かつ低欠陥な SiC ウエハの製造技術と、鉄道や送配電等に用いる耐電圧 3kV 以上で電流量数百Aの SiC デバイス技術開発を行う。						
I. 事業の位置付け・必要性について	低炭素社会の実現に向けた自動車をはじめとする様々な分野の電化に伴い、パワー半導体による電力損失の低減は極めて重要である。従来の Si に代えて SiC パワー半導体デバイスを用いると大幅な損失低減が可能となる。そのため SiC デバイスの早期普及が望まれているが、現状では大口径高品質 SiC ウエハの供給体制が不十分で、デバイスの普及やさらなる高度化に向けてその解決が必要である。さらに SiC は、高耐圧化が期待される一方、現状では 1kV 程度である。鉄道や送配電等の強い期待に応じて適用分野を広げるには、SiC 材料の特長を生かせる 3kV 程度以上の高耐圧デバイス技術の確立が必要である。						
II. 研究開発マネジメントについて							
事業の目標	<ul style="list-style-type: none"> (1) 高品質・大口径 SiC 単結晶成長技術／革新的 SiC 結晶成長技術開発（委託事業） ・昇華法で低欠陥密度の 6 インチ単結晶成長技術の確立／革新的成長法の優位性検証。 (2) 大口径 SiC ウエハ加工技術開発（委託事業） ・一貫加工（切断・研削・研磨）プロセスを開発し単結晶からウエハまで 24 時間以内で完了する効率性の実現。 (3) SiC エピタキシャル膜成長技術開発（委託事業） ・大面積に均一な低欠陥密度の膜形成技術、高速での 100 μm の厚膜成長技術の確立。 (4) SiC 高耐圧スイッチングデバイス製造技術（委託事業） ・新規構造の SiC-MOSFET で耐圧 3kV 以上の実現／耐圧 3kV 以上の大容量 MOSFET の実現と MVA 級電力変換器の動作実証。 (5) 大口径 SiC ウエハ量産化技術開発（助成事業） ・昇華法で 6 インチ単結晶の量産化技術を開発し低欠陥と高速成長を実証。 (6) 大口径 SiC ウエハ加工要素プロセス検証（委託事業） ・各加工技術要素プロセスの能力限界と最適加工条件抽出。 (7) SiC 高耐圧大容量パワーモジュール検証（委託事業） ・耐圧 3.3kV の SBD の実現と Si-IGBT と組み合わせ 1000A 級パワーモジュールの動作実証。 (8) 大口径対応デバイスプロセス装置開発（助成事業） ・6 インチ SiC 基板に適合するデバイスプロセス装置を開発。 (9) 高耐熱部品の開発と統合モジュール化（委託事業）（平成24年度追加） ・要求に合致する高耐熱受動部品・基板等の開発とモジュール化による優位性検証。 						
事業の計画内容	主な実施事項	H22fy	H23fy	H24fy	H25fy	H26fy	総額
	(1) 結晶成長技術	→					
	(2) 加工技術	→					
	(3) エピ成長技術	→					
	(4) デバイス製造技術	→					
	(5) 結晶量産化技術	→					
	(6) 加工プロセス検証	→					
	(7) 大容量モジュール	→					
	(8) プロセス装置	→					
	(9) 高耐熱部品	→					

開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載)(単位:百万円)	会計・勘定	H22fy	H23fy	H24fy	H25fy	H26fy	総額	
	一般会計	2,000	3,957	1,930	(2,000)	(2,000)	11,887	
	特別会計	-	-	-	-	-	-	
	加速予算 (成果普及費を含む)	-	-	190	-	-	-	
	総予算額	2,000	3,957	2,120	(2,000)	(2,000)	12,077	
	契約種類:	(委託)	2,000	1,938	1,954	(1,834)	(1,834)	9,560
		(助成):助成率 2/3		2,019	-	-	-	2,019
		(共同研究):負担率 1/2			166	166	166	498
開発体制	経産省担当原課	産業技術環境局研究開発課、製造産業局非鉄金属課(高耐熱部品)						
	プロジェクトリーダー	独立行政法人産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクス研究センター長 奥村 元						
	委託先(*委託先が管理法人の場合は参加企業数および参加企業名も記載)	技術研究組合次世代パワーエレクトロニクス研究開発機構(FUPET) (参加 21 社、1 大学、1 独立行政法人(産総研)) 再委託先(一財)電力中央研究所 共同実施(国)名古屋大、東工大、大阪大、名工大、横浜国立大、(学)中部大、(独)物材機構 共同研究先 新日本製鐵株(平成 24 年 4 月~)						
情勢変化への対応	プロジェクト成果をより大きいものとするため、平成 23 年度に項目(5),(6),(7),(8)を追加実施。 新日鐵株が担当した FUPET 富津分室での昇華法による 6 インチ結晶成長の成功を受け、事業化を推進するため、平成 24 年度より、同社と NEDO との直接共同研究契約のもと、独立して推進することとした。							
中間評価結果への対応	中間評価を平成 24 年 8 月に実施し、結果を適切に反映する予定。							
評価に関する事項	事前評価	委託事業に関しては平成 21 年度に経済産業省において実施。助成事業に関しては電子・材料・ナノテクノロジー部において平成 22 年度に実施。						
	中間評価	平成 24 年度 中間評価実施予定						
	事後評価	平成 27 年度 事後評価実施予定						
Ⅲ. 研究開発成果について		中間目標	成果					
	事業全体							
	(1) 高品質・大口徑 SiC 結晶成長技術開発/革新的 SiC 結晶成長技術開発	(1)-1 [昇華法] 下記の 6 インチ結晶成長実現技術の確立。 (1)-1-1 転位密度 10 ³ 個/cm ² 台 (1)-1-2 0.5 mm/h 以上の高速 (1)-2 [革新的成長法] 2 インチ・1mm 厚単結晶	(1)-1 [昇華法] 6 インチで、 (1)-1-1 転位密度 3×10 ³ 個/cm ² (1)-1-2 成長速度 0.56mm/h (1)-2 [革新的方法] ガス法で 2 インチ径 15mm 厚、溶液法で 2 インチ径 3.4mm 厚・0.5mm/h 達成。				達成	
(2) 大口徑 SiC ウエハ加工技術開発	①3 インチで 150μm/分以上、同時 10 枚以上、切り代 300μm 以下の切断技術を実現 ②3~4 インチで各要素工程の最適化と接続最適化を行い、6 インチ一貫加工プロセス最適化の方針決定	①3 インチで下記を達成。 ・切断速度: 150μm/分以上 ・同時切断枚数: ~10 枚 ・切り代: 300μm 以下 ②接続工程間の品質と速度最適化アプローチの有用性を示した。6 インチ対応を進め、24 年度中に達成見込み。				達成見込		

	(3) SiC エピタキ シャル膜 成長技術	(3)-1 [大口径化] みなし 6 インチで均一度：厚さ±10%、ドーピング濃度±20% ・エピ成長起因の表面欠陥密度：2 個/cm ² 以下を実現 (3)-2 [高速厚膜化] 2 インチ径・膜厚 50 μm 以上で ①残留キャリア濃度 3×10 ¹⁴ /cm ³ 以下、②表面欠陥密度：5 個/cm ² 以下を達成	(3)-1 [大口径化] ①厚さ均一性：±0.85%、ドーピング濃度均一性：±7.6%、表面欠陥密度：1.2 個/cm ² 等を確認。 (3)-2 [高速厚膜化] 残留キャリア濃度 3×10 ¹⁴ cm ⁻³ 以下を実現、表面欠陥密度は 7.5 個/cm ² に到達。24 年度中に達成見込み。	達成見込
	(4) SiC 高耐 圧スイ ッチ ング デバ イス 製 造 技 術	(4)-1 [新規構造デバイス] 新規構造とプロセスにより耐圧 3kV 以上の SiC-MOSFET 実現 (4)-2 [大容量デバイス/変換器] 耐圧 3kV 以上の高耐圧 SiC-MOSFET 実現、SiC-MOSFET・SBD による 3kV 以上の電力変換器モジュール試作と要素技術を確認	[新規耐圧構造デバイス] プレーナ型 MOSFET で耐圧 2.640V 到達。終端構造を修正し達成見込み。 [高耐圧大容量デバイス/変換器] 高耐圧・低抵抗 MOSFET の耐圧 4kV を実証し良好なオン特性を確認。モジュール試作は順調に推移し、24 年度中に達成見込み。	達成見込
	(5) SiC ウエ ハ量 産 化 技 術 開 発 (平成 24 年 3 月迄)	大口径ウエハの量産化開発環境整備を行い、 (5)-1 転位密度 1×10 ⁴ 個/cm ² 以下の 6 インチインゴット実現の基盤技術確立 (5)-2 成長速度 0.25mm/h 以上で転位密度 5×10 ⁴ 個/cm ² 以下の 6 インチインゴット実現の基盤技術確立	(5)-1 低応力成長技術により課題を克服し口径 6 インチで転位密度 6.8×10 ³ 個/cm ² を確認。 (5)-2 6 インチインゴット成長において成長速度 0.25mm/h 以上、転位密度 5×10 ⁴ 個/cm ² 以下を確認。	達成
	(6) 大口径 SiC ウエハ加工 要素プロ セス検 証 (平成 24 年 2 月迄)	①ダイヤモンドマルチワイヤソーでの高速切断に向け、最大ワイヤ速度：約 4,000m/min、最大張力：70N の高速高剛性切断実現 ②切断、研削、荒研磨、仕上げ研磨の各工程の能力限界と最適加工条件抽出と総合的データを蓄積	①ダイヤモンドマルチワイヤソーを開発しワイヤ速度 4,000m/min、張力：70N を実現。3~4 インチ結晶の高速切断（切断速度 150 μm/分以上）性能を検証。 ②各要素工程におけるベンチマーク実験と加工性能最適化を実施。	達成
	(7) SiC 高 耐 圧 大 容 量 パ ワ ー モ ジ ュ ー ル 検 証 (平成 24 年 2 月迄)	耐圧 3.3kV 定格電流 75A の SiC-SBD を開発し、Si-IGBT と組み合わせ 1,000A 級大容量パワーモジュールを試作・実証し、All SiC モジュール実現の技術的指針獲得	電流 150A 以上で良好な電流電圧特性を持ち、リカバリーのない SiC-SBD を実現。Si-IGBT と組み合わせたパワーモジュールで 2000A のスイッチングを実証した。さらに 1 相のフルブリッジ回路を構成し連続通電試験を実施。	達成
	(8) 大口径対応 デバイス プロセス 装置開 発 (平成 24 年 2 月迄)	6 インチ SiC ウエハ用のイオン注入、活性化熱処理装置を開発。 <イオン注入装置> ・低温から 800°C で注入可能 ・面内温度均一性±15°C ・Al 注入イオン電流 200 μA 以上 <活性化熱処理装置> ・熱処理温度：1,800°C 以上 ・面内温度均一性±30°C ・同時処理可能枚数 25 枚以上	<イオン注入装置> ・常温から 800°C での自動のシステムを開発。 ・500°C で面内温度差±14°C ・Al ビーム電流 1500uA <活性化熱処理装置> ・装置最高温度 2,000°C ・面間温度差 <±30°C 達成 (±10°C を確認中) ・同時処理枚数 50 枚	達成
	投稿論文	「査読付き」18 件、「その他」0 件		

	特 許	「出願済」23 件、「登録」0 件、「実施」0 件(うち国際出願 3 件) 特記事項:なし
	その他の外部発表 (プレス発表等)	65 件 (講演、プレス発表)
IV. 実用化、事業化の見通しについて	各参画企業において事業化を検討 (ヒアリングにおいて確認)。詳細は非公開とする。 また、事業化への過程において「つくばイノベーションアリーナ (TIA-nano)」・「つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション (TPEC)」の活用も想定。	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	平成 23 年 3 月 作成 (次世代パワーエレクトロニクス技術開発 (グリーン I T) との合体版として作成)
	変更履歴	平成 23 年 7 月 改訂 (独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法の改正による) 平成 24 年 3 月 改訂 (研究開発項目 (9) 高耐熱部品統合モジュール化技術開発の追加)

プロジェクト用語集

用語	説明
CVD	原料物質を含むガスを熱やプラズマで分解して、薄膜を形成する方法。SiC 膜を形成するには SiH ₄ (モノシラン)、C ₃ H ₈ (プロパン)を原料とし、これを多量の水素に加えて反応炉に導入し熱分解によってエピタキシャル成長させる。
g ベクトル	電子線、中性子線、X線などが、結晶中で回折現象を起こしている時に、結晶中での回折波の波数ベクトルは結晶中の入射波の波数ベクトルと逆格子ベクトルとの足し合わせで示すことができる。ある g 反射の逆格子ベクトルを g ベクトルと呼んだり、ある h 反射の逆格子ベクトルを h ベクトルと呼んだりする。 g ベクトルは $g = ha^* + kb^* + lc^*$ で表すことが可能である。h, k, l は整数。a*, b*, c* は逆格子基本ベクトルであり、逆格子の基本ベクトルは、実格子の基本ベクトル a, b, c により以下の式により定義される。 $a^* = (b \times c) / V \quad b^* = (c \times a) / V \quad c^* = (a \times b) / V$ $V = [a, b, c]$ $V = [a, b, c]$ は単位胞の体積
Liquid Phase Electro- Epitaxy (LPEE)法	原料を溶媒に溶かし、これを種結晶上に結晶を析出させる際、種結晶と溶媒間に電圧を印加する単結晶の成長方法。
Top-Seeded Solution Growth(TSSG)法	種結晶をホルダーに取り付け、これをるつぼを加熱して融液としたフラックス中に液表面に種結晶を接触させ結晶を成長させる単結晶の成長方法。
異種ポリタイプ	パワーデバイスに用いられる4H-SiC 以外の SiC。化学組成は同じだが、結晶構造が異なる。
化学気相成長装置	薄膜を形成する方法のひとつで、石英などで出来た反応管内で加熱したウエハ上に、目的とする薄膜の成分を含む原料ガスを供給し、ウエハ表面あるいは気相での化学反応により薄膜を堆積する方法である。
貫通刃状転位(TED)	刃状転位の種類。転位線が成長方向に伸展するもの。
貫通らせん転位(TSD)	成長方向に貫通するらせん転位。
基底面転位(BPD)	刃状転位の種類。転位線が基底面上に存在するもの。
キャロット	エピ膜表面に現れる針状の欠陥。貫通らせん転位と積層欠陥が組み合わされた複雑な構造を有す。
結晶方位	結晶の方位。指数[u v w]で表現される。立方晶の場合は、ミラー指数 (h k l) で表現される結晶面に垂直な方位に[h k l]は一致する。六方晶系では 4 指数で結晶面(H K i L)を表すと面に垂直な方位は[H K i L]と表現することができる。
結晶面	ミラー指数 h k l を用いて定義する結晶中の幾何学的な平面。ミラー指数 h k l の実格子空間の幾何学的な結晶面(h k l)は、逆格子空間では逆格子ベクトル h k l と対応している。
サイトコンペティション	不純物が占有する原子サイトの原料供給量を増減させることでサイトの占有確立を変化させ、不純物の取り込みを制御する方法。

三角欠陥	エピ膜表面に三角状に現れる欠陥。その構造は転位や積層欠陥が組み合わされたもので、多種多様。頂点位置に貫通転位(基板に垂直な方向の転位)やパーティクルがある場合が多く、これらが発生のトリガーになる。
残留熱応力	成長時の温度分布等が起因となって発生し、SiC 単結晶内部に残存する応力。
シャローピット	SiC エピウエハ上に見られる、nmオーダーの凹み。ウエハから伝搬した螺旋転位や刃状転位に対応して現れる。
水素エッチング	1500℃以上の高温水素雰囲気 SiC ウエハを置くことで水素ガスとの化学反応により SiC が分解される。これを利用して SiC ウエハの表面をエピタキシャル成長前に薄く削ること。
ステップバンチング	SiC のエピ膜表面の結晶面方位は{0001}面が<1120>方向に数度傾いている。これを原子レベルで見ると、{0001}結晶面をテラスとする階段状の構造になっている。その段差(ステップの高さ)は理想的には 0.25nm だが、エピ成長の過程でこれが多重化し、数 nm～数十 nm もの高いステップと広いテラス構造を有するようになる。この多重化現象あるいは多重化構造をステップバンチングと称する。
スーパージャンクション(SJ)構造	通常、単一不純物濃度で設計されるドリフト層を、pn ピラー構造で構成することで同一耐圧設計で不純物濃度を高くすることが出来るようになり、従来の構造よりも高耐圧、低オン抵抗を実現する事が出来る。
積層欠陥	原子の積層構造が違ってしまった状態。例えば ABCBA という原子配列が ABABC という配列になる。
せん断応力	残留熱応力の一成分。基底面転位の発生原因になる。
耐圧	特性オン抵抗と共にパワーデバイスの特性を示す指標の一つで、スイッチオフ時に素子に印可できる最大電圧。通常、特性オン抵抗とトレードオフ関係にある。
帯状欠陥	研磨傷の部分においてエピタキシャル成長の結果[1-100]に長く伸びた三角形状のモフオロジーあるいは線状のモフオロジーが並んだもの
田口メソッド	技術開発・新製品開発を効率的に行う開発技法のこと。
転位間相互構造変換	転位欠陥が異なる別の転位欠陥に構造変換する現象。
特性オン抵抗	パワーデバイスの特性を示す指標の一つで、オン状態での素子内部の抵抗を単位面積当りに換算した値。一般的に $m\Omega \text{ cm}^2$ という単位が用いられる事が多い。
トレンチ型 MOSFET	チャネル層が半導体表面に対して垂直に形成されるタイプの MOSFET。素子構造上 JFET 抵抗が存在せず、且つセルピッチの微細化が容易であるため、オン抵抗低減に最も効果的な構造である。
バーガースペクトル	転位欠陥の構造を規定するパラメーター。転位中心の歪の大きさを規定する。
パルスレーザー堆積(PLD)法	雰囲気調整された成膜室内に置かれたターゲット上に、レーザーパルス光を集光し、レーザー光のエネルギーによって励起されて飛び出すターゲット物質をターゲットに対向する位置に置かれた基板の上に堆積させて薄膜を形成する方法。
プレーナ型 MOSFET	チャネル層が半導体表面に対して平行に形成される、最もオーソドックスなタイプの MOSFET。JFET 抵抗などの寄生抵抗成分がオ

	ン抵抗低減を阻害する。
放射光反射 X 線トポグラフ	X 線トポグラフとは X 線回折の原理を用い、単結晶中の転位など結晶格子の歪み箇所を可視化して観察、撮影する方法であり、非破壊で結晶欠陥を観察できる手段として古くから知られていた。放射光の高強度白色 X 線を用い、これを単色化して試料に低角度で入射させ、反射してきた回折 X 線で結像させる方式が(低角入射)放射光反射 X 線トポグラフで、SiC ウエハ、エピ膜の欠陥評価に広く用いられている。個々の転位を分離、識別できる分解能を有し、短時間で撮影が可能である。また X 線の侵入深さを実験パラメータにできるので、観察される表面からの深さの範囲を制御することができる。
ホットウォール	CVD を行う装置の形式のひとつで、膜を形成する基板(ウエハ)ばかりでなく、基板上の気相(原料ガス)が加熱されるようにしたもの。原料ガスが加熱されることで準平衡状態での成長が可能とされている。SiC のエピ成長にはこの形式を採用する。
マイクロパイプ	らせん転位の転位中心に直径数～十数 μm の孔が存在する転位欠陥。
マクロ結晶割れ	SiC 単結晶が大きく割れる現象。クラックと同義。

I . 事業の位置付け・必要性について

1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性

1.1 NEDOが関与することの意義

近年、エネルギー資源枯渇や地球温暖化問題がますます重要となっている。加えて、IT産業など、新たな分野の急激なエネルギー消費増大への対策も、緊急に取り組むべき課題である。それらの解決に向けて、太陽光・風力などの再生可能エネルギーの利用の拡大や、エネルギー生成から消費に至る過程に数多く存在する電力変換機器・制御機器の効率の向上が、大きく貢献すると期待される。

この期待に応えるには、インバータやスイッチング電源をはじめとするパワーエレクトロニクス機器の積極的な利用が有効である。現在普及しつつある機器に使われているパワー半導体デバイスは、ほとんどが Si (シリコン) を材料とするものである。SiC (炭化珪素) パワーデバイスは、デバイス内の電気抵抗 (オン抵抗) による電力損失を Si デバイスの 1/100 以下への低減、高い耐電圧と低いオン抵抗との両立が可能である。スイッチングに伴う損失も少ないので、Si よりも高い周波数でスイッチング動作をさせるのに適している。さらに、Si は半導体として動作しない 250°C 以上の高温でも動作可能である。

SiC パワー半導体デバイスは、このようなすぐれた特性を持つため、デバイスを SiC 化することで、電力変換器の損失を格段に低減でき、省エネに貢献する。また、損失とともに発熱も減少するので、冷却機構も簡素化できる。高い周波数で動作させれば、組み合わせるインダクタやキャパシタも小型で済む。また、デバイスの高温使用が可能なので、周囲との温度差を利用して、さらに冷却効率を上げる工夫も可能である。これらの相乗効果によって、機器を桁違いに小型化できるので、新しい製品分野の創出も期待され、さまざまな産業の成長力のもとになると言える。このように、SiC パワー半導体デバイスおよび電力変換機器における技術力は、いろいろな産業の競争力を左右する重要性を有する。

このような強い期待と重要性を有する一方で、SiC パワーデバイスが本格的に普及するまでに越えるべきハードルがいくつかある。一つは経済的なものである。現時点では、SiC デバイスは、限定的な用途に対して、4 インチ以下の小口径ウエハを用いて製造した低電圧・小電流のショットキーバリアダイオード (SBD) が普及しつつあるのみである。SiC パワーエレクトロニクス半導体の本命とみられる MOSFET に関しては、耐圧 1200V 程度のものが本プロジェクト開始後にテスト的に市販が開始されたばかりである。その製造コストは Si デバイスに比較して桁違いに高価であり、本格的な市場は確立していない。このため、個別企業にとっては、投資回収と次世代開発への投資の循環のモデルが、まだ明確になっていない。現状のパワーデバイスの既存市場は、Si デバイスを前提として構築されている。性能対価格比で見たときに、SiC デバイスが Si デバイスと比較可能な価格帯で提供できるか、あるいは SiC ならでは

の魅力ある製品を提供できることが、本格普及の必要条件となっている。

もうひとつのハードルは技術的なものである。前記のコスト的な問題とも関係して、現状では、高品質な大口径ウエハを潤沢に供給できる体制が確立していない。Si ウエハは、長い開発の歴史を持ち、メモリ・システム半導体デバイスにも使われるため、市場が確立しており、かつ大規模である。これに対して、現在の SiC ウエハの生産規模はきわめて限定的である。また、デバイスに含まれる SiC の結晶欠陥が耐圧不足・信頼性低下の直接的な原因となるため、欠陥密度の低いウエハの低価格での供給が切望されているが、高品質なウエハは、特に高価である。

さらに、現在では、ウエハの供給は海外企業による寡占状況にある。プロジェクト開始時に 4 インチ径までのウエハは入手可能であったが、そのシェアは米国 CREE 社が 50%以上を有していた。国内ウエハメーカーとしては新日鐵(株)の技術を展開した新日鉄マテリアルズ(株)が市販を開始していたが、世界シェアとしてはわずかであった。このような状況を踏まえ、SiC パワー半導体デバイスの開発を推進し、本格普及への道筋をつけるには、デバイス低コスト化が望めるレベルの大口径と高品質とを備えた SiC ウエハの量産技術構築が最重要である。

デバイス側が越えるべき大きい技術的ハードルとしては、SBD・MOSFET 両方の高耐圧化があげられる。現在、耐圧 1200V 級の SBD は既に製品化されており、また MOSFET も製品化フェーズにあるが、SiC 材料の物性値からは、より高耐圧で、かつ低いオン抵抗のデバイスを実現することが望まれている。1200V 級デバイスの適用分野も非常に広いとはいえ、民生用をはじめとする最終利用機器のレベルに限定される。低炭素化、省エネ化に対する実質的貢献をさらに進めるためには、3.3kV・6.6kV またはそれ以上の電圧を扱う送配電システムや、直流 1.5kV あるいは交流 20~25kV を扱う電鉄への適用に向けて、SiC デバイスを高耐圧化するとともに、大電流に対応することが望まれる。高耐圧化には、大電流が流れるドリフト層の厚さを厚くすることで対処可能ではあるが、単に厚くするだけでは厚みに比例してオン抵抗が増大する。したがって、オン抵抗を低く保ったまま高耐圧化を実現するには、エピ成長技術やデバイス構造・デバイスプロセスに工夫が必要である。また、大電流化に向けては、ウエハやエピ膜の欠陥を低減して欠陥に起因する破壊モードを除去したり、デバイス構造を工夫していく必要がある。このように、新規なデバイス構造・デバイスプロセスを開発し、高耐圧化を中心とした特性向上を進め、SiC として新規な分野においても、電力損失低減の可能性を示していくことが重要である。

ところで、技術開発の効率向上には、川上側と川下側の相互連携が有効である。本プロジェクトの内容に関係する相互連携として、次のようなものが想定される。SiC の原料からデバイス製造に至る過程には、結晶成長・加工・エピタキシャル膜成長と複数の工程が必要である。インゴット中の結晶欠陥や、加工工程で導入された欠陥が、エピ膜の品質に影響を与えるが、エピ膜の品質確保がデバイスの耐圧や信頼性に対して非常に重要である。このことから、これらの工程間の相関関係を明らかにし、根本

的に欠陥を解消することが重要である。加工工程を例にとると、切断・研削・研磨・平坦化と複数の工程が存在し、従来は、個々の工程をそれぞれの専門企業が開発していた。企業間の相互連携によって、より効率的な開発が可能となる。このように、個々の企業の範囲を越えた内容をカバーするには、単独企業が主導するよりも、NEDOのような中立機関が主導することで、連携を推進しやすいものと考えられる。

これまでの内容をまとめ、本プロジェクトを NEDO が実施することが適切である理由は、次の通りである。

政策的には、我が国の国家的課題に対する取り組みであって、SiC パワーエレクトロニクスは、資源枯渇、地球温暖化問題解決への大きい貢献が期待されている。

次に、電子デバイス・電子機器産業は我が国の基幹産業であり、SiC パワーエレクトロニクス分野の技術開発の推進は、当該産業分野の国際競争力向上に大きい効果を持つものと期待される。半導体デバイス関連の国内企業群が国際的に大きい存在感を有するほか、本プロジェクトの成果は、自動車産業をはじめとする電機産業以外の産業競争力強化にも大きい貢献が期待される。

一方、SiC パワーエレクトロニクスの本格事業化には上述のチャレンジングな課題の解決が必要である。大きいリターンが期待される一方、新規にサプライチェーンを構築するにあたってのリスクもある。事業化に向けたトリガーとしての公的資金の投入は有効と考えられる。

さらに、国外では、CREE 社が米国の DARPA 等の支援を受けて技術力を高めているなど、国際的な競争からも危機感が高まっている。

以上のような理由から、本技術開発は、NEDO が関与して各企業等の連携のもとに進めることの意義は大きいものとする。

なお、経済産業省によって平成 21 年に策定された同省「ナノテク・部材イノベーションプログラム」の中では、「あらゆる分野に対して高度化あるいは不連続な革新（ジャンプアップ）をもたらすナノテクノロジー及び革新的部材技術を確立するとともに、その実用化や市場化を促進することで、我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服等を可能とする」ことを目的に取り組むと規定されている。また、「IT イノベーションプログラム」の中では、「情報化の進展に伴うエネルギー消費量の増大等の課題にも考慮しつつ、その基盤となる情報通信機器・デバイス等の情報通信技術を開発し、実社会への利用を促進する」ことを目的に取り組むと規定されている。このように、本技術開発は同省の政策にも合致した内容となっている。

1.2 実施の効果(費用対効果)

(1) 市場創出効果

既に、パワーエレクトロニクス機器は電力利用のさまざまな分野で使われている。その例は、図 I-1.2-1 に示すように、情報家電の電源回路や照明・冷蔵庫・家庭用エ

アコンのインバータといった家電分野から、データセンターや一般のオフィスのサーバー電源・空調機器などの事業用機器、各種製造業・農業・鉱業等で使われる産業動力機器用のインバータ、電車・エレベータ等の輸送機器、太陽光発電や風力発電など再生可能エネルギーのパワーコンディショナーなどである。さらに、HV・PHV・EV という巨大な需要が見込まれる分野も加え、カバーする範囲が拡大しつつある。さらに、高耐压デバイスの実現により、送配電系統への適用も可能となると言われている。SiC パワーデバイス技術の確立によって、これらすべての分野について効率向上効果が期待される。コスト課題・信頼性・耐压などの課題が解決されれば、これまでの Si デバイスのほとんどを置き換えられる可能性がある。

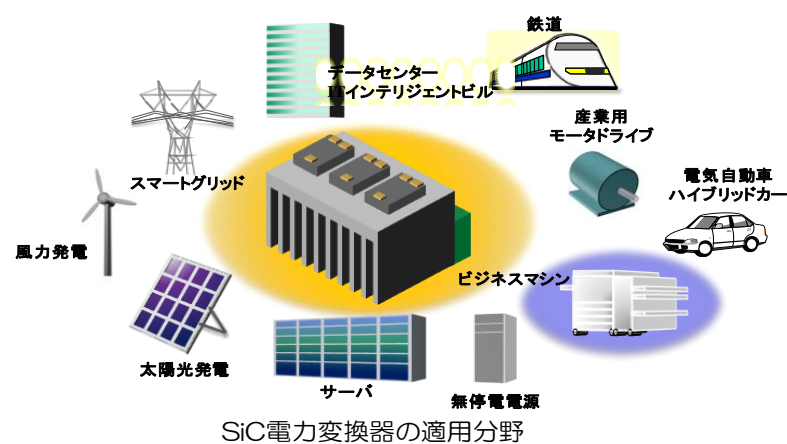


図 I -1.2-1 SiC パワーエレクトロニクスの適用が期待される分野の例

パワー半導体の世界市場規模は 2010 年に 142 億米ドル(80 円/USD 換算で 1 兆円)、2020 年には 400 億米ドルに成長するとの予測がある[1]。

SiC パワー半導体は、2001 年に市販が開始された SBD が、ノート PC 用の AC アダプタの小型化や、サーバー用電源の高効率化などに貢献していると言われている。SiC-FET については、小容量のデバイスが市販され始めているが、Si デバイスに比べて高価であることから、現時点では実質的な市場は形成されていないとみられる。パワー半導体市場全体に占める SiC デバイスの割合は、2010 年には約 0.5%と小さいが、今後、年率 30~40 %と Si 半導体を大幅にしのぐ高い成長率が見込まれる。将来、全パワーエレクトロニクス半導体市場の 5 割程度が SiC デバイスによって占められるとすれば、SiC パワー半導体デバイスそのものによって、1 兆円規模の市場が形成されるものと期待される。

このような予測通りに SiC デバイス市場が成長するためには、デバイスの低価格化が必須である。SiC ウエハは、これまで 2 インチ、3 インチ、4 インチと、順次大口径化が進んできた。このような小口径ウエハは、Si 半導体用には既に使用されておらず、

適合するプロセス装置も入手できない。口径を 6 インチ化することが、一枚あたりのチップ数の観点からも、プロセス装置の入手の面からも、本格普及の最低条件と言われている。デバイス生産ラインの 6 インチ対応化が済めば、コストが一気に低減でき、SiC デバイスの普及に弾みがつくものと考えられる。それによって 6 インチウエハの出荷量も増えるという好循環が期待される。その結果、2020 年にはウエハ市場全体の 90%以上を 6 インチウエハが占めると予測されている[3]。2020 年における世界の SiC ウエハ市場規模は 400 億円程度と予測されている。

SiC パワー半導体デバイスを搭載する機器の市場は、半導体そのものに対して桁違いに大きいものと期待される。平成 22 年度の我が国の電子部品・電気機器・情報機器産業の製品出荷額は 44 兆円であり、関係する企業の従業員数は合計 115 万人に上る[2]。これらの分野すべてに SiC パワーエレクトロニクスが貢献する可能性がある。SiC パワーエレクトロニクス機器は、既存の製品分野の Si 半導体を置き換えるのに加えて、次世代自動車、太陽光発電用(PV)パワーコンディショナ等、新用途への展開が期待されており、多くの新製品分野に対する貢献が望まれている。

以上のように、本事業によって、大口径・高品質 SiC ウエハの安定供給が可能となり、SiC デバイスが歩留まり良く生産できる体制が整い、SiC デバイス応用機器の市場が順調に成長することが期待できる。

本事業の事業規模は、表 I-1.2-1 の通り、平成 22 年度の事業開始から平成 24 年度の 3 年間で 80 億 8 千万円、全実施期間では総額約 120 億円となっている。このような大規模なプロジェクトであるが、その理由は、6 インチ化対応を効率的かつ迅速に進めるため、広範囲の研究開発を同時進行する必要のためである。この規模は、前記の大きな市場インパクト、わが国の産業への貢献度の大きさ、低炭素社会の実現などの社会目的の重要性に照らして妥当と考えている。

表 I-1.2-1 本プロジェクトの事業規模年度推移。平成 22 年度および 23 年度は実績額、24 年度は予算額。単位：百万円。

会計・勘定	H22fy	H23fy	H24fy	H25fy	H26fy	総額
一般会計	2,000	3,957	1,930	(2,000)	(2,000)	11,887
加速予算	-	-	190	-	-	
総予算額	2,000	3,957	2,120	(2,000)	(2,000)	12,077
うち委託	2,000	1,938	1,954	(1,954)	(1,954)	9,800
うち助成 (助成率 2/3)		2,019	-	-	-	2,019
うち共同研究 (負担率 1/2)			166	166	166	498

(2)省エネルギー効果

Si インバータを SiC インバータに置き換えることによって、70%の損失低減が可能である[4]。この低減率を仮定し、EV・PHV・HV、IT 機器関連、産業用動力機器のインバータ化促進の3種類を試算すると、すべてが Si デバイスであった場合に比べて、図 I-1.2-2 に示す省エネ効果が予測されている[5]。2030 年にパワー半導体のうち 80~100%が SiC デバイスが占めれば、我が国だけで原油換算年間 5000 万 kL 以上の高い省エネ効果を示すことが分かる。この省エネ効果を CO₂ 排出量に換算すると 10 百万 t/年となり、我が国全体の CO₂ 排出量の 1%程度に相当する。

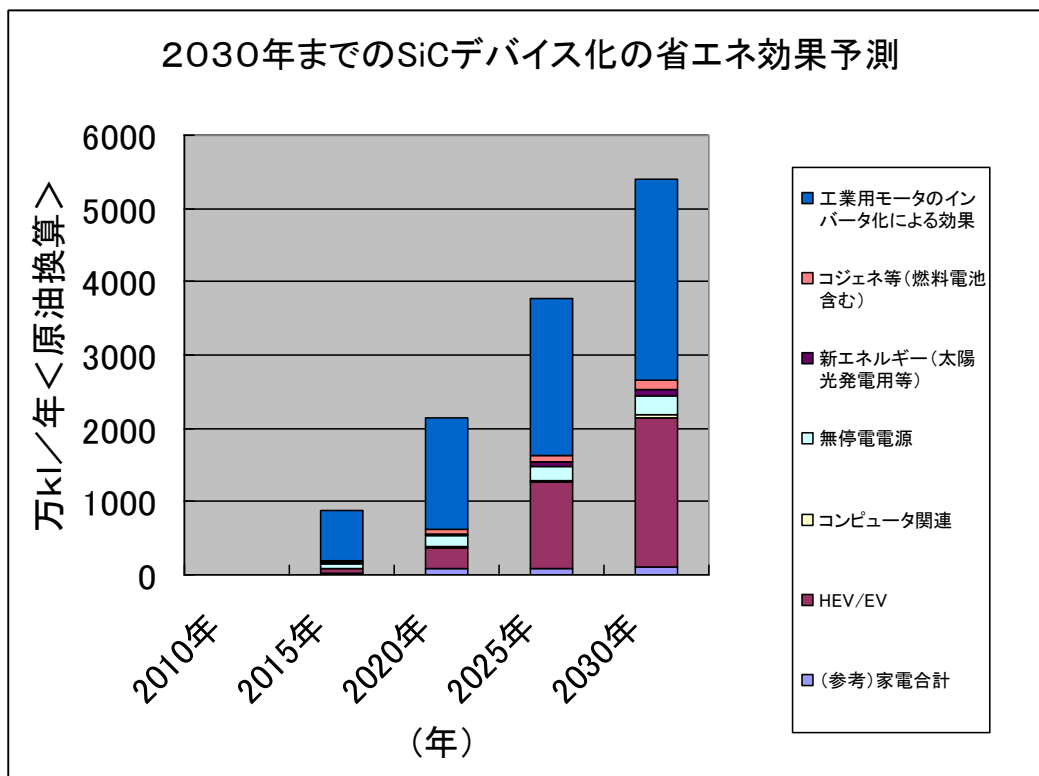


図 I-1.2-2 我が国のインバータ SiC 化による省エネ効果予測[5]

2. 事業の背景・目的・位置づけ

2.1 事業の背景

(1) 産業的背景

SiC ウエハメーカー

現時点では、SiC デバイスの市場が限定的であるため、SiC ウエハの世界市場規模は約 50 億円程度である。このうち米国 CREE 社が 50%以上のシェアを占め、II-VI 社(米国)・SiCrystal(独)と続く。我が国では、唯一新日鐵が系列会社の新日鉄マテリアルズ(株)を通して市販を開始しているが、シェアは小さく、約 2%に過ぎない(2009 年)。但し、前記の SiCrystal 社は 2009 年からローム(株)の子会社となっており、ローム(株)へウエハを供給していくものとみられる。このほか国内メーカーとしては、

昭和電工が SiC エピタキシャル膜成長事業を行っている。

本プロジェクト開始時の市販ウエハ最大径は 4 インチであり、新日鉄マテリアルズも 4 インチウエハの市販を開始していた。CREE 社含め、調達ベースで入手可能なウエハの欠陥密度は、10000 個/cm² またはそれを若干下回る程度とみられ、ウエハの 6 インチ化・低価格化とともに、欠陥密度の低減は課題である。

本プロジェクトが 2010 年 8 月に 6 インチ化に向けて始動した後の、ウエハ関係の企業の動向を、報道等に基づいて簡単に補足する。2010 年 9 月には、CREE 社から 6 インチ結晶成長成功の発表があった。続いて 2011 年には、ダウ・コーニングも 6 インチ SiC ウエハ量産化に向けたアナウンスを行った。一方、本プロジェクト参画企業である新日鐵は、本プロジェクトの成果として 2011 年 9 月に 6 インチウエハを展示した。さらに同社は、2011 年に米国 CREE 社と特許相互ライセンス契約を締結し、今後の事業展開に布石を打っている。

デバイスメーカー

現在使用されているパワーデバイスのほとんどは Si デバイスであるが、その世界市場における日本メーカーのシェアは 2009 年に 30%と、存在感を有している。しかし、パワーデバイス全体の世界市場シェア上位 5 社は国外企業（STMicroelectronics(伊・仏)、Texas Instruments (米)、InfineonTechnologies(独)、Fairchild Semiconductor (米)、Vishay (米)) である。国内企業では、6 位に東芝、8 位に三菱電機、12 位にルネサステクノロジ、14 位に富士電機、16 位にロームの 5 社が位置している。これら国内上位 5 社の占めるシェアは 15%である。パワー半導体デバイス市場は、CPU やメモリーのような国際的寡占状態にはなく、グローバルにみても各企業が数%ずつのシェアを分け合っている。今後の企業戦略によっては、勢力図が大きく変化する可能性もある。

我が国パワーデバイス企業の世界シェアは長期的には漸減傾向にあり、メモリや液晶パネルのようなシェア低下を避けるために舵を切る岐路にある。各社とも、その切り札として SiC デバイスを見ている。

プロジェクト開始時点の SiC デバイスの事業化状況は次のとおりである。Siemens 系の InfineonTechnologies 社が 2001 年に SiC-SBD を製品化した後、事業規模は Si デバイスに比べれば大きくはないが、着実に事業を進めている。このほか、STMicroelectronics 社、CREE 社が SBD 中心に事業を行っている。これらの耐圧は 600~1200V 級であり民生用（AC アダプター・LCD バックライト電源・サーバー電源等）が主用途である。

プロジェクト発足直後から、JFET・MOSFET が市場に投入されはじめている。JFET については、米国 Semisouth 社が先行して販売してきたが、JFET はドライブ電流が大きいので用途は限定的とみられる。ローム側は 1200V・20A 級の MOSFET 量産開始を 2010 年 12 月にアナウンスし、CREE 社は耐圧 1200V 級の MOSFET を

2011年1月に発表した。三菱電機も2012年に1200V級のMOSFETを適用したパワーモジュールを発表している。富士電機も2012年にSiC-SBDを使用した産業用インバータを報道発表した。このように、1200V級のデバイスに関しては、我が国においてもいくつかの企業が事業化に取り組みつつある状況であり、デバイス製造の歩留まり向上・信頼性向上・コスト低減に向けて、ウエハ・エピ膜の品質向上と大口径化が望まれている。

(2) 技術的基盤

SiC デバイスに関して、欧州・米国・日本のそれぞれで、長期間にわたり研究開発が進められてきた。日本でも、SiCの基礎研究が先駆的に行われてきた。

国際的なコミュニティとして、交互に隔年で開催される”International Conference on Silicon Carbide and Related Materials(ICSCRM)”と”European Conference on Silicon Carbide and Related Materials(ECSCRM)”があるが、報告件数のうち1/3程度が我が国の機関によるもので、存在感を示している。

我が国の特筆すべき研究開発成果としては、京大・松波らによって提案され、必要な結晶形が高品質に成長できる「ステップ制御エピタキシー法」(1987年)、本プロジェクトの参加企業である新日鐵(株)により開発された欠陥低減技術「a面成長法」(1997年)、同じく本プロジェクトの参加企業である(株)デンソーの超低欠陥化結晶成長技術「RAF法(Repeated a-Face Growth)」(2002年)などがある。これらの開発成果は、SiCデバイスの実用化に不可欠な技術とみられ、我が国SiC技術の優位性を示す例となっている。

我が国では、本プロジェクト以前よりNEDOを中心に数次の国家プロジェクトを行ってきており、前記の成果にも、国家プロジェクトが大きく貢献している。直近では、NEDOプロジェクト「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発」(2006年～2008年)において、SiCウエハ品質向上から電源機器設計技術に至る広い範囲の技術高度化を行い、Si-SBDとSi-MOSFETを使用したインバータを試作し、Si-IGBTの場合に比べて電力損失70%も低減できることを実証した。この成果はグリーンITアワードを受賞し、広く認知されることとなった。

国外でも、SiCデバイス関連の研究開発には多額の公的資金が投入されている。例えば、米国では米国科学財団(NSF)・DARPA・エネルギー省(DOE)が公的資金を投入している。NSFの資金による研究開発プログラムの例としてノースカロライナ州立大学が中心となるFREEDM(the Future Renewable Electric Energy Delivery and Management Systems Center)がある。FREEDMは年間4百万USD規模の活動で、SiCやGaNなどの最先端デバイスを使用したシステム開発などを行っている。DARPAによるプロジェクトには、CREE社・General Electricなどが参加しており、空母・潜水艦など小型化が要求される用途への適用を念頭に開発を進めている。現時点では、例えばDOEから、送配電系統への適用(高電圧)を目的としてCREE社が

5.2 百万 USD/3 年の、GeneSic Corp.は 2.5 百万 USD/2 年の補助金を得ている。このほか米国では Naval Research Lab.など軍関係の研究機関などが SiC の研究を活発に行っている。

2.2 事業の目的

我が国は、いくつかのキー技術を先行的に開発してきたが、DARPA や DOE の集中投資によって成長した米国に対して、現時点では必ずしも優位に無い。欧州も基盤的技術開発で実績を有し、Infineon の SBD 中心に着実に事業を展開しつつある。この中で我が国は、民生分野を中心とする大規模市場の成長に遅れないよう、積極的な展開が必要である。

大規模市場の成長の契機は EV・PHV・HV への適用であると見ているが、そのためには、デバイスの高い信頼性と低価格とを両立する必要がある。このためには、高品質かつ大口径なウエハを安定して供給できる体制を実現することが必須要件であり、それが EV などへの本格展開を目指した SiC デバイス普及のトリガーになると考えている。

本プロジェクトのカバーする範囲を含め、今後の SiC パワーエレクトロニクスの展開を模式的に図 I-2.2-1 に示す。地球温暖化抑制、省エネ等の社会的課題解決に向けた期待と、これまでに蓄積した技術発展の成果が背景となって、今、まさに SiC パワーエレクトロニクス本格展開の入口にさしかかっている。世界規模の電子デバイス関連企業群が駆動母体として存在することが我が国の特長であることは言うまでもない。高品質・大口径ウエハの安定供給体制が確立すれば、デバイスの信頼性・歩留まりが向上し、Si デバイスに対する価格競争力が得られる。耐圧 1200V 級デバイスに関しては確立しつつある MOSFET 技術を、高品質 6 インチウエハに適用して展開することで、民生機器や多くの産業用機器を中心とするボリュームゾーンの市場成長が可能となる。1200V 級の次には、3kV 級の SBD・MOSFET を順次実現して、電車や送配電等の新たな市場展開に備える事が出来る。

このような展望の中で、本プロジェクトのひとつの目的は、技術開発によって高品質・大口径ウエハの供給体制確立に直接的に貢献することにある。ここでのウエハ技術は、本格市場展開に必要なレベルの高い品質と低コスト化が見込めるものでなくてはならない。さらに、本プロジェクトのもうひとつの目的は、3kV 級の高耐圧デバイス技術を確立することによって、より広い市場展開へ備えることである。遠からず必要となる、さらなる低コスト化と特性向上への要求に備えるため、二の矢・三の矢技術を準備することも目的に据えている。また、6 インチウエハを対象とするデバイス製造ラインに不可欠な、デバイスプロセス装置を実現することも本プロジェクトの目的の一部である。

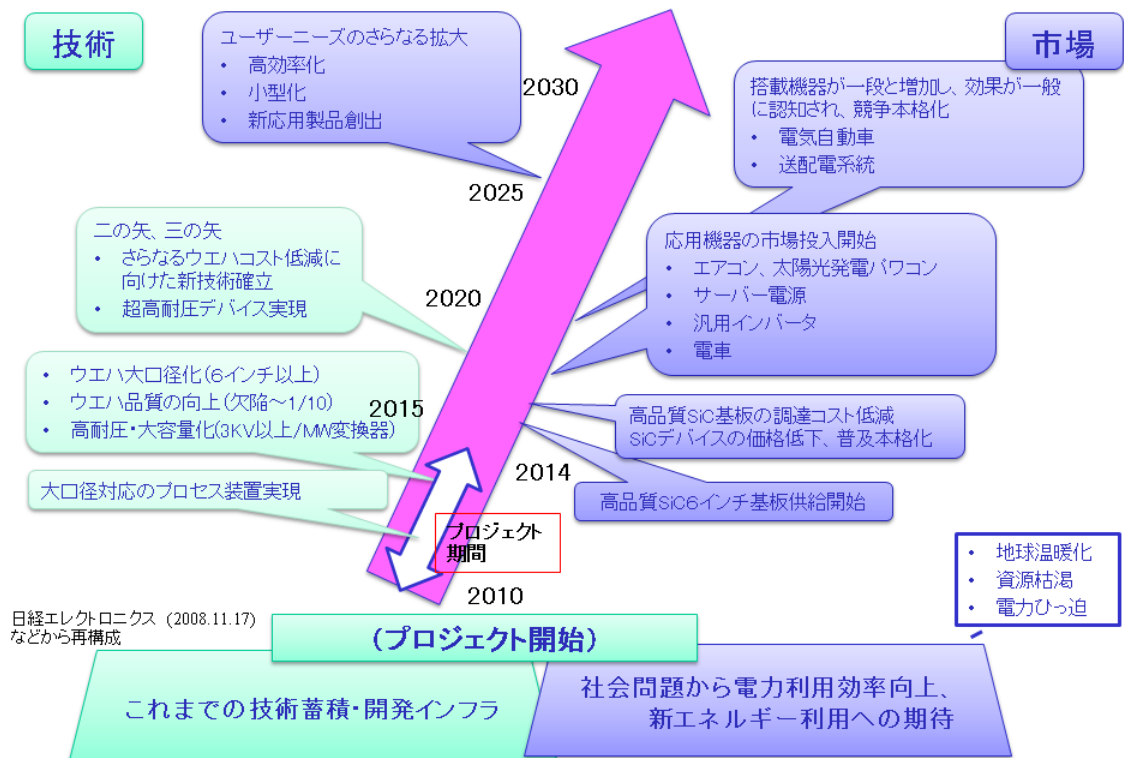


図 I -2.2-1 SiC パワーエレクトロニクスの本格普及に向けた展開の模式図

2.3 事業の位置付け

図 I -2.3-1 に、本事業の関連プロジェクトの中での位置付けを示す。同図において、赤の網かけを施した部分が本プロジェクトである。本プロジェクト発足時に、耐圧 1200V 級の MOSFET は事業化が見込めるレベルに到達していた。平成 21 年に開始した NEDO プロジェクト「次世代パワーエレクトロニクス技術開発（グリーン IT プロジェクト）」は、このクラスのデバイスを用いて、高効率電力変換機器の設計技術開発を中心とした開発を担っている。一方、耐圧 10kV 級の超高耐圧デバイスに関しては、内閣府による「最先端研究開発支援プログラム」(FIRST)が対象とする分野であり、平成 21 年度から京都大学木本教授を中心とする研究開発体制が組まれている。同プログラムの成果の事業化時期は 2020 年以降と、中長期的な展望のもと進められている。

本プロジェクトは、前記の 2 プロジェクトの中間に位置する。その成果の市場化時期は 2014~2020 年程度を想定している。但し 6 インチウエハの開発成果は、1200V 級デバイスへの適用が可能であるため、早期の事業化も想定している。また、3kV 級のデバイスとそれを用いた変換器で高効率を実証できれば、送配電系統など SiC では未踏の事業領域へ展開し、さらに市場が広がる可能性が出てくる。市場拡大によって、企業の独自開発も活発化するものと考えられる。それによって、高信頼性と低価格の両立が要求される EV・PHV 等といった、最も厳しい顧客ゾーンに対応できる技術も

確立できると考えられる。

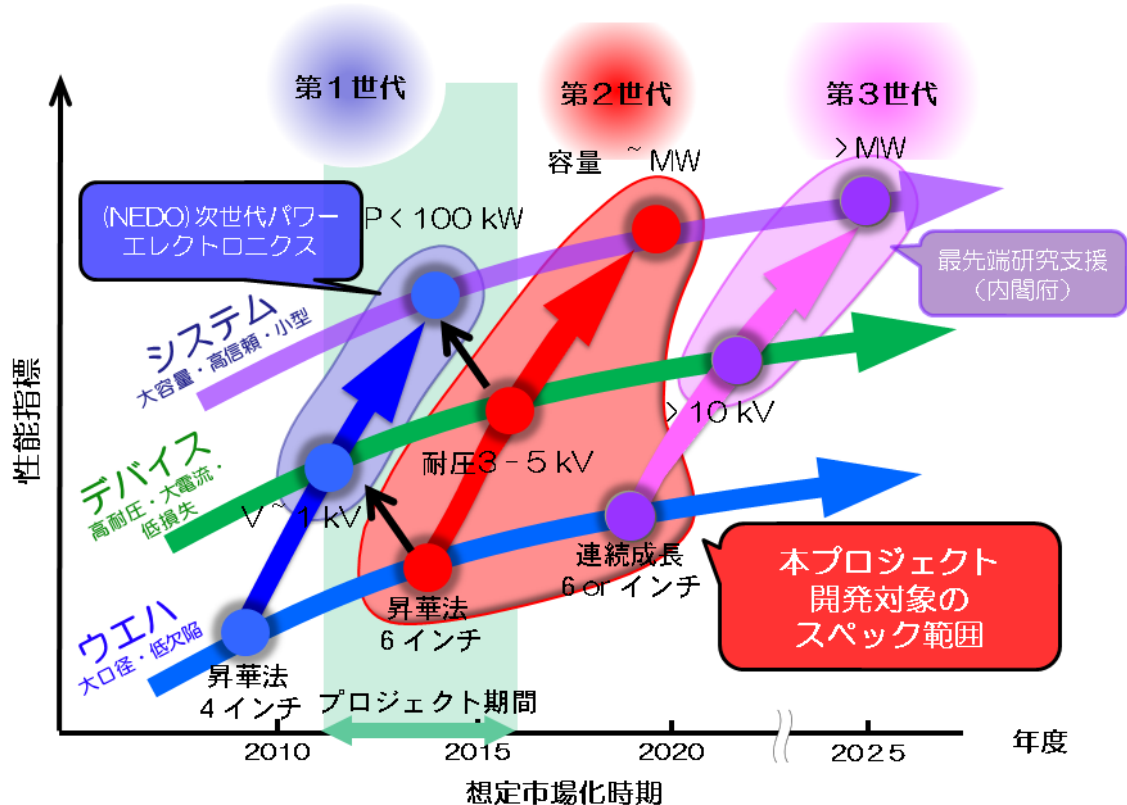


図 I-2.3-1 本事業の関連プロジェクトの中での位置付け

(参考資料)

[1] 矢野経済研究所

<http://www.yano.co.jp/press/press.php/000903> など

[2] 経済産業省 平成 22 年工業統計表、平成 22 年確報 (概要版)

<http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyo/result-2/h22/gaiyo/index.html>

[3] Yole Development 予測

<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20111220/202814/>

[4] NEDO プロジェクト「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発」平成 21 年結果

[5] 次世代省エネデバイス技術調査報告書 (平成 20 年 3 月 (財) 新機能素子研究開発協会 等

[6] 平成 22 年度特許出願技術動向調査報告書グリーンパワー IC (株)アイサプライ・ジャパンによる市場データ)、特許庁、平成 23 年 2 月

Ⅱ. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

1.1 事業の全体目標

本研究開発全体の目標は、高品質・大口径 6 インチ SiC ウェハ製造技術の確立と、3kV 以上の高耐圧 SiC スイッチングデバイス製造技術、高耐圧デバイスの応用に即した電力変換器の設計技術の確立である。

上記の目標達成に向け、平成 24 年度末までに基盤技術を確立し、最終目標達成の見通しを得る。次に、平成 26 年度までに高品質・大口径結晶成長、ウェハ加工、エピタキシャル膜形成までを一貫した製造技術の確立、高耐圧スイッチングデバイス製造技術を確立し、これを用いた低損失電力変換器の試作・実証等を行い、全体の最終目標を達成する。

このために、基本計画において、研究開発項目(1)～(4)を設定して、平成 22 年度から委託事業を開始した。平成 23 年度には、重点化が必要となる研究開発項目に関して、実質的に単年度の事業として研究開発項目(5)～(8)を実施した。なお、(5)～(8)は平成 22 年度に成立した補正予算に基づくものである。

(1)～(4)および(5)～(8)の対応関係は以下の通りである。

研究開発項目(5)は研究開発項目(1)に対する加速的位置づけであり、(1)において大口径結晶成長技術の確立を行う中、(5)においては昇華法による大口径ウェハの早期事業化推進を目的に、量産化技術開発として実施する。

研究開発項目(6)は研究開発項目(2)に対する加速的位置づけであり、(2)において切断から超平坦化までの連成的な加工技術開発を進める中、(6)においては特に重要となる要素プロセスの限界性能を追求し、(2)に反映する。

研究開発項目(7)は研究開発項目(4)に対する加速的位置づけであり、(4)において高耐圧デバイス製造技術と SiC-SBD と SiC-MOSFET からなるオール SiC 電力変換器モジュール実現に向けた技術開発を行う中、(7)においては、高耐圧 SiC-SBD と、Si-IGBT とのハイブリッド変換器の実証を行い、(4)の推進に必要な技術指針を得る。

研究開発項目(8)は、独立した項目である。口径 6 インチの SiC ウェハを対象としたイオン注入装置・活性加熱処理装置は、高温でのプロセスを必要とするなど、必要仕様が Si デバイス用装置と大きく異なる。そのため、SiC 用のプロセス装置の実現を本プロジェクトの中での開発目標に含めることとし、平成 23 年度の助成事業として実施する。

また、SiC 半導体デバイスの開発においては、ウェハやエピタキシャル膜に内在する欠陥、その他の材料特性を、正確に分析・把握し、その結果と絶縁破壊をはじめとするデバイス特性とを関連づけることが非常に重要である。このような中から、個々

の研究開発を横断・補完する機能を持つ「共通基盤評価技術開発」の実施が、本プロジェクト開始にあたっての採択条件となった。また、SiC 半導体デバイスの本格事業化に向けては、ボリュームゾーンである自動車分野への適合性の有無が重要な判断基準である。そのため、SiC 搭載自動車の実現に向けた着実な取り組みと、そのために必要な「応用技術調査検討」の実施もまた、採択条件となった。これらの二つの取り組みは、基本計画中の研究開発項目としては記載していないが、研究委託先である FUPET の実施計画には明記して実施している。このため、以下の章において詳細に説明することとする。実施計画中では、「共通基盤評価技術開発」を項目(10)、「応用技術調査検討」を項目(11)としている。

さらに、高温で使用可能な SiC デバイスの特長を生かして新たな製品分野を創成するために、平成 24 年度より、新たに耐熱性の高い受動部品（キャパシタ、抵抗器、セラミックス基板）の開発を開始することとした。現在、同事業の開始準備中である。本項目は、基本計画に研究開発項目(9)として記載している。その詳細は、追って本事業原簿中に追記する予定である。

次節より、個々の開発項目に対して目標の妥当性を説明する。

1.2 研究開発項目毎の詳細な目標

1.2.1 高品質・大口径 SiC 結晶成長技術開発／革新的 SiC 結晶成長技術開発

本項目の開発は、基本計画における研究開発項目(1)に基づくものである。

SiC ウエハ市場は、現在海外企業による寡占状況にあり、海外供給に頼らざるを得ない状況に対する不安感は我が国における SiC パワー半導体の開発・普及の足かせのひとつになっている。我が国の SiC デバイス技術開発にあたっては、ウエハの品質及び供給の不安定性、高コストが最大のボトルネックであり、高品質・低コストな大口径 SiC 結晶成長技術の確立によって SiC ウエハを安定的に供給することが急務である。これによってデバイス及びインバータ等の変換器モジュール開発を加速し、早期の実用化に繋げることが求められている。

このため、本開発項目においては、現状のデバイス開発用ウエハの作製を担っている昇華法の高度化を「高品質・大口径 SiC 結晶成長技術開発」として主要な取り組みに設定した。しかしながら昇華法には、生産性、品質、コストに関して SiC の本格普及に向けての十分なポテンシャルがある保証はない。このため、昇華法の抜本的な高度化に加え、飛躍的に品質や生産性の向上が期待できるが未だ技術的には基盤研究レベルである革新的な結晶成長技術（ガス法、溶液法）の開発を「革新的 SiC 結晶成長技術開発」として行うこととした。前者においては、一部を除き Si 用プロセス装置の転用が可能な直径 6 インチウエハの実現を、後者ではそれを用いたデバイス試作とパフォーマンス比較が可能な最低口径として 2 インチウエハを目標の前提とした。

1.2.1.1 高品質・大口徑 SiC 結晶成長技術開発

1.2.1.1.1 高品質・大口徑 SiC 結晶成長技術開発(その1)

[中間目標 (平成 24 年度)]

昇華法において、口径 6 インチで、 10^3 個/cm²台の転位密度を実現するのに必要な高品質化にかかわる基盤技術を確立する。

[最終目標 (平成 26 年度)]

昇華法において、口径 6 インチ、長さ 50mm 以上で、有効面積 (端部 3mm を除く) 全域において転位密度 1×10^3 個/cm² 以下の結晶を実現する。

[目標設定の根拠]

本サブテーマでは、昇華法の高品質化に重点を置き、現状市販の口径 4 インチウエハの 10 分の 1 となる転位密度を口径 6 インチで実現することを最終目標に定めた。この高品質化技術を確立することにより、車載等の高信頼性の大規模素子用途に対しても適用可能な SiC ウエハの実用化に繋がる。併せて、成長結晶の長尺化を達成することにより、収量増による低コスト化を狙う。

1.2.1.1.2 高品質・大口徑 SiC 結晶成長技術開発(その2)

[中間目標 (平成 24 年度)]

昇華法において、口径 6 インチで、0.5mm/h 以上の結晶を実現するのに必要な成長速度向上にかかわる基盤技術を確立する。

[最終目標 (平成 26 年度)]

昇華法において、口径 6 インチ、長さ 50mm 以上で、有効面積 (端部 3mm を除く) 全域において転位密度 5×10^3 個/cm² 以下の結晶を成長速度 0.5mm/h 以上で実現する。

[目標設定の根拠]

本サブテーマでは、昇華法の低コスト化に重点を置き、現状市販の口径 4 インチウエハの転位密度を半減させると共に、量産性の点から成長速度と結晶長を倍増させて口径 6 インチの結晶を実現することを最終目標に定めた。このような 6 インチ量産化技術は、6 インチ高品質エピ技術と組み合わせることにより、結晶からエピ成膜までの一貫製造技術の確立に繋がり、SiC デバイス普及のボトルネックである高品質低コストエピウエハの安定供給に大きく資する。

1.2.1.2 革新的 SiC 結晶成長技術開発

1.2.1.2.1 革新的 SiC 結晶成長技術開発(その1)

[中間目標 (平成 24 年度)]

ガス法において、高速性、高品質性、長尺化/口径拡大等の各課題に対する要素技術を確立し、口径 2 インチ、長さ 1mm の 4H-SiC 単結晶の成長を実現する。

[最終目標（平成 26 年度）]

ガス法において、口径 2 インチ以上、長さ 20mm 以上の 4H-SiC 単結晶を実現した上で、昇華法に対する優位性を検証する。

[目標設定の根拠]

本サブテーマにおいては、昇華法が抱える「原料枯渇によるインゴットサイズの制限」という問題を克服出来る成長手法としてのガス法を取り上げ、そのポテンシャルが判定できる単相（多型を含まない）バルク単結晶の実現として、その口径と結晶長を設定した。

1.2.1.2.2 革新的 SiC 結晶成長技術開発(その2)

[中間目標（平成 24 年度）]

溶液法において、高速性、高品質性、長尺化／口径拡大等の各課題に対する要素技術を確立し、口径 2 インチ、厚さ 1mm の 4H-SiC 単結晶成長を実現する。

[最終目標（平成 26 年度）]

溶液法において、口径 2 インチ以上、長さ 20mm 以上の 4H-SiC 単結晶を実現した上で、昇華法に対する優位性を検証する。

[目標設定の根拠]

本サブテーマにおいては、昇華法が抱える「非平衡条件下での成長／気相成長による成長速度制約」という問題を克服出来る成長手法としての溶液法を取り上げ、そのポテンシャルが判定できる単相（多型を含まない）バルク単結晶の実現として、その口径と結晶長を設定した。

1.2.2 大口径 SiC ウエハ加工技術開発

本項目の開発は、基本計画における研究開発項目(2)に基づくものである。

SiC はダイヤモンドに近い高硬度を有しているため、既存の加工技術では結晶の大口径化に伴い更に加工時間を要することになる。これは大口径ウエハ材料の製造において、加工工程がボトルネックになるおそれがあることを示唆している。また現状では、加工コストはウエハのコストの約 1/3 を占めており、低コスト化の観点からも技術の高度化が必要である。

本開発項目では、SiC ウエハの 6 インチ化に対応した高精度、高速及び低コストな実用的ウエハ加工技術の開発を行う。具体的には、各要素プロセス（切断、研削/研磨、CMP 等）の開発および性能検証を進めながら、当該要素プロセスが加工技術として分業化している現状に鑑み、検証データを基にウエハ加工一貫プロセス化方針の検討、並びに大口径 6 インチウエハ加工の課題・対策技術の抽出を実施することで、6 インチウエハ対応の一貫プロセス確立を目指すこととした。

【中間目標（平成 24 年度）】

ウエハ切断技術に関して、3 インチ結晶で切断速度 $150\mu\text{m}/\text{分}$ 以上、同時切断枚数 10 枚以上、切り代 $300\mu\text{m}$ 以下を実現する。また、3～4 インチ結晶／ウエハを対象にして、切断、研削、粗研磨、仕上げ研磨の各要素工程の最適化、及び接続最適化を行い、6 インチ SiC 結晶／ウエハ加工の高速・高品質な一貫プロセス最適化の方針を決定する。

【最終目標（平成 26 年度）】

6 インチ結晶／ウエハを対象に、以下の効率性を実現する。

- ① 切断：速度 $300\mu\text{m}/\text{分}$ 以上、同時切断枚数 10 枚以上、切り代 $250\mu\text{m}$ 以下
- ② インゴットから表面仕上げ精度 Rms（表面荒さ） $0.1\text{nm}@2\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$ のベアウエハを実現する統合加工プロセスとして、プロセス時間 24 時間以内

【目標設定の根拠】

図 II.1.2.2-1 に、現状の口径 3 インチウエハ加工時間と、それを口径 6 インチウエハに適用した際に予想される加工時間を示す。6 インチウエハ対応の一貫プロセスとして処理時間を約 1/4 にして、作業性の点から 1 日以内にインゴットから仕上げウエハまでの処理工程が完了するレベルを最終目標とした。仕上げレベルに関しては、現状のもので特に問題は出ていないため、現状レベルと同等としている。切断に関しては、高速切断の代表ともいえる高速ダイシングソーのウエハ切断装置技術と現状の高速機械設計・製造技術および本研究開発で目標とする一貫プロセス処理時間を考慮して、従来のワイヤーソー技術における 6 インチ高硬脆結晶材料（サファイア）を対象とした限界切断速度を 4 倍以上引き上げる $300\mu\text{m}/\text{分}$ の高速マルチ切断を目標とした。また、切り代はワイヤー剛性の材料的限界から細線化は難しく、従来レベルと同等とした。

SiCウエハ加工時間の現状と大口径化対応の難しさ

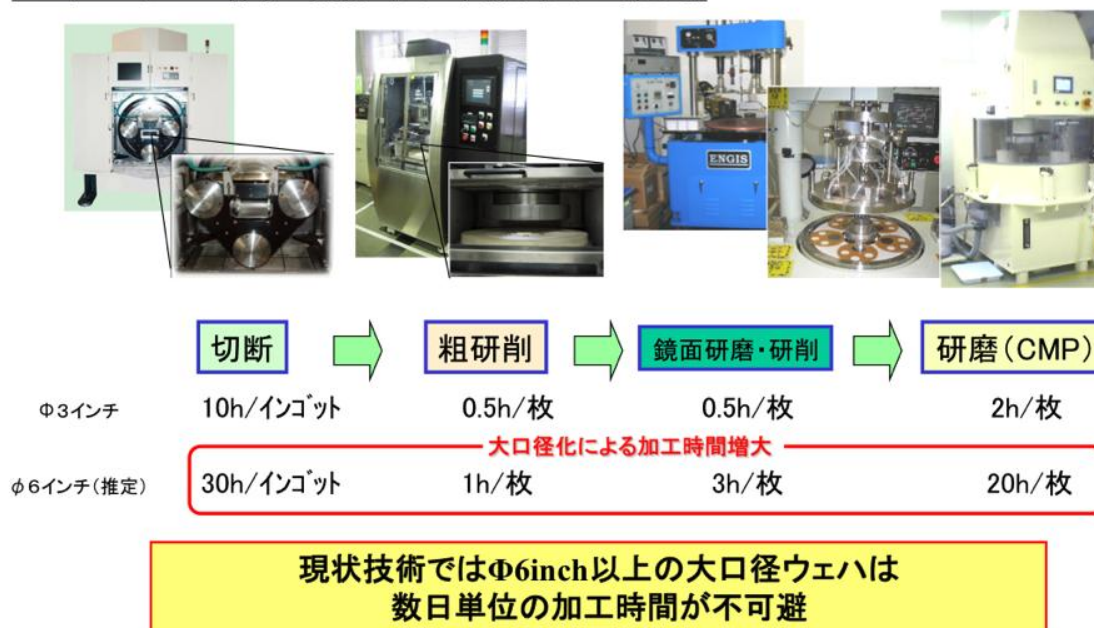


図 II. 1.2.2-1 SiC ウエハ加工時間の現状と大口径化対応の難しさ

1.2.3 SiC エピタキシャル膜成長技術

1.2.3.1 大口径対応技術

本項目のエピタキシャル膜大口径対応技術、および次節のエピタキシャル膜高速・厚膜成長技術の開発は、基本計画における研究開発項目(3)に基づくものである。

SiC デバイス製造に使用するための SiC ウエハには、その上に高品質なエピタキシャル膜を形成することが不可欠である。SiC デバイスの普及拡大には、エピタキシャルウエハのコスト低減及び品質向上によるデバイスの歩留まり向上が必要である。一部を除き Si 用プロセス装置の転用も可能な SiC パワーデバイス製造ラインの 6 インチ化には、極めて強い要望があり、本プロジェクトにおいて、6 インチ結晶成長および基板加工技術開発による 6 インチウエハの早期実現を進めている。エピ成長の大口径対応技術を、結晶成長および基板加工技術と同時並行して、早期に確立する必要がある。このため、本項目では、6 インチ基板の入手を待つことなく、大口径対応エピ成長技術の課題を明確にして大口径・高品質化の技術開発を進め、6 インチ基板の実現と時を同じくして 6 インチ高品質エピウエハを実現する。

[中間目標 (平成 24 年度)]

みなし 6 インチ径のエピタキシャル膜成長を行い、6 インチ成長プロセスにおける問題点を把握すると共に、当該成長膜に対して以下の品質を実現する。

- ・ 均一度：厚さ±10%、ドーピング濃度±20%
- ・ 品質 エピ成長起因の表面欠陥密度：2 個/cm² 以下

[最終目標（平成 26 年度）]

口径：6 インチ、処理枚数：3 枚以上のエピタキシャル膜に対し、以下の品質を実現する。

- ・ 均一度：厚さ±5%、ドーピング濃度±10%
- ・ 品質 エピ成長起因の表面欠陥密度：0.5 個/cm² 以下

[目標設定の根拠]

市販の 3～4 インチエピウエハの現状の均一度レベルを、口径 6 インチ多数枚で実現することを目標とした。なお、目標に掲げた「3 枚」はプロジェクトで導入可能なエピ装置としての仕様である。加えて、SiC デバイスのキラ欠陥としてその低減が重要視されるようになったエピ欠陥密度を目標指標とした。数 kV/数 100A クラスの素子を想定した場合に少なくとも 25mm² 以上のチップ面積が必要であるから、その 25mm² のチップ面積が 75% の歩留まりで取れるように、エピ欠陥密度の最終目標を設定した。

1.2.3.2 高速・厚膜成長技術

デバイスの高耐圧化（5kV 級）に対応するためには、数十マイクロン以上の厚い高純度エピタキシャル膜が必要となる。そのため、プロセス時間の観点から厚いエピタキシャル膜の作製には成長速度が重要であり、高速エピタキシャル膜の成長技術が必要となるが、現状デバイス品質との両立は確認されていない。それゆえ、高耐圧デバイスの実現・普及には、量産に対応できる高速成長での高純度・厚膜エピタキシャル膜成長技術及びその特性評価技術の確立が必要となる。

本開発項目では、4 インチウエハを想定して高耐圧デバイスの作製に対応できる厚膜を高均一・高純度かつ高速で成長できるエピタキシャル膜成長技術を開発する。

[中間目標（平成 24 年度）]

口径 2 インチ、膜厚 50µm 以上のエピタキシャル膜に対して以下の品質を実現し、SiC 厚膜形成技術を確立する。

- ・ 純度 残留キャリア濃度：3×10¹⁴/cm³ 以下
- ・ 品質 エピ成長起因の表面欠陥密度：5 個/cm² 以下

[最終目標（平成 26 年度）]

成長速度 100µm/h 以上で作成した口径 4 インチ、膜厚 50 µm 以上のエピタキシャル膜に対し、以下の品質を実現する。

- ・ 純度 残留キャリア濃度：3×10¹⁴/cm³ 以下
- ・ 均一度：厚さ±2%、ドーピング濃度±10%
- ・ 品質 エピ成長起因の表面欠陥密度：1.0 個/cm² 以下

[目標設定の根拠]

上記高耐圧デバイスに必要な膜厚は 25～50µm であることから、目標値の前提と

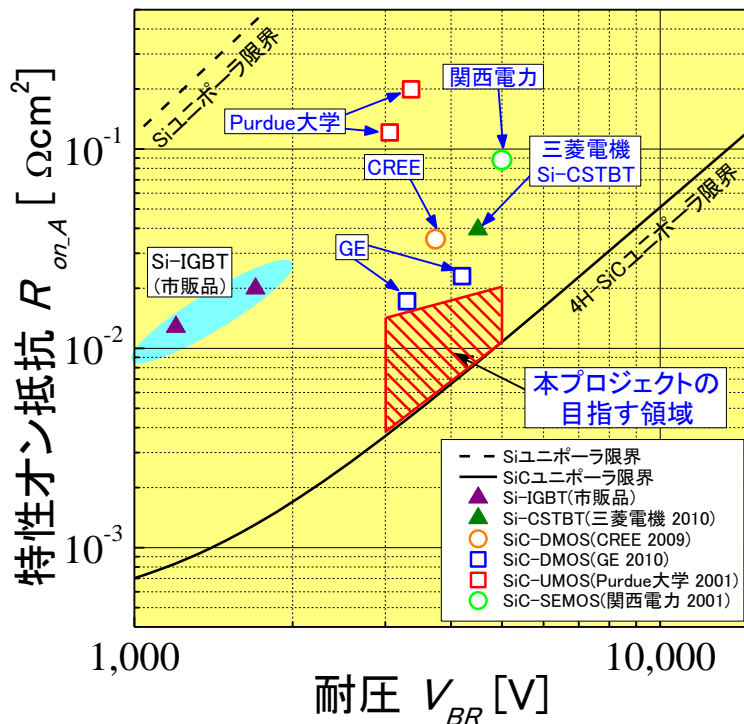
する膜厚は 50 μm とし、これを 30 分で成膜するための成長速度として、100 $\mu\text{m}/\text{h}$ と設定した。エピ膜の均一度に関しては、1.2.3.1 節に記した大口径対応技術におけるものと同様、市販の 3～4 インチエピウエハの現状均一度レベルを口径 4 インチ、膜厚 50 μm 以上のエピタキシャル膜に対して設定した。厚さ均一性については、膜厚が厚くなると相対値での定義では変動の絶対量が大きくなりすぎるため、より厳しい $\pm 2\%$ という値を目標とした。表面欠陥密度については、良品率 60%以上との条件から算出した。純度に関しては、上記高耐圧デバイスの場合 $1\sim 3\times 10^{15}/\text{cm}^3$ であることを踏まえ、精度良くドナー濃度制御を行うための残留キャリア濃度として一桁低い $3\times 10^{14}/\text{cm}^3$ を設定した。

1.2.4 SiC 高耐圧スイッチングデバイス製造技術

本項目の開発は、基本計画における研究開発項目(4)に基づくものである。

世界における SiC 高耐圧スイッチング素子 (5 kV 級 : 耐圧 3kV 以上) の開発状況は、現状では 600 V \sim 1,200 V 素子と比較すると活発とは言えない。しかし、高速鉄道や産業用モータ、スマートグリッド等、今後の飛躍的な市場拡大が予想される高電圧・大電力分野において SiC パワーデバイスの果たす役割は極めて大きく、今後その技術開発が高耐圧領域にシフトしていくことは間違いない。一方で Si-IGBT の性能向上も着実に進んでいるものの、SiC 高耐圧スイッチング素子の性能がその材料物性から予想される性能限界に未だ到達していない現状を鑑みると、その限界に向けて技術開発の促進が必要と言える。また、今後の飛躍的な市場拡大が予想される鉄道などを中心とする高耐圧電力変換器の競争軸は、低損失・小型化・軽量化である。一般産業用の電力変換器が耐圧 1kV 容量数十 kVA 程度であるのに対して、高耐圧電力変換器は耐圧 3kV 以上、容量 MVA 級と桁違いに大きくなる。

これらのことから本開発項目では、5kV 級高耐圧領域において、極限的な低損失化を可能とする新規構造での高耐圧デバイス開発、並びに 1kV 級デバイス技術の拡張による高耐圧デバイス実現/MVA 級変換器実証を行うこととした。



図Ⅱ.1.2.4.1-1 世界における SiC 高耐圧スイッチング素子(3~5 kV)、
及び Si 高耐圧スイッチング素子(Si-IGBT)の開発状況

1.2.4.1 新規耐圧構造デバイス

[中間目標 (平成 24 年度)]

より低損失化が可能な新規高耐圧デバイス構造とその作製要素プロセスを開発し、当該構造で耐圧 3kV 以上の高耐圧 SiC-MOSFET を実現する。

[最終目標 (平成 26 年度)]

必要な各種要素技術を高度化し、耐圧：3kV 以上で特性オン抵抗：15mΩcm² 以下の高耐圧 SiC-MOSFET を実現する。

[目標設定の根拠]

本サブテーマでは、国内外での研究開発状況を踏まえ、図Ⅱ.1.2.4.1-1 の赤斜線領域をプロジェクト終了時に達成すべき開発ターゲットとして設定した。

1.2.4.2 高耐圧大容量デバイス／変換器技術

[中間目標 (平成 24 年度)]

耐圧 3kV 以上の高耐圧 SiC-MOSFET を実現すると共に、SiC-MOSFET、SiC-SBD を適用した 3kV 以上の電力変換器モジュールを試作して、当該電圧領域のスイッチング及び多並列接続に関する要素技術を確立する。

[最終目標（平成 26 年度）]

耐圧：3kV 以上、オン抵抗 80mΩ以下（室温環境下）、定格出力電流密度 1000A/cm²以上の高耐圧 SiC-MOSFET を開発し、当該デバイスを用いた MVA 級電力変換器を試作して、その動作時の電力損失が同耐圧の Si 電力変換器の 50%以下であることを実証する。

[目標設定の根拠]

本サブテーマでは、ボリュームゾーンである通勤・近郊在来線に用いられている変換器（電力変換器の出力容量は～1MW）を念頭に目標値を設定した。このクラスの電力変換器を開発することで変換器に用いられる基本技術を確立することができ、機関車・新幹線などの電力変換器に用いられる更なる大容量・高耐圧電力変換器にも容易に展開することができる。上述の目標値と国内外での SiC モジュールの研究開発状況の関係を図 II.1.2.4.2-1 に示す。赤ハッチングの領域が今回の目標値であり従来の開発されているモジュールに対してはるかに大きな電圧・電流領域であることが分かる。

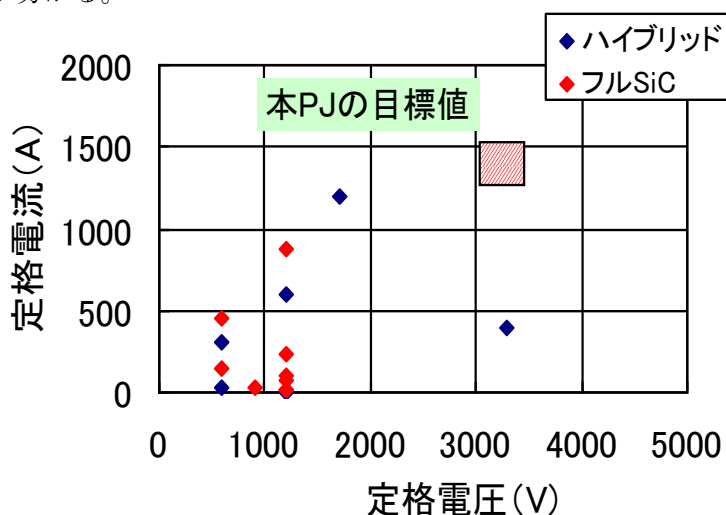


図 II.1.2.4.2-1 SiC モジュールの定格電圧・定格電流の開発状況

また、損失に関しても従来の Si 電力変換器に対して圧倒的に低損失を実現するため、損失半減という目標を設定している。損失を半減するために必要とされるスイッチング素子部分の抵抗値を検討した結果、電力変換器の損失と抵抗値の関係からスイッチング素子の抵抗値が 2mΩ であれば Si の電力変換器に対して損失を半減できることが分かった。抵抗値と電力変換器の損失の関係を図 II.1.2.4.2-2 に示す。このときの MOSFET 及び SBD の損失内訳も図 II.1.2.4.2-2 に示す。素子の並列接続数に関しては現在の新幹線に用いられている IGBT モジュール中の素子数を参考とし 40 個の並列接続を行い上述の抵抗値を実現することとした。この結果として

本プロジェクトにおける素子の抵抗値の目標値を $80\text{m}\Omega$ とした。

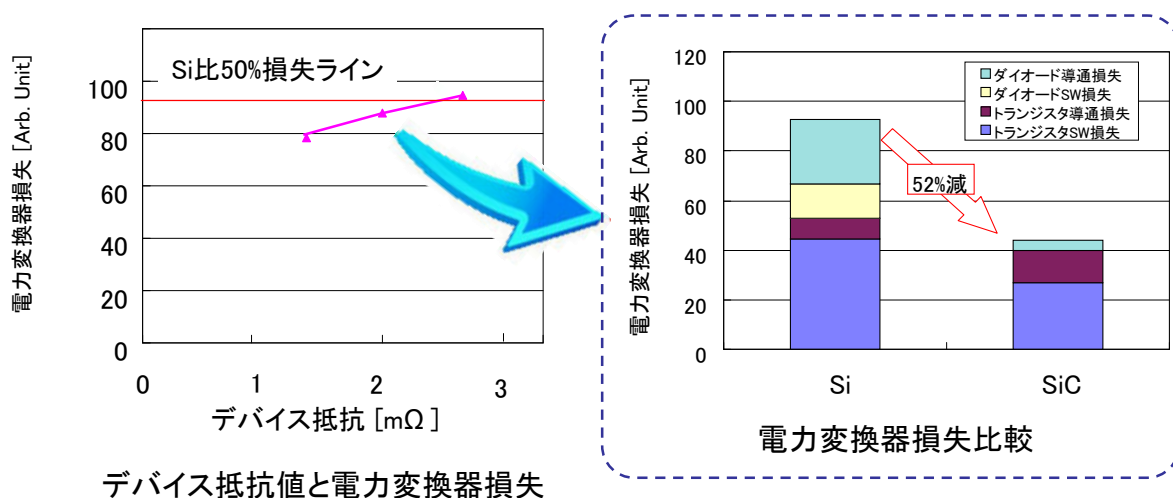


図 II. 1.2.4.2-2 SiC モジュール抵抗値と電力損失

1.2.5 SiC ウエハ量産化技術開発

本項目の開発は、基本計画における研究開発項目(5)に基づくものであり、平成 23 年度の 1 年間の事業である。

1.2.5.1 SiC ウエハ量産化技術開発(その1)

[最終目標 (平成 23 年度)]

大口径 4H-SiC ウエハの量産化技術開発可能な環境整備 (昇華法結晶成長炉、ウエハ加工装置) を実施し、

- ・ 有効面積 (端部 3mm を除く) 全域において転位密度 1×10^4 個/cm² 以下の口径 6 インチ 4H-SiC インゴットを実現する基盤技術を確立する。

[目標設定の根拠]

本開発項目では、開発自体が「1.2.1.1 高品質・大口径 SiC 結晶成長技術開発(その1)」と一体化していることから、「1.2.1.1 高品質・大口径 SiC 結晶成長技術開発(その1)」の中間目標 (平成 24 年度) に至る途中過程での 6 インチインゴット実現へのマイルストーンとして、上記目標を設定した。

1.2.5.2 SiC ウエハ量産化技術開発(その2)

[最終目標 (平成 23 年度)]

大口径 4H-SiC ウエハの量産化技術開発可能な環境整備 (昇華法結晶成長炉、ウエハ加工装置) を実施し、

- ・ 成長速度 0.25mm/h 以上で転位密度 5×10^4 個/cm² 以下の口径 6 インチ

4H-SiC インゴットを実現する基盤技術を確立する。

[目標設定の根拠]

本開発項目では、開発自体が「1.2.1.2 高品質・大口径 SiC 結晶成長技術開発(その2)」と一体化していることから、「1.2.1.2 高品質・大口径 SiC 結晶成長技術開発(その2)」の中間目標(H24年度)に至る途中過程での6インチインゴット実現へのマイルストーンとして、上記目標を設定した。

1.2.6 大口径 SiC ウェハ加工要素プロセス検証

本項目の開発は、基本計画における研究開発項目(6)に基づくものであり、平成23年度の1年間の事業である。

[最終目標(平成23年度)]

切断技術として、ダイヤモンドを使ったマルチワイヤーソーにおいて、SiC 6インチインゴットに対して150 μ m/分以上の高速切断が可能になる最大ワイヤー速度:約4,000m/min、最大張力:70Nの高速高剛性切断技術を実現する。更に、切断、研削、粗研磨、仕上げ研磨の各工程に関して、個々の要素工程の能力限界と最適加工条件(砥石、砥粒、研磨定盤種、装置技術、加工動作管理、能率等)を抽出し、SiC ウェハ加工における高速一貫プロセス確立に資する統合的なデータ蓄積を行う。

[目標設定の根拠]

本開発項目では、開発自体が「1.2.2 大口径 SiC ウェハ加工技術開発」と一体化していることから、「1.2.2 大口径 SiC ウェハ加工技術開発」の中間目標(H24年度)に至る途中過程での要素工程の最適化へのマイルストーンとして、上記目標を設定した。

1.2.7 SiC 高耐圧大容量パワーモジュール検証

本項目の開発は、基本計画における研究開発項目(7)に基づくものであり、平成23年度の1年間の事業である。

[最終目標(平成23年度)]

耐圧3.3kV 定格電流75AのSiC ショットキーバリアダイオードを開発し、Si 絶縁ゲートバイポーラトランジスタと組み合わせて1000A級大容量パワーモジュールを試作してその動作を実証するとともに、All SiC デバイスパワーモジュール実現に必要なとされるSiC FETの仕様に対する技術的指針を得る。

[目標設定の根拠]

本開発項目では、開発自体が「1.2.4.2 高耐圧大容量デバイス/変換器技術」と一体化していることから、「1.2.4.2 高耐圧大容量デバイス/変換器技術」の中間目標(H24年度)に至る途中過程でのSiC ハイブリッド変換器実証として、上記

目標を設定した。

1.2.8 大口径対応デバイスプロセス装置開発

本項目の開発は、基本計画における研究開発項目(8)に基づくものであり、平成 23 年度の 1 年間の事業である。

1.2.8.1 大口径対応デバイスプロセス装置開発（その 1）

[最終目標（平成 23 年度）]

6 インチ SiC ウェハを対象に、イオン注入のための高温プロセス装置を開発し、所定の処理特性の面内均一性を達成する。具体的には、

イオン注入装置の場合、

- ・ 室温から 800°C までの全領域でイオン注入が可能なこと
- ・ 温度均一性：6 インチ面内：±15°C
- ・ Al 注入イオン電流：200μA 以上

[目標設定の根拠]

SiC デバイス化プロセスにおいては、その性能限界から、Si デバイス用のイオン注入装置の転用は本質的に困難である。また既存の 4 インチ径 SiC ウェハに対応した装置の延長では十分な均一性が得られない。このため、6 インチ SiC ウェハ実現に備え、イオン注入時のウェハ高温化という特有の機能を備え、かつ既存の SiC 4 インチプロセス装置技術では不可能な均一性を確保したイオン注入装置技術を開発する必要がある。

1.2.8.2 大口径対応デバイスプロセス装置開発（その 2）

[最終目標（平成 23 年度）]

6 インチ SiC ウェハを対象に、活性化熱処理のための高温プロセス装置を開発し、所定の処理特性の面内均一性を達成する。具体的には、

活性化熱処理装置の場合、

- ・ 熱処理温度：1,800°C 以上
- ・ 温度均一性：6 インチ面内：±30°C
- ・ 一度に 25 枚以上処理可能なこと。

[目標設定の根拠]

SiC デバイス化プロセスにおいては、その性能限界から、Si デバイス用の活性化熱処理装置の転用は本質的に困難である。また既存の 4 インチ径 SiC ウェハに対応した装置の延長では十分な温度均一性が得られない。このため、6 インチ SiC ウェハ実現に備え、Si 用の装置よりもプロセス温度を高め、かつ既存の SiC 4 インチプロセス装

置技術では不可能な温度均一性を確保した活性化熱処理装置技術を開発する必要がある。

1.2.9 高耐熱部品統合パワーモジュール化技術開発

本項目の開発は、基本計画における研究開発項目(9)に基づくものである。平成 24 年 7 月に開始予定であり、今後記載予定である。

1.2.10 共通基盤評価技術

本研究開発項目の開発は、基本計画に記載した研究開発項目と直接対応しておらず、研究開発項目(1)～(4)にまたがる横断的テーマとして設定した自主設定項目である。

結晶成長、加工、エピ、デバイスの一貫した流れの中で、ウエハの品質とデバイスの電気特性との相関を明確にし、ウエハ仕様にいち早く落とし込み、デファクト化もしくはノウハウとして秘匿することは、日本の国際競争力確保の上で非常に重要である。この為、結晶成長～デバイスまでの分析評価手法を包括した統合一貫評価システムを構築し、①統合評価システムと②信頼性に影響を与える欠陥の起源・原因の解明・深掘り機能と③市販およびプロジェクトで開発した SiC ウエハを評価しデータを収集するウエハ管理機能が三位一体となって活動する。これにより、①エピウエハ欠陥とデバイス信頼性の相関に道筋を付け標準化に資するとともに②データベースを構築し、日本 SiC の開発加速・事業活性化に資する。

[最終目標 (平成 26 年度)]

購入ウエハ検査によるウエハ基礎情報の蓄積を行うと共に、各種の高度ウエハ品質評価手法や MOS キャパシターなどの簡単なデバイス評価 TEG による評価も含め、一貫した統合化プロセス評価システムを構築し、デバイス特性やデバイス作製歩留まりとの関係を明確にする。

[目標設定の根拠]

SiC プロセスに係る評価の現状は、結晶成長、加工、エピ、デバイスの各要素プロセス内で個別に評価が行われているだけあるため、各要素プロセス間における評価の連続性が欠落していることが問題である。そのため、結晶成長、加工、エピ成長、デバイス化の一連の流れの中で、ウエハの品質とデバイスの電気特性との相関を明確化する統合化プロセス評価システムの構築を最優先課題とした。また、SiC デバイスは、一部で SiC ダイオードの実用化が始まったが、FET を含めた SiC デバイス全体としては、未だ本格的な実用化は進んでいない。その最大のネックが十分な信頼性を持つ SiC-MOS-FET の本格的な実用化が進んでいないからである。特に、ゲート絶縁膜の信頼性確保が最大の課題である。そこで、本統合評価プロセスでは MOS キャパシタの電気特性を中心に据えて評価すること

とした。なお、本項目の実施はプロジェクト開始時における採択条件である。

1.2.11 応用技術調査検討

本研究開発項目は基本計画に記載した研究開発項目と直接対応しておらず、研究開発項目(1)～(4)にまたがる横断的テーマとして設定した自主設定項目である。

次世代パワー半導体 SiC の出口として実用化が期待されるアプリケーション領域の明確化や国内外の関連情報の収集/調査、ロードマップの提示、SiC 関連仕様の標準化等の応用技術調査検討、並びにインバータ試作などによる実証実験を行い、実用化に向けた活動を牽引する。

[最終目標（平成 26 年度）]

分野別に市場規模・仕様に関する国内外の情報収集及びアンケート・ヒアリング等の調査を行い、実用化が期待されるアプリケーション分野を明確化し、適用分野別に、産業貢献度（市場規模）ロードマップと要求仕様、及び温室効果ガスの削減量をまとめる。

特に、SiC の自動車への普及を目指したロードマップの提示、車両用 SiC モジュールの目標性能の明確化、車両用 SiC 仕様の標準化、並びに自動車用インバータ試作などによる実証実験を行う。

[目標設定の根拠]

SiC デバイスの実用化を加速する為には、実用化のターゲットを明確にして、そのアプリケーションに必要な仕様のデバイスを早期に供給するための開発を優先して推進することが必要である。この観点に立って、上記調査目標を設定した。更に、SiC デバイスの普及拡大には、SiC のメリットを判りやすく見せる実証実験が極めて有効である。この為、オール SiC カーを作ってデモンストレーションする目標設定とした。なお、本項目の実施はプロジェクト開始時における採択条件である。

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

本研究開発の全体像を図Ⅱ-2.1.-1に示す。図中の研究開発項目(1)~(4)は、平成22年度から26年度の全期間にわたって実施する予定の項目である。(5)~(8)は、平成23年度のみ実施した内容であり、その位置づけは、(5)は昇華法による6インチウエハ事業化の推進に向けた量産化技術開発、(6)・(7)はそれぞれ(2)・(4)の加速、(8)は6インチ対応プロセス装置開発である。このため、以下の各節では、(1)の一部と(5)、(2)と(6)、(4)と(7)の、それぞれの内容を同じ節で併せて記載詳述する。

平成22年度	平成23年度	平成24年度	平成25年度	26年度	27年度
(1)結晶成長技術	大口径結晶の高品質・高速成長技術開発				
(5)量産化基盤	(1)-2(昇華法の一部) 富津分室→新日鐵 共同研究(1/2)				
(2)ウエハ加工技術	高速・低損傷加工・超平坦化技術開発				
(6)加工要素検証					
(3)エピ成長技術	大口径化・厚膜高速成長技術開発				
(4)高耐圧デバイス技術	高耐圧デバイス・オールSiCモジュール化				
(7)モジュール検証					
(8)プロセス装置開発					
METI直執行			NEDO事業		

図Ⅱ-2.1.-1 本研究開発の計画全体図

2.1.1 高品質・大口径 SiC 結晶成長技術開発／革新的 SiC 結晶成長技術開発

2.1.1.1 高品質・大口径 SiC 結晶成長技術開発

2.1.1.1.1 高品質・大口径 SiC 結晶成長技術開発(その1)

(SiC ウエハ量産化技術(助成事業)を含む)

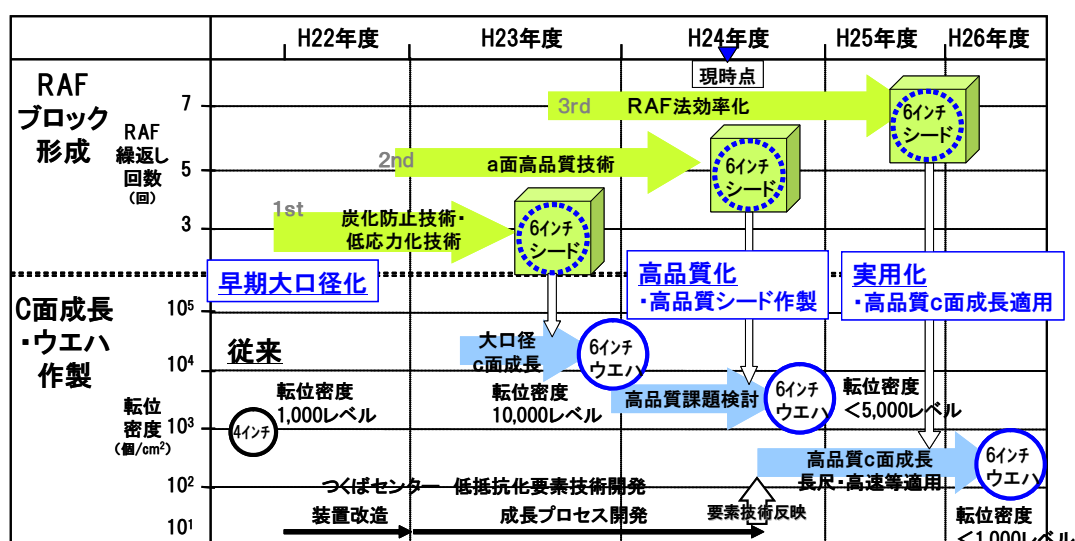
本テーマにおいては、実施者(デンソー、豊田中研)が開発した高品質化技術:RAF法を、大口径単結晶作製に適用し工程改良することにより、高品質6インチ結晶成長を実証する。本節に、基本計画の研究開発項目(1)(全年度にわたる事業)の内容と、同じく研究開発項目(5)(平成23年度に量産化技術開発として実施した事業)の内容を併せて記載する。

RAF(“Repeated A-Face” Growth)法とは、通常SiC単結晶成長で行われるc面成長の方向から90度の角度をなす方向に成長するa面成長を行い、その成長方向に平行な面を有するシートを切り出して再度a面成長を行うということを繰り返す結晶成長法である。この工程により、成長方向に伝播するマイクロパイプや螺旋転位等の貫通転位を大幅に低減することが可能なシートが形成される。この技術を大口径シートに適用する上では、所望のサイズを得るためにa面成長を継ぎ足すことにより相当サイズのブロック状のインゴットを形成する。そこから薄板状のc面シートを丸く切り出し、

c面成長を行ってRAF法の工程が完了する。このようなRAF法の技術を用いた開発の流れを図Ⅱ.2.1.1.1.1-1に示す。上段にはRAF法を用いたブロック状のインゴットを形成する計画を示しており、横軸に年度、縦軸は予定しているRAF繰返し回数を表している。下段にはRAFブロックから得られたシードを用いてc面成長を行い、ウエハを作製する計画を示しており、縦軸はウエハの目標とする転位密度を表している。プロジェクトの初期はRAF繰返し回数の少ない工程を行う。この場合のシードにc面成長して得られると予想される転位密度は 10^4 個/cm²レベルであるが、早期に

大口径化適用に対する課題抽出と対策実施を図り、高品質ウエハ開発に反映することが可能と考えている。プロジェクトが進むにつれてRAF繰返し回数の多い、高品質なブロック状インゴットを得る技術を開発し、6インチ化に適切な高品質c面成長技術を開発することで高品質なウエハを実現する計画である。

上記の進め方により、平成24年度中間目標「 10^3 個/cm²台の転位密度を実現するのに必要な高品質化にかかわる基盤技術確立」、平成26年度最終目標「昇華法において、口径6インチ、長さ50mm以上で有効面積(端部3mmを除く)全域において、転位密度 1×10^3 個/cm²以下の結晶実現」を達成する。



図Ⅱ.2.1.1.1.1-1 高品質・大口径 SiC 結晶成長技術 研究開発計画

2.1.1.1.2 高品質・大口径 SiC 結晶成長技術開発(その2)

(SiC ウエハ量産化技術(助成事業)を含む)

本研究開発項目における目標課題開発の実行においては、新日本製鐵においてこれまでに蓄積されてきた、4 インチ成長において実績のある昇華法をベースとする独自の大口径成長技術を、基本的に口径 4 インチ (100mm) を超える大口径の SiC 結晶成長へ適用可能とする。

本節には、基本計画の研究開発項目(1) (全年度にわたる事業) の内容と、同じく研究開発項目(5)(平成 23 年度に量産化技術開発として実施した事業)の内容を併せて記載する。



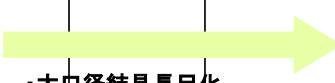


SiC 単結晶の材料力学的特性等の視点に基づく各種の成長条件最適化を拡大適用することにより、6 インチ高品質 SiC 基板の安定供給に繋がる製造技術が実現可能となる。特に、単結晶の大口径化に当たっては、SiC 単結晶成長が 2000°C を超える超高温プロセスであるが故に、結晶内部の温度不均一性等の影響が、GaAs や Si などの他の半導体材料と比較して、特に大きく発現する可能性が高くなる。また同時に、結晶成長過程の変動要因に繋がる各種成長条件の擾乱等の僅かな変化の影響を大きく受ける可能性があり、このため、6 インチ大口径結晶の開発に際しては、これらの各種成長条件の最適化を効率的かつ効果的に進める開発に、一定規模の基板製造プロセスを通して制御安定性を評価する開発視点を並行させなければ、残留熱応力起因のマクロ結晶割れ等が頻発する等々、開発を遂行する上で大きな進捗の障害になり得ることが予想される。

新日本製鐵が既存の 2~4 インチ口径の単結晶成長において培った基礎基盤技術に、SiC 材料の力学的視点に基づく成長技術の精緻化を加味し、結晶成長の変動要因を抑制する成長技術を確立することが本研究開発項目を所定の事業期間内に完成させるために極めて重要となる。また、6 インチウエハの転位密度低減化についても、例えばウエハとエピタキシャル膜の界面における転位構造変換などの現象等で知られているように、単にウエハ自体の結晶のみならず、ウエハ上のエピタキシャル膜との相互作用を含めた、ウエハの結晶欠陥制御の観点が重要となる。

開発スケジュールの概要としては、5 年間の本事業期間を前期 3 年および後期 2 年にステージを分けて実行し、まず、前期の 3 年間に於いて、マクロ結晶割れ問題の頻発度をはじめとする、大口径化に関する諸技術問題の課題抽出と、それらの課題解決を行う。特に、後期の 2 年間で研究開発にて一定規模の製造フローに基づく 6 インチ単結晶製造技術に繋がることを視野に入れるために、0.5mm/h 以上の成長速度を実現することにより 6 インチ口径結晶製造プロセスの方向性を示す開発を進める。

表 II.2.1.1.1.2-1 に、本研究開発項目の開発計画とスケジュールの概要を示す。

表 II.2.1.1.1.2-1 研究開発計画とスケジュール

開発項目	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度	H26年度
【前期課題】 ・口径6インチ、成長速度0.5mm/h以上の結晶開発。 (大口径化に関する技術課題抽出と課題解決)					
	6インチ結晶実現、および成長速度目標達成へ成長条件調整				
					
	残留応力制御および大口径成長安定化への指針確立				
【後期課題】 口径6インチ、長さ50mm以上、転位密度 5×10^3 個/cm ² 以下の結晶を成長速度0.5mm/h以上の実現					
			・大口径結晶長尺化 ・転位密度低減化 ・高速成長化		
【H22FY補正予算】(注) 6インチインゴット、成長速度0.25mm/h以上、転位密度 5×10^4 個/cm ² 以下					

(注) 平成23年度は、量産化技術開発加速を目的とした、新日本製鐵および新日鉄マテリアルズとの共同開発(平成22年度補正予算による単年度助成事業(研究開発項目(5)))を実施。

2.1.1.2 革新的 SiC 結晶成長技術開発

2.1.1.2.1 革新的 SiC 結晶成長技術開発(その1) ーガス法ー

ガス法の平成 22 年度から平成 26 年度までの 5 ヶ年計画を図 II.2.1.1.2.1-1 に示す。最終の平成 26 年度末に昇華法を超える低コスト化技術を実証することを目標に、ガス法による SiC 結晶成長技術の開発を進めている。平成 24 年度までにガス法により、高速性、高品質性、長尺化/口径拡大等の各課題に対する要素技術確立し、口径 2 インチ、長さ 10mm の 4H-SiC 単結晶の成長を中間目標として実証する。特に、日進分室において事業者（デンソー）は装置開発（開発基盤作り）と連続・長尺技術開発を進め、再委託先の電力中央研究所（材料科学研究所土田秀一上席研究員）においては、高速・高品質成長実現に向け塩素系ガスを導入した成長技術開発を進める。

更に、本事業の最終年度に向け、前半で開発した要素技術を実証炉に集約し、将来の低コストにつながるポテンシャル実証、大口径化開発を進め、少なくとも口径 2 インチ以上、長尺 20mm 成長技術を開発することで結晶成長法としての技術確立を進め、昇華法に対する優位性を実証する。

(1) 連続・長尺成長技術の開発(日進分室)

長尺・連続成長、高速・高品質成長、大口径化の各課題に関する開発を進めることで、「口径 2 インチで成長量 20mm の実証に向けての成長炉の基本構造明確化」と「昇華法に対する優位性実証」に取り組む。特に、長尺・連続成長のキー技術である成長面の安定成長機構を導入した設備改造を実施し、ガス法のポテンシャル実証を図る。

1) 装置構造の検討

本項目では、長尺・連続成長、高速・高品質成長及び大口径化技術の開発の土台となるガス成長炉をシミュレーション設計技術、温度、成長モニタリング技術及びるつぽ部材の高耐久化技術を含めて開発する。

2) 連続・長尺成長の実証

本項目では、開発したガス成長炉を用いて、昇華法を凌駕する結晶成長法としてのポテンシャルを実証する。特に、本項目での開発と下記の高速・高品質成長技術を融合し、最終目標の達成を図る。

(2) 高速・高品質化の検討(電中研再委託)

本項目ではガス法の優位性の一つと考える高速化・高品質化の両立を実証するために電中研への再委託を実施し、高速化と品質の相関を把握して両立に向けた指針を見出す。特に、塩素系ガス（高温・大流量）によるクラスタ防止効果による高速化・高品質化両立の可能性をシミュレーション・実験実証の両面から明らかにする。

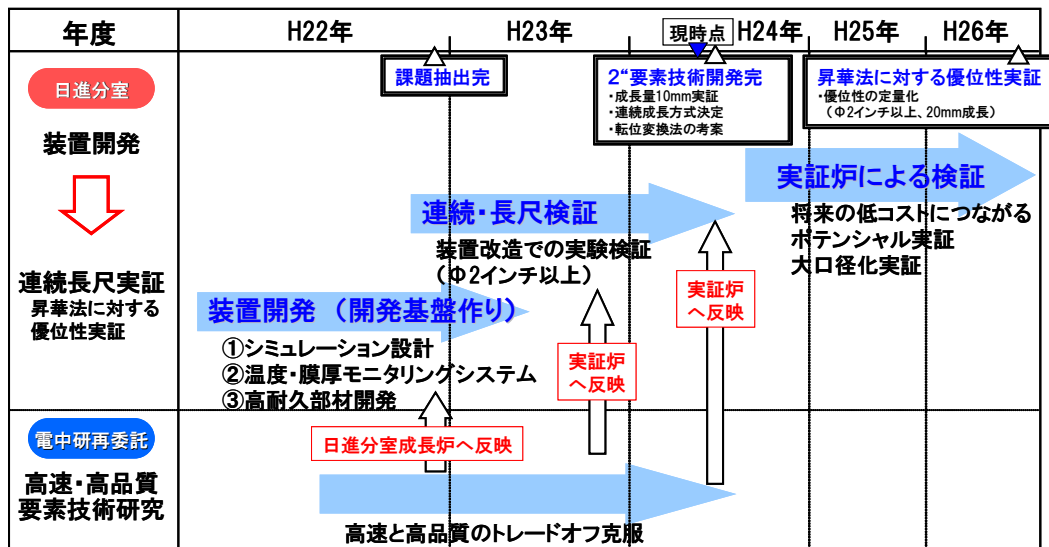


図 II.2.1.1.2.1-1 革新的 SiC 結晶成長技術開発 ガス法 研究開発計画

2.1.1.2.2 革新的 SiC 結晶成長技術開発(その2) –溶液法–

本プロジェクトでは高速性、高品質化、口径拡大等の各課題に対する要素技術を確立し、溶液法において、昇華法に対する優位性を検証する。

溶液法は、Si 融液に炭素を溶解させ液相から結晶化させる結晶成長法であり、液相からの成長であることから成長速度の向上と長尺化が期待でき、また、平衡状態に近い成長であるため低欠陥で高品質化が期待できる方法である。この方法の弱点は、Si 融液に対する炭素固溶度が低いことであり、炭素濃度をいかにして上げるかが最大の課題である。これに対し本プロジェクトでは、高温高压成長に、学の知見を融合して革新的結晶成長技術として確立する。

以下に具体的な研究開発の内容を示す。

(1) 高速成長技術

溶液法において SiC 単結晶の成長速度を向上させるには、融液中の原料溶解度を増加させることが不可欠である。この課題に対し、融液組成と高温高压合成条件の探索を行い、さらにそれらの成果を融合させることで従来技術にはない新しい成長条件を確立する。特に高温高压合成では、高压成長（最大 10MPa \approx 100 気圧）が可能な成長炉を新規に導入することとした。本装置で高压を印加することにより、通常の圧力では実現不可能な昇華温度以上の高温度領域まで成長条件の探索が可能となる。また、長時間安定な溶液を実現することで、長尺高速成長を実現する方針も併せて見出す方針である。なお、融液組成の化学工学的知見を元にした探索について東京工業大学（応用セラミックス研究所松本祐司准教授）と共同で実施する。

(2) 高品質成長技術

高品質成長を実現するには融液と成長結晶間の固液界面における結晶化反応過程、表面形成過程を制御することが極めて重要となる。これらの制御技術の確立を目指しながら SiC 溶液法における結晶欠陥の形成メカニズムの解析を進め、再現性良く平坦かつ均質な高品質結晶を成長させる成長条件を確立することに取り組む。なお、成長結晶の表面形成過程の解析および実験的検証は名古屋大学（大学院工学研究科宇治原徹教授）と共同で実施する。

(3) 大口径化技術

これまで培った Czochralski 法、Bridgman-Stockbarger 法などの溶液成長技術を生かし、成長炉内温度分布、融液対流の制御を緻密に行い、種結晶から大口径結晶を育成する方針を見出す。また、大口径化技術は上記「高速成長技術」、「高品質成長技術」との両立が不可欠となる。これらの融合を図り、昇華法の代替技術化の方針を見出す。

上記の研究開発への取り組みは、平成22～24年度までに各要素技術を確立し、平成25～26年度でそれぞれの技術統合を図ることで実用技術へ展開して、最終目標を達成する。

第一ステップ（平成22年度～平成24年度）

SiC 溶液法における高速成長技術を実現するため、融液組成検討と高温高压合成法の確立を併せて進め、原料溶解度向上、結晶化反応の促進を実現する最適解を見出す。また高速成長を長時間安定に行う技術の方針を見出すことで、長尺化成長の方針を検討する。高品質成長は結晶化過程を解析することで均質かつ低欠陥の SiC 単結晶を得る方策を検討し、高速成長との両立を目指す。大口径化で重要となる成長炉内温度分布制御などはこれまで培った溶液成長技術等の知見を生かし、成長実験、シミュレーションなどで最適条件を導く。

<実施内容>

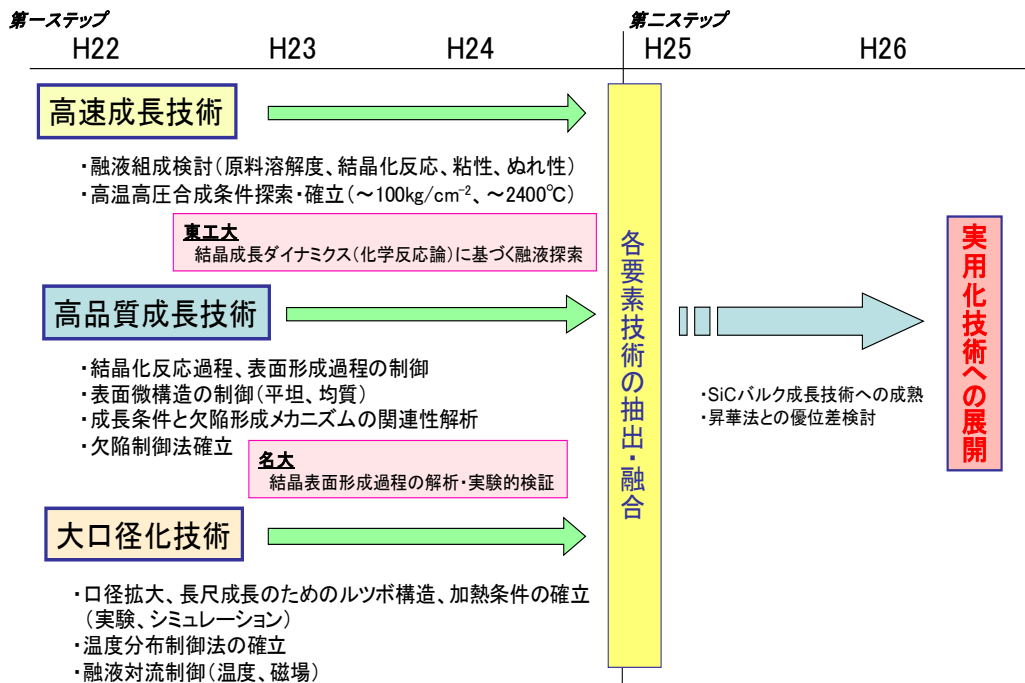
- ・融液組成検討（原料溶解度、結晶化反応、融液粘度、ぬれ性等）
- ・高温高压合成条件探索
- ・成長条件と欠陥形成メカニズムの関連性解析および欠陥制御法探索
- ・ルツボ構造および加熱条件による炉内温度分布の解析および制御法確立

第二ステップ（平成25年度～平成26年度）

第一ステップで得られた高速・高品質・大口径に資する各要素技術を融合し、SiC バルク単結晶成長法への成熟を図る。また、昇華法による結晶成長との優位差を検討し、実用化技術への展開検討を行う。

<実施内容>

- ・溶液成長法における 4H-SiC バルク単結晶成長技術の確立
- ・高速化・高品質化・大口径化実証実験



図Ⅱ. 2.1.1.2.2-1 全プロジェクト期間の実施計画

2.1.2 大口径 SiC ウエハ加工技術開発

(大口径 SiC ウエハ加工要素プロセス検証を含む)

本節に、基本計画の研究開発項目(2)(全年度にわたる事業)の内容と、同じく研究開発項目(6)(平成23年度に開発推進のため要素プロセス検証として実施した事業)の内容を併せて記載する。

高品質・低コストな大口径 SiC ウエハ実現に向けては、結晶成長技術、ウエハ加工技術、エピタキシャル成長技術の各技術分野に対する全方位での技術開発が不可欠である。この中でウエハ加工技術に関しては、従来のプロジェクトでは結晶成長やエピタキシャル成長に付随した技術開発が一般的で、大幅な技術革新はなされてこなかった。しかしながら、高硬度材料である SiC を加工する上では大口径化に伴い大幅な加工スループットの悪化が見込まれており、現状でウエハコストの3分の1を占めるウエハ加工プロセスに対して抜本的な技術開発が不可欠な状況である。これらの問題を解決する上では、(1)SiC ウエハ作製技術に欠かせない、切断、研削、研磨、CMPの各プロセスにおいて従来より高速かつ低ダメージで加工する新しい技術を開発するだけでなく、(2)互いに最適な組み合わせを検討することで、より高能率・高品質な一貫ウエハ製造プロセスの構築を目指すことが重要となる。また産業的にも使いやすく、再現性と歩留まりの高い加工技術を構築し、結晶成長、エピタキシャル成長技術開発との連携によって実用的な SiC ウエハの実現を図る。

上記のような背景から、本研究開発テーマにおける具体的な研究開発の内容を記す。

(1) 要素ウエハ加工プロセスの開発

(1)-1 高速・低ダメージウエハ切断技術開発

ダイヤモンドマルチワイヤーソーによるウエハ切断では固定砥粒ワイヤーを超高速で送る新手法を開発し、切断能率の改善を図る。また、ダイヤレス高速切断手法として放電加工によるマルチワイヤーソーを開発し革新的 SiC 切断法を開拓する。本研究ではワイヤー、加工液、スピンドルなどの各種新材料、ワイヤー送り機構や切断状況を管理する高度な装置制御技術の開発を軸に、加工能率だけでなく高精度と低加工ダメージ、少切断ロスを両立する手法の探索を行う。なお、放電加工による切断技術開発においては、中部大学(藤原洋記念 超伝導・持続可能エネルギー研究センター山口作太郎教授)との共同実施で、プラズマ解析による加工能率向上と細線化を検討し、切断ロス低減技術を開発する。

(1)-2 高速研削・研磨技術開発

切断された SiC ウエハ表面の加工変質層を確実に除去し、かつ最終工程である CMP プロセスを行う為に最適な平坦性、表面微構造を短時間で達成する研削・研磨手法を

検討する。

(1)-3 高速 CMP 技術開発

CMPは二律背反の関係にある研磨速度向上と表面性状(粗さ、ダメージ・キズレス)確保を両立するプロセス開発が重要となる。また、前工程の研削・研磨技術との適合を図り、CMP除去量の低減と低ダメージ化、清浄化を前提にした加工能率向上を目指す。また、大阪大学(大学院工学研究科佐野泰久准教授)との共同実施では、砥石レスによるスクラッチフリー化と大口径化に伴う加工レートの低下が無いことが期待される新規な加工手法である触媒基準エッチング法(CARE; CAlyst-Referred Etching)による平坦加工技術の開発を行う。

(2) 一貫ウエハ製造プロセスの構築

研削からCMPまでの各工程条件を最適に組み合わせ、前工程で導入された表面の加工変質層を確実に除去し、最終的に加工変質層のないエピレディな超平坦面を実現する一貫加工工程を構築する。

この為、加工で導入された表面変質層の深さを正確に評価する手法として、ステップポリッシュ法の適用を検討する。また、名古屋工業大学(大学院工学研究科江龍修教授)との共同実施では、非破壊のインライン評価法として紫外線反射を用いた新規な評価法を開発する。

コア技術となる切断、研削、研磨、CMPプロセスの最適化を図る他、ウエハ成型、端面加工工程などの最適化を図り、トータル加工時間の短縮を検討する。

これらの開発項目は、前期3年間(平成22～24年度)を第一ステップとして、6インチ加工に資する各要素技術の開発を実施する。その後、後期2年間(平成25～26年度)を第二ステップとして、各技術の統合による実用化可能な技術開発を図り、最終目標を達成する計画である。以下に詳細を記す。なお、第一ステップの実施に当たっては、高速・高剛性マルチワイヤーソー開発および切断、研削、荒研磨、仕上げ研磨の各加工工程ごとのポテンシャル把握を加速実施する必要がある、その内容は、平成22年度補正予算事業である研究開発項目(6)として追加実施したものである。

第一ステップ(平成22年度～平成24年度)

高速・低ダメージウエハ切断技術開発では、口径3もしくは4インチインゴットを利用し、目的達成に必要な材料開発、装置技術開発を試作装置にて行う。高速研削・研磨技術開発では、切断プロセスとCMPプロセスを繋ぐ中継技術として最適な品質・能率を達成する砥材、装置、加工条件を探索する。また、続く高速CMP技術開発では、良好な表面を得ることを絶対条件に短時間で完了する工程を構築する。これ

らの切断から CMP の技術開発は全て口径 3 もしくは 4 インチの統合プロセスを構築して行い、6 インチ化の課題抽出と対策技術を抽出する。また、共通基盤評価技術開発と連携し、加工プロセスの管理に不可欠な加工変質層の検出・評価に関する技術開発を進め、ウエハ加工の総合プロセスの最適化を進める。

第二ステップ (平成 25 年度～平成 26 年度)

第一ステップで抽出した 6 インチ化の課題と対策に基づき、統合プロセスを構築する。各加工プロセスは第一ステップから見極めた最適な方式を選択し、統合プロセスに適用する。また、第二ステップにおいては、本プロジェクトの研究開発項目「高品質・大口径 SiC 結晶成長技術開発」において開発されたインゴットを使った検証実験を行う。また、加工した大口径 SiC ウエハを研究開発項目「大口径エピタキシャル膜成長技術」、及び「SiC 高耐圧スイッチングデバイス製造技術」に適用し、各研究開発との連携により評価結果をフィードバック頂く事で相乗的に開発を加速させる。

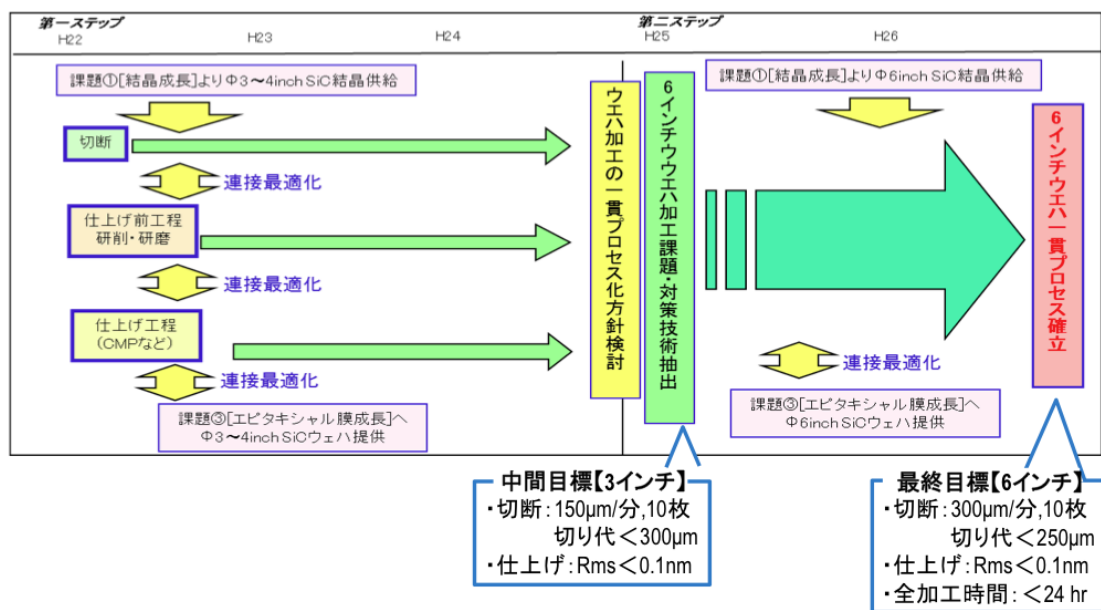


図 II.2.1.2-1 開発目標とスケジュール

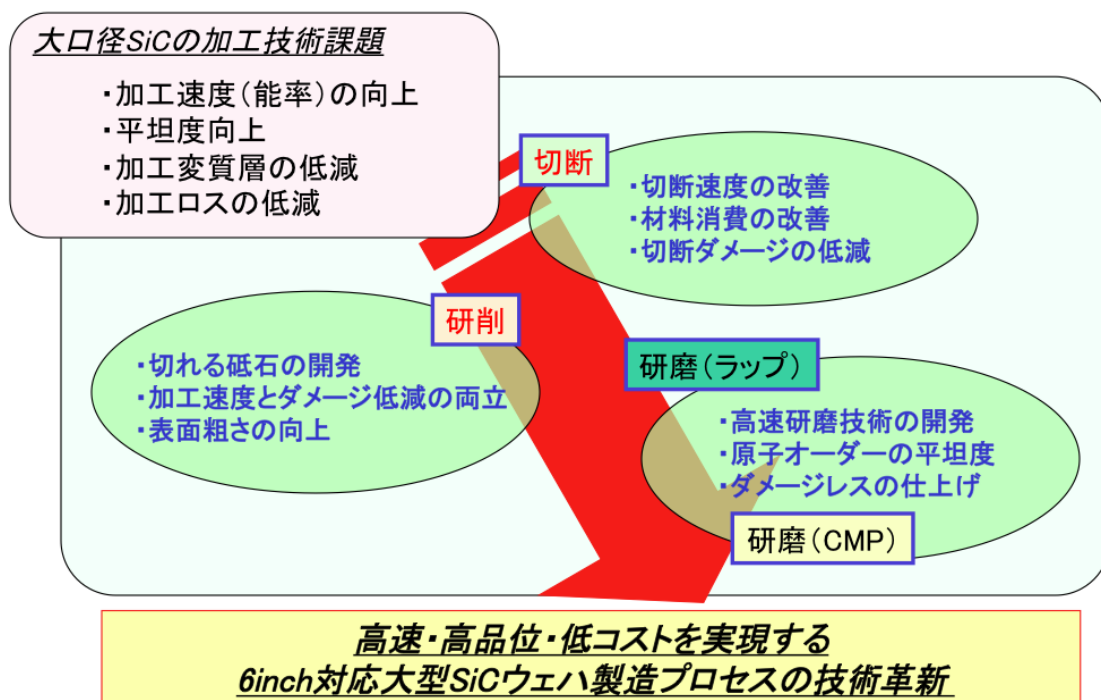


図 II.2.1.2-2 大口径 SiC 加工技術開発の各種課題と対策方針

2.1.3 SiC エピタキシャル膜成長技術

2.1.3.1 大口径対応技術

本節に、基本計画の研究開発項目(3)のうち、大口径化に関する内容を記載する。

エピタキシャルウエハの濃度及び膜厚の均一性・再現性はデバイス特性歩留まりを決める重要な因子であり、6 インチエピタキシャルウエハで高い素子歩留まりを実現するには濃度及び膜厚の高均一・高精度化技術が求められる。加えてエピ表面欠陥は素子歩留まり、特に信頼性を決める重要な因子で歩留まり向上にはその低減が必要である。エピ表面欠陥の要因についてはバルクウエハ、CVD 装置、エピ成長条件等が複雑に関係しており、そのエピ表面欠陥生成要因を明らかにし、要因を低減することが必要である。

SiC は極性面を有し、主に Si 原子で表面が終端された Si 面が用いられている。一方、スイッチングデバイス、特に MOSFET においては、チャンネル移動度が重要となる数 kV 以下の耐圧領域では、高チャンネル移動度が得られる C 面が用いられることが多くなってきており、C 面においても 6 インチエピタキシャルウエハの開発が必要である。

SiC のエピタキシャル成長では、成長面を C 軸から数度傾けたオフウエハを使うことが必須となっている。このオフ角は 2 インチ径の 4H-SiC では 8°オフが使用されていたが、3 インチ及び 4 インチでは口径拡大に伴う切り代の増加を抑えるために 4°オフへと低オフ角化されてきた。6 インチウエハにおいてもウエハコスト低減の観点から切り代の抑制は必要と考えられ、さらなる低オフ角化が予想されている。加えて、近年、特に MOSFET では低オン抵抗化の観点からトレンチ構造を採用するケースが多くなっている。この場合、ゲートはトレンチ側壁が使用されるが、オフ角が存在すると、トレンチ側壁をオフ方向に対してどういう向きに形成するかでゲート特性にばらつきが生じる。これを抑えるためにも、オフ角の低減が求められており、現状の 4°オフよりも、さらに低いオフ角度に対応するエピタキシャル成長技術が必要になる。

上記の観点から、本研究開発では、3 枚 x 6 インチの CVD 装置を使用して、オフ角、面極性を考慮しながらそれぞれについて均一性・表面モフォロジー・再現性を決めるパラメーターの抽出を行う。また、エピ表面欠陥低減についてはオフ角、面極性を含めバルクウエハ表面のエピ前処理に重点をおいて条件を最適化、高度評価手法を駆使してウエハ全面での品質評価を行っていく。

具体的には、現在 SiC エピタキシャルウエハとして主流となっている 4°オフ Si 面での 6 インチエピタキシャルウエハの開発、4°オフ C 面の 6 インチエピタキシャルウエハ技術開発、4°オフよりもより低オフ角ウエハでの 6 インチ対応化技術、これらの技術に共通で且つエピ表面欠陥低減に重要なウエハ前処理技術の開発という 4 つのテーマを設定し、4°オフ Si 面並びに C 面での最終目標達成を目指しながら、将来の低オフ

角化に対応できる 6 インチエピタキシャル成長技術の開発を行う。

なお、大口径対応技術に着手するにあたり、6 インチインゴット・基板の完成を待っていたのでは 6 インチエピタキシャルウエハの早期実現は不可能である。そこで、本研究開発項目の実施に当たっては、3 インチウエハ 2 枚を並べた見みなし 6 インチ配置で条件検討を進め、その後 6 インチウエハで検証するやり方で研究開発を進めることとした。殊に本研究開発で使用する CVD 装置は、ウエハが公転のみ行われるタイプであるため、均一性に関して動径方向はウエハ口径による差異は無いと考えてよく、径方向の均一性に注目すればよいと考えられ、3 インチウエハを 2 枚径方向に配置することで、均一性の評価を行うことが可能である。ここで得られた結果は 6 インチウエハのベンチマークとして十分適応可能と考えられ、6 インチウエハの結果との差異からウエハサイズによる問題を抽出し、それを解決することで最終目標を達成できるように計画することとした。

(1) 4°オフ Si 面

3 インチウエハにおける成長条件をベースに 3 インチウエハを 2 枚径方向に並べることで見做し 6 インチとし、均一性、エピ表面欠陥密度と成長条件の相関を調べながら成長条件を最適化、中間目標値の達成を行う。その後、見做し 6 インチの成長条件をベンチマークとして 6 インチウエハでの成長実験を実施して口径拡大による実際の課題を抽出し、その課題解決から最終目標値の達成を目指す。併せて高速成長の可能性を探る。

(2) 4°オフ C 面

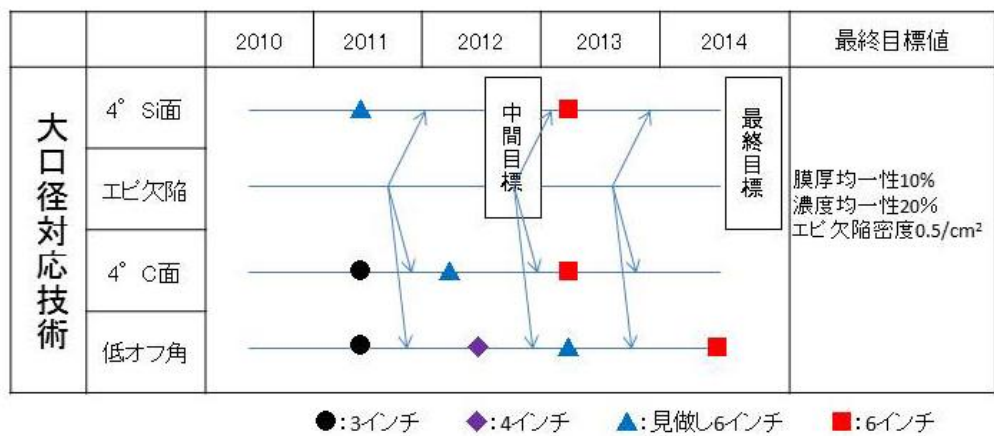
3 インチウエハにおいて、均一性、残留不純物濃度と成長条件の関係を明らかにし、そこから得られた最適成長条件をベースに 3 インチウエハを 2 枚径方向に並べることで見做し 6 インチとし、導出した条件での口径拡大への適応性を調べ、6 インチ化への課題抽出と残留不純物濃度の低減及び濃度均一性に重点を置いて成長条件の最適化を行う。併せて、高速成長化の検討も行う。その後、見做し 6 インチの成長条件をベンチマークとして 6 インチウエハでの成長実験を実施、最終目標達成と高速化の可能性を探る。

(3) 低オフ角

既存装置での実験結果をベースに 6 インチ対応の CVD 装置での成長条件導出を 3 インチウエハで実施する。その後、4 インチ、見做し 6 インチと口径を順次拡大していき 6 インチ化の課題を抽出していく。その後、実際の 6 インチウエハでの実験を実施、6 インチ化の実証を行う。

(4) エピ欠陥

3インチウエハを用いてバルクウエハ表面のCMP研磨仕上げ並びに洗浄の基準を設定し、それをベースに水素エッチング条件並びにエピ成長初期状態とエピ表面欠陥の相関を取得し、成長条件の最適化と合わせて、エピ欠陥低減に最適なエピ前ウエハ前処理条件を導出していく。得られた結果は随時(1)～(3)のテーマに反映し、エピ表面欠陥密度における最終目標達成を目指す。エピ欠陥密度の評価では「共通基盤評価技術」と連携し高度評価手法によるウエハ全面でのエピ欠陥密度評価を実施していく。



図Ⅱ.2.1.3.1-1 開発目標とスケジュール

2.1.3.2 高速・厚膜成長技術

本節に、基本計画の研究開発項目(3)のうち、高速・厚膜化に関する内容を記載する。

高速でエピ成長するためには、原料ガス(SiH_4 、 C_3H_8)を多量に供給する必要がある。すると、原料ガスの流量が増大することによって、気相中の主分子である原子状 Si 濃度が増大し、やがて臨界分圧を越えて重合反応を起こし、微細な Si 結晶が形成される。これを均質核生成という。均質核生成が生じると微細な Si 結晶が成長中のエピ膜に降ってきて良質のエピ膜ができなくなるので、均質核生成は抑制する必要がある、そのために投入できる原料ガス量が制限される、すなわち、成長速度の上限が決まってしまう。従って、高速成長を実現するためには、均質核生成を生じさせずに原料ガス流量を増やすことのできる手段を確保しなければならない。そのための技術として二つの方法が知られている。

その一つが塩素を含むガスを添加するあるいは原料ガスとして用いる方法（ハライド法）である。ハライド法では気相中の主分子種は原子状 Si ではなく SiH_xCl_y となる。 SiH_xCl_y は原子状 Si とは異なり SiC のエピ成長の温度域では重合反応を起こしにくいいため、二次元核生成は生じにくくなる。そのため、より多くの原料ガスを投入することができるようになる。この方法は、表 II.2.1.3.2-1 に示したように海外では広く用いられていて、100 $\mu\text{m}/\text{h}$ 以上の高速成長が実現されている。一方、我が国においては例がなく、そのメリット・デメリットを明確化した上で、高速成長法としてその可能性を追求する必要がある。

一方、もうひとつの方法は、成長圧力を小さくして均質核生成を起りにくくし、且つ、なるべく多くの原料ガスを無駄なく基板表面に到達させて高速成長を図るという方法である。この方法を以下ではガスフロー制御法と呼ぶこととする。ガスフロー制御法は国内のいくつかの機関で研究されている。

表 II.2.1.3.2-1 塩素含有ガスによる高速成長（ハライド法）の研究事例

研究機関	Si原料	C原料	添加ガス	成長温度 ($^{\circ}\text{C}$)	オフ角	成長速度 ($\mu\text{m}/\text{h}$)
CNR-IMM (2007)	SiH_4	C_2H_4	HCl	1550-1650	8度	112
CNR-IMM (2008)	SiHCl_3	C_2H_4		1550-1650	8度	102
Naval Res. Lab. (2011)	SiH_2Cl_2	C_3H_8		1650-1750	8度	100
Linkoping Univ. (2011)	SiH_4	C_2H_4	HCl	1525	4度	103

図 II.2.1.3.2-1 は本プロジェクトにおける高速・厚膜成長技術の開発目標（最終目標）とスケジュールである。上述したように、100 $\mu\text{m}/\text{h}$ 以上の成長速度自体は既に実

現されていることなので、本プロジェクトとしては、4インチウエハ上に 100 $\mu\text{m}/\text{h}$ 以上の成長速度で 50 μm 以上の厚いエピ膜を形成し、その残留キャリア濃度、膜厚とドナー濃度の面内均一性および欠陥密度について所定の値を満たすということを目指とした。これらの目標数値は耐圧 3.3kV~6.5kV の高耐圧デバイス用のエピ膜を念頭においたものである。

現在、4インチウエハを搭載でき、かつ高速成長を可能とするエピ成長装置は、新規に導入する必要があるため、平成24年度中にそれを設計・製作して導入し、平成25~26の2年間でそれを活用して上記の目標のための技術を開発することが研究活動の軸となる。そのための準備段階として、平成22~24年度は、ハライド法とガスフロー制御法の両者について既存の設備を用いて基礎的な実験を行い、両者の比較と課題抽出を試みる。ガスフロー制御法の方が先行している関係で、中間目標の項目についてはガスフロー法にて検討し、ハライド法は基礎的な知見収集に注力する。

一方、厚膜成長をすると成長室の壁に厚い堆積 SiC 膜が形成される。これはやがて剥離して成長中のエピ膜上に落下し、いわゆるダウンフォールと呼ばれる欠陥を形成するものとなるので適切に除去する必要がある。そのために、適当なガスを用いてこれらの堆積膜をエッチングしてクリーニングできることが望ましいが、SiC のエピ技術においてはそのようなガス・クリーニング技術は確立されておらず、ほとんど実施されていない。そこで本開発では、新規なガスを用いる成長室（反応炉）内の SiC 堆積膜のクリーニング技術について当該事項の専門家である横浜国立大学（大学院工学府羽深等教授）と共同研究を行い、SiC に対するエッチングレート、内部部材への影響を総合的に検討し、新規なガスによるクリーニング法を確立する。

■ 開発目標

4インチ・ウエハ

- ・成長速度 $\geq 100 \mu\text{m}/\text{h}$
- ・膜厚 $\geq 50 \mu\text{m}$
- ・残留キャリア濃度 $\leq 3 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$
- ・膜厚分布 $\pm 2\%$ 以内，ドナー濃度分布 $\pm 10\%$ 以内
- ・表面欠陥密度 $\leq 1.0 \text{cm}^{-2}$

■ 開発スケジュール

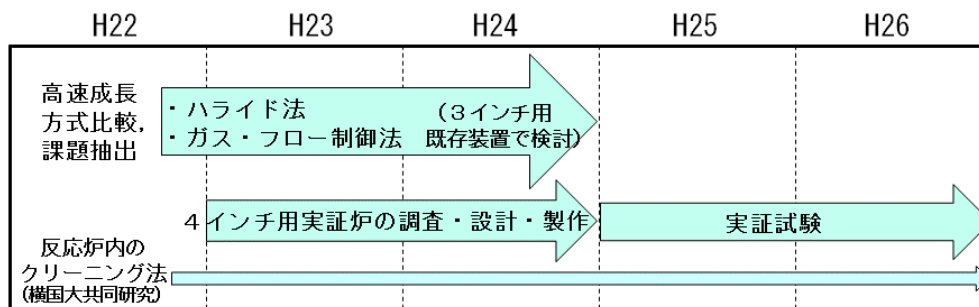


図 II.2.1.3.2-1 高速・厚膜成長技術の開発目標とスケジュール

2.1.4 SiC 高耐圧スイッチングデバイス製造技術

2.1.4.1 新規耐圧構造デバイス

本節に、基本計画の研究開発項目(4) (全年度にわたる事業) のうち、新規耐圧構造デバイスの内容を記載する。

本研究開発項目では、高耐圧 MOSFET においてオン抵抗を極限まで低減するための技術として、プレーナ型 MOSFET、トレンチ型 MOSFET、及びスーパージャンクション(SJ)構造を研究開発テーマに掲げる。それぞれの研究内容、及び研究計画の詳細を以下に説明する。

(1)プレーナ型 MOSFET

高耐圧プレーナ型 MOSFET において、その構造上主な抵抗成分として挙げられるのが、JFET 抵抗、及びチャネル抵抗である。本テーマでは、JFET 抵抗を低減するために、JFET 領域のみの不純物濃度を濃くする CSL 層の導入と、チャネル抵抗を低減するために、C 面の活用を前提とした素子設計とを行った上で、平成 24 年度終了時までに耐圧 3 kV 以上の高耐圧プレーナ型 MOSFET を試作する。高電圧印加時にゲート酸化膜に加わる電界強度の抑制、ゲート酸化膜の信頼性を確保しつつ、平成 26 年度終了時までに耐圧 3.3 kV 以上、特性オン抵抗 $15 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 以下の高耐圧プレーナ型 MOSFET の試作を完了する。

(2)トレンチ型 MOSFET

上述した通り、高耐圧プレーナ型 MOSFET では、その構造上、JFET 抵抗が全体のオン抵抗の中で大きな割合を占める。トレンチ型 MOSFET では、その構造上、JFET 抵抗が存在しないこと、更にはセルピッチの微細化、短チャネル化が比較的容易であるため、プレーナ型 MOSFET と比較して大幅なオン抵抗低減が期待できる。本テーマでは、低オン抵抗とゲート酸化膜中の電界強度抑制を両立出来るダブルトレンチ構造を提案し、トレンチ形成技術、トレンチゲート酸化膜形成技術（高移動度と高信頼性の両立）を確立した上で、平成 24 年度終了時に耐圧 3 kV 以上の高耐圧トレンチ型 MOSFET を試作する。更に、セルピッチの微細化、及び短チャネル化に関わるプロセス技術を高度化し、平成 26 年度終了時までに、耐圧 3.3 kV 以上、特性オン抵抗 $15 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 以下の高耐圧トレンチ型 MOSFET の試作を完了する。

(3)スーパージャンクション(SJ)構造

プレーナ型、トレンチ型、何れの構造においても、通常のドリフト層設計ではドリフト抵抗を低減する術はない。一方、Si ではスーパージャンクション(SJ)構造の採用により Si ユニポーラ限界を既に突破し、その有用性が実証されている。SiC においても SJ 構造の導入は、特に高耐圧領域においてその効果が高いことが期待される。本テ

ーマでは、ダイオードを含むすべてのSiCパワーデバイスに適用可能なSiC-SJ構造によるオン抵抗低減を目指し、トレンチ埋込法、及びマルチエピタキシャル法によるSJ構造形成技術の確立を最終目標とする。平成24年度終了時には、上記手法のいずれかを用いて、通常の600V耐圧設計のドリフト層との比較によりSJ構造の優位性(同耐圧、低オン抵抗)を実証する。更に、同技術を高耐圧領域でも活用可能にするためにプロセス技術を高度化し、平成26年度終了時に3.3kV耐圧設計においてもSJ構造の優位性を実証する。

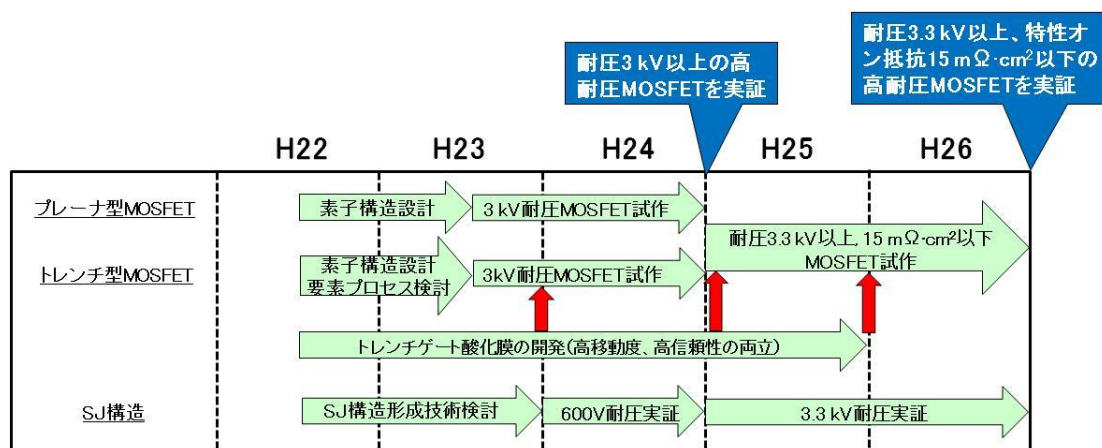


図 II . 2.1.4.1-1 研究開発計画

2.1.4.2 高耐圧大容量デバイス／変換器技術

(SiC 高耐圧大容量パワーモジュール検証を含む)

本節に、基本計画の研究開発項目(4)のうち高耐圧大容量デバイス／変換器技術(全年度にわたる事業)の内容と、同じく研究開発項目(7)(平成23年度に開発推進のためSi-IGBTとSiC-SBDとのハイブリッド変換器実証として実施した事業)の内容を併せて記載する。図2-1-4-2-1に、これらの研究開発項目の開発計画を示す。

SiCパワー半導体デバイスやそれを用いた機器の特性向上と適用範囲の拡大を支えるため、SiCパワー半導体デバイスを用いた電力変換器の効能実証を早期に実現することが緊急の課題であり、本事業においては、低炭素社会創成に向けた鉄道/電力インフラ系パワーエレクトロニクス構築を念頭に置いたSiC高耐圧パワースイッチングデバイス作製技術を開発すること、即ち、SiCパワー半導体の次世代技術として、3kV以上級高耐圧パワーデバイス技術に関する一貫した総合的技術を開発することを目的とする。

SiC高耐圧スイッチングデバイス製造技術開発として、平成22年度から26年度の5年間に3~5kV級の高耐圧かつ低損失なSiCスイッチングデバイスを製造するための新規耐圧構造の設計/作製技術、高耐圧デバイス酸化膜信頼性向上技術、限界性能向上技術、高耐圧デバイス実装技術、高耐圧デバイス評価技術、大容量電力変換器設計技

術の開発を行う。

平成 22 年度は、SiC デバイス (SiCMOSFET、SiC-SBD) の高耐圧化にともなう素子構造 (セル構造、ドリフト層、耐圧終端等) を検討し課題抽出を行なう。また、その結果を元に 3.3kV SiC-SBD を試作する。また、電力変換器開発では高耐圧素子の適用及び大容量化に対する課題抽出を行う。

平成 23 年度は、トレードオフの関係にある 3kV 以上の高耐圧特性と低抵抗特性を両立するために、平成 22 年度に開発した 3.3kV の耐圧終端構造を基に SiC-ショットキーバリアダイオードの終端構造とドリフト層構造の最適化を行い、試作評価することで、大容量の SiC-ショットキーバリアダイオードに向けた基本構造を確立する。

SiCMOSFET については、平成 22 年度に開発した耐圧終端構造を SiCMOSFET 向けに最適化する。セル領域から終端部領域にかけて結晶内部の電界を緩和できる構造とすることで、安定して 3kV 以上の耐圧を有する SiCMOSFET の終端構造を実現する。

SiCMOSFET のセル構造、ドリフト層等の素子構造最適化をシミュレーションを用いて行ない、3kV 以上の高耐圧特性と低抵抗特性を両立する SiCMOSFET の構造設計を行う。また、構造を作製するためのプロセス技術の開発を行い、要素技術検証用小容量デバイスを試作評価する。上述の技術検証のためのデバイス試作評価は、伊丹分室及び福岡出張所にて行う。

平成 24 年度は前年度成果を基に耐圧 3kV 以上の高耐圧 SiCMOSFET を試作すると共に電気特性評価を行いながら最終目標達成に向けて最適化を行う。

電力変換器技術開発では、SiCMOSFET、SiC-SBD を適用した 3kV 以上の基礎評価モジュールを試作して、当該電圧領域のスイッチング試験を行うことでスイッチング損失などの動特性評価を行うとともに MOSFET による高速スイッチング時に発生するサージ電圧などの影響を評価し、低損失電力変換器設計の基礎データを取得する。また、基礎評価モジュール試験を通して MVA 級の大容量化において課題となる多並列接続/駆動方法 (素子特性、駆動法、主回路構造) に関する要素技術を確立する。

以上のように平成 24 年度末までに、高耐圧大容量デバイス設計・試作技術、限界性能向上技術、電力変換器設計技術などの要素技術を開発する。平成 25 年度以降、エピタキシャル膜の成長技術 (高速・厚膜成長技術) の成果を活用して、SiC 高耐圧大容量スイッチングデバイスの製造技術の確立を進めるとともに、大容量電力変換器の試作を行い、大容量・低損失動作の実証を行う。

一方、平成 23 年度の単年度のみに実施する研究開発項目(7)の「SiC 高耐圧大容量パワーモジュール検証」では、事業目的に記載されている技術開発を行うために、3.3kV の耐圧を有する SiC ショットキーバリアダイオードと Si 絶縁ゲートバイポーラトランジスタを組み合わせた 1000A 級の SiC 高耐圧大容量パワーモジュール設計技術を開発する。

上述の 1000A 級のパワーモジュール実現のためには、3.3kVSiC ショットキーバリアダイオードの 3kV 級への高耐圧化、及び大容量化が必要となる。このため、マルチゾーン化などの 1kV 級デバイスとは異なるより高耐圧用の終端構造をベースとして、シミュレーション技術を用いた素子構造・耐圧構造の設計検討及びダイオード試作を行うとともに、試作ダイオードの 3kV 級高電圧領域での電気特性（順方向性特性・耐圧特性・スイッチング特性等）を評価する高耐圧大容量デバイス評価技術の開

発を進めながら、耐圧 3.3kV 定格電流 75A 以上の SiC ショットキーバリアダイオードを実現する。SiC 高耐圧大容量パワーモジュール試作に用いる SiC ショットキーバリアダイオードは、伊丹分室福岡出張所にて作製する。

パワーモジュールについては、上述のダイオードと Si 絶縁ゲートバイポーラトランジスタを多並列接続する定格 1000A 級の SiC 高耐圧大容量パワーモジュールの設計技術開発を行い伊丹分室福岡出張所にて作製する。高耐圧大容量モジュール評価技術の開発では、試作パワーモジュールの 3kV 級高電圧領域での順方向性特性・耐圧特性・スイッチング特性等を評価する。更に、誘導性負荷装置を用いた通電試験によりパワーモジュールとしての動作実証を行い、オール SiC デバイスパワーモジュール実現のための知見を得る。

項目 \ 年度	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度	H26年度
1.電力変換機器技術開発 電力変換器		ハイブリッド モジュール試作 (3.3kVSiC-SBD+IGBT) ▲	フルSiC 基礎評価 モジュール ▲		電力変換器 3.3kV/1200A 損失50%低減 ▲
	→ 耐圧評価	→ SBD動作評価	→ 素子特性評価 → 多並列駆動技術	→ 電力変換器設計	→ 電力変換器 試作動作実証
2.SiCデバイス技術開発 共通技術 SBD MOSFET	→ 耐圧終端構造 → 試作・評価	▲ 3.3kV SBD	▲ 3.3kV MOSFET	▲ 3.3kV MOSFET 抵抗 80mΩ 以下 電流密度 100A/cm ²	
		→ 要素技術検証デバ イス設計/試作/評価	→ 電気特性評価	→ 性能向上	

図 2-1-4-2-1 研究開発項目(4), (7)

高耐圧大容量デバイス/変換器技術 開発スケジュール

2.1.4.3 大口径対応デバイスプロセス装置[助成事業]

平成23年度の単年度の計画で、助成事業として研究開発項目(8)「デバイスプロセス装置開発」を実施する。

SiC デバイス化プロセスにおいては、Si デバイス用の装置の転用では目的を達することができない要素プロセスが存在する。特に、イオン注入工程と、その後の活性化アニール工程では、SiC 特有の高温プロセスが要求されること、基板が透明であることからハンドリング機構に注意が必要なことなど、プロセス装置における開発要素が存在する。そのため、重要である上記の2プロセスに関して、下記の内容で開発を行う。

2.1.4.3.1 大口径対応デバイスプロセス装置(その1)

(イオン注入装置の大口径化検討)

6インチ SiC ウェハに常温から 800°Cまでの広範囲高温注入が可能なイオン注入量産装置を1年以内(2011年度末まで)に開発する。

2.1.4.3.2 大口径対応デバイスプロセス装置(その2)

(活性化熱処理装置の開発)

6インチ SiC ウェハを対象に、処理温度 1800°C以上まで昇降温可能で、良好な温度均一性を有する要素評価機を試作する。さらに評価機にて基本機能確認・総合評価を実施し、装置の性能を実証する。

2.1.5 共通基盤評価技術開発

研究開発項目(1)~(4)の横断的テーマとして、ウエハの欠陥分析を中心とする共通基盤評価技術開発に取り組んでいる。その内容を記述する。

(1) 必要性和課題

SiC ウエハは、研究開発用途としては、有る程度の口径（4 インチ）、量（数十枚程度）、質（マイクロパイプフリー）は確保できるようになってきた。SiC 用の半導体デバイスプロセス技術も進歩を遂げ、設計された電気特性がほぼ具現化されている。しかし、SiC パワーデバイスのコスト/歩留まり/信頼性を担保した本格量産/事業化のためにはまだ不十分で、本「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」においても、「結晶成長技術」「SiC ウエハ加工技術」「SiC エピタキシャル膜成長技術」「SiC 高耐圧スイッチングデバイス製造技術」の研究開発が推進されている。SiC ウエハには未だ 10000 個/cm²程度の欠陥が含まれているのが普通で、大口径化・大量生産すると、更に欠陥密度が増大してしまう傾向が有る。現状の（近い将来供給されるであろう）SiC ウエハ上に形成されているデバイスは、必ず欠陥を含んでいると考えて良い。欠陥低減のための研究開発は進んでいるが、欠陥がゼロの SiC ウエハやデバイスが実現されるまで、事業化を待つことは出来ない。

現在認知されている欠陥としては、格子欠陥（転位、積層欠陥）、表面の凸凹（ステップバンチング、ピット、バンプ、スクラッチ、パーティクル）等が知られている。各々の欠陥と SiC 結晶に含まれる内部歪が、デバイスの電気特性および信頼性にどのような影響を与えるのかを正確に把握することが、SiC デバイスの事業化を円滑に拡張してゆくためには不可欠である。

また SiC ウエハは、ウエハ供給/加工/エピタキシャル膜成長ベンダーによって、更には出荷時期/バッチ/ウエハ毎に、欠陥の構造/密度/表面形状が異なり安定していないため、ウエハ情報を収集/蓄積しアップデートし常に現状を把握してゆくことが重要である。ここで、収集/蓄積されるウエハ/欠陥に関する情報の内容/データ取得方法/データ解析手法に関して、リーダーシップを持って標準化することが出来れば、世界の SiC ウエハ情報をいち早く掌握することが出来、SiC の事業化に関して優位性を持って推進することが可能となる。

(2) 目標と対応策

本プロジェクトの共通基盤評価技術開発においては、(i)ウエハの欠陥から電気特性までを統合して評価する統合評価システムと、(ii)信頼性に影響を与える欠陥の起源・原因を解明する深掘り機能と、(iii)市販およびプロジェクトで開発した SiC ウエハを評価しデータを収集するウエハ管理機能が三位一体となって活動する。これによって、SiC ウエハおよび欠陥を適切に評価するプラットフォームを構築し、データを収集/蓄積し、蓄積されたデータを利用して SiC 事業化を優位性を持って進める、仕組

みを構築することを目標にした。具体的には、評価対象となった SiC ウェハを用いて形成される SiC デバイスの電気特性/信頼性/歩留まりなどが予想出来る、評価プラットフォームを構築し育成してゆく。

SiC ウェハ/エピタキシャル膜の品質/価値を判断するための「SiC 統合評価プラットフォーム」（「観察システム」＋「欠陥構造解析」＋「電気特性解析」により構成：図 II.2.1.5-1）を構築する。「観察システム」は、現実的なスループットでウェハ表面を高解像度に観察し、観察画像を解析し、欠陥の分類と位置を認識する。「欠陥構造解析」において、原子間力顕微鏡（AFM；Atomic Force Microscopy）、透過型電子顕微鏡（TEM；Transmission Electron Microscopy）、走査型電子顕微鏡（SEM；Scanning Electron Microscopy）、X線トポグラフ、フォトルミネッセンス（PL；Photoluminescence）等のツールを用い、認識された各々の欠陥の構造詳細・物理特性が研究解析される。「電気特性解析」では、小さな電極を多数形成し電気特性を計測することにより、それぞれの欠陥の電気特性への影響が明らかとなり、欠陥と電気特性/信頼性の紐付けが統計的に数値把握される。

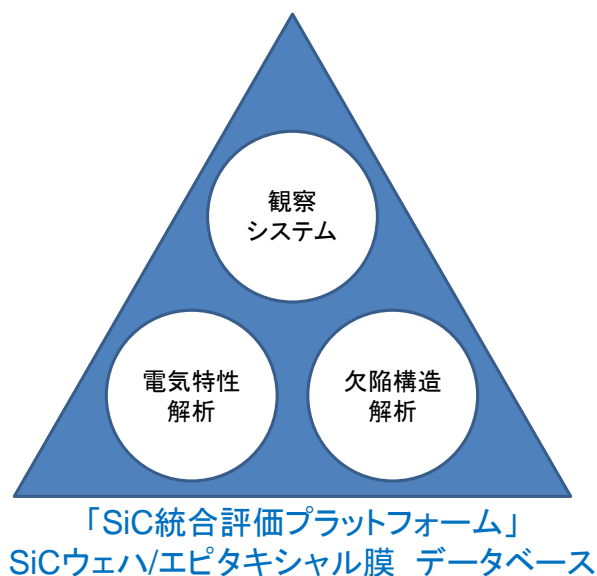


図 II.2.1.5-1 「SiC 統合評価プラットフォーム」の構成

「SiC 統合評価プラットフォーム」により取得されるデータは、ウェハ/エピタキシャル膜および欠陥に関して、ウェハ供給/加工/エピタキシャル膜成長ベンダー、更には出荷時期/バッチ/ロットなど、様々な事例の詳細を明らかにする。このウェハデータを蓄積することにより、SiC ウェハ供給/技術のトレンドを把握することもできるし、欠陥の一般的な構造/電気特性なども明らかになってゆくことが期待される。このためには、蓄積データがフィードバックされ「SiC 統合評価プラットフォーム」自身もブラッシュアップされ常に進歩することが必要である。例えば、「欠陥構造解析」に明ら

かとなる欠陥の詳細構造がフィードバックされ「観察システム」における欠陥分類は見直され、「電気特性解析」により明らかとなった電気特性に影響を及ぼす欠陥をより正確に認識できるように「観察システム」はブラッシュアップされる。

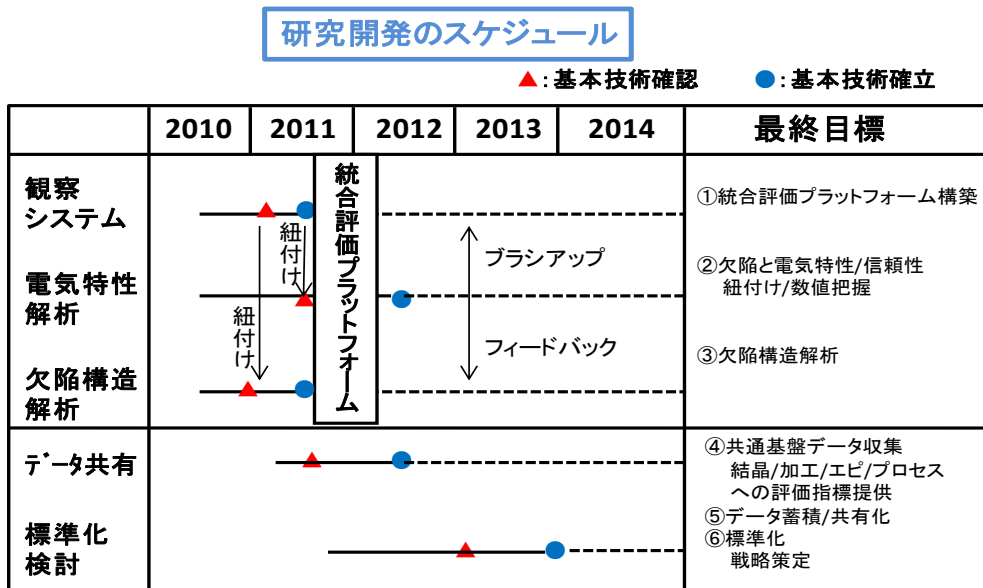
この「SiC 統合評価プラットフォーム」は、本プロジェクトで推進される「結晶成長技術」「SiC ウェハ加工技術」「SiC エピタキシャル膜成長技術」「SiC 高耐圧スイッチングデバイス製造技術」の研究開発に対して、横串を通し共通の評価指標を与える「共通基盤評価技術」としても機能する。これらの連携を想定して、必要となる評価指標の概略を図Ⅱ.2.1.5-2に示す。

プロセス	結晶起因	加工起因	エピ成長起因	プロセス起因
SiC結晶成長	内部歪 格子欠陥			
ウェハ加工 (表面形状)	反り 格子欠陥	反り スクラッチ/潜傷		
エピタキシャル 膜成長 (表面形状)	反り 格子欠陥	反り 段差	パーティクル ステップバンチング エピ欠陥	
デバイス製造	反り 格子欠陥	反り 段差	段差 格子欠陥	段差 格子欠陥

図Ⅱ.2.1.5-2 「共通基盤評価技術」が提示すべき、プロセスの連携のために必要となる評価指標の概略

(3) 取り組み・活動計画

図Ⅱ.2.1.5-3に研究開発計画を示す。



図Ⅱ.2.1.5-3 「共通基盤評価技術開発」の計画

SiC 統合評価プラットフォーム構築

初年度（2010年度）に、上記「共通基盤評価技術」の内容を明らかとし、そのツールとなる「SiC 統合評価プラットフォーム」の基本設計を行い、SiC ウェハ/エピタキシャル成長膜の表面形状に対して高感度で高精細な表面画像が取得でき、画像解析により表面の欠陥の種類と位置座標が認識できる「観察システム」を選定する。2年目の2011年度には、「SiC 統合評価プラットフォーム」を具体的に構築し動作確認する。

「観察システム」＋「欠陥構造解析」＋「電気特性解析」が連携して効率的に動作するように、データのフォーマットも含めて整備する。2012年度以降、「観察システム」＋「欠陥構造解析」＋「電気特性解析」相互にフィードバックをかけ、「SiC 統合評価プラットフォーム」をブラッシュアップしてゆく。

欠陥と電気特性の紐付け

2012年度（3年目）から、構築された「SiC 統合評価プラットフォーム」を用い、「観察システム」＋「電気特性解析」の連携の下、欠陥と電気特性/信頼性の紐付けの統計的な数値データを蓄積する。

欠陥構造解析

「観察システム」で分類、位置同定された欠陥の「欠陥構造解析」を進め、欠陥の構造と物理特性に関するデータを蓄積する。また「電気特性解析」とも連携し、電気特性に影響を与える欠陥の構造と電気特性の物理的意味を考察しデータを蓄積する。この欠陥構造解析においては、フォトルミネッセンス、放射光トポグラフ、AFM、SEM、TEM、電子線誘起電流法（EBIC ; Electron Beam Induced Current）、カソードルミネッセンス法（CL ; Cathode Luminescence）などの高度評価手法を駆使して、信頼性に影響するエピ欠陥の形態や発生メカニズム、特性劣化メカニズムの解明を行う。この中で、物質材料研究機構（半導体材料センター関口隆史博士）との共同実施においては、EBIC、PL、CL を用いて、欠陥のエネルギー準位や捕獲確率を調べることによって欠陥の電子輸送に与える影響を解析し、欠陥とデバイス電気特性との因果関係の解明を進める。

共通基盤データ収集

2012年度（3年目）から、構築された「観察システム」を用いた、プロセス前後での表面形状の変化のトレース（例えば：エピタキシャル膜に含まれる格子欠陥とウェハ表面の欠陥・凸凹の関係、ウェハ表面のスクラッチ/潜傷とエピタキシャル膜表面のステップバンチングの関係等）のデータを収集/蓄積する。また、潜傷等プロセス連携のために必要となる評価指標と評価方法も考案し、データ収集し「結晶成長技術」「SiC ウェハ加工技術」「SiC エピタキシャル膜成長技術」「SiC 高耐圧スイッチングデバイス製造技術」の研究開発に対して、横串を通し共通の評価指標を与える「共通基盤評価技術」を提供する。

データ蓄積/共有化

蓄積されたウエハ/エピタキシャル膜の情報は、2012年度（3年目）から、本「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」内、更には SiC 関連の他の国家プロジェクト内で共有化できるように、「SiC ウエハ情報共有委員会」を設置し運営する。

標準化

また、SiC ウエハ/エピタキシャル膜評価技術の標準化を世界に先駆けての提案を検討する。日本における SiC 関連産業が活性化する戦略とリンクした、標準化戦略を起案し、世界に先駆けた働きかけを行ってゆく。

2.1.6 応用技術調査検討

研究開発項目(1)~(4)の横断的テーマとして、出口戦略の策定を目的とする応用技術調査検討に取り組んでいる。その内容を記述する。

(1) 狙い

次世代パワー半導体 SiC の出口として実用化が期待されるアプリケーション領域の明確化や国内外の関連情報の収集/調査、ロードマップの提示、SiC 関連仕様の標準化等の応用技術調査検討、並びにインバータ試作などによる実証実験を行い、実用化に向けた活動を牽引する。

(2) 必要性和課題

発電から消費まで電力フローの中で、電力変換器/制御技術の占める割合は大きく、SiC パワー半導体の導入による既存電力変換器の高効率化や、産業用モータ等でパワー半導体が未活用である分野の省エネ化に対する期待が高い。更に、地球温暖化への対応が重視される中、太陽光発電・風力発電・地熱発電等の再生可能エネルギー分野、及び EV・鉄道等の交通産業分野への SiC パワー半導体導入の期待が高い。また、SiC 関連技術は、我が国の国際産業競争力及びエネルギー政策にとって極めて重要である。

このような背景のもと、高品質 SiC ウェハの安定供給技術、高耐圧・高信頼なデバイスの製造技術を確立することによって、省エネ化、温室効果ガスの削減及び環境産業の強化を図り、グリーン・イノベーションを推進できることは、広く認識されているものの、それだけでは、実用化を加速するには至っていない。実用化のターゲットを明確にし、そのアプリケーションに必要な仕様のデバイスを早期に供給するために必要な開発を優先して推進する必要がある。世界の技術の進化を調査し、本プロジェクトの到達点のベンチマークを実施するとともに、具体的なニーズの存在する仕様にマッチした開発が行われているかを常に評価しながら進めることは重要な課題である。

(3) 対応策と目標

これらの課題を解決するために、分野別に市場規模・仕様に関する国内外の情報収集及びアンケート・ヒアリング等の調査を行い、実用化が期待されるアプリケーション分野を明確化し、適用分野別に、産業貢献度（市場規模）ロードマップと適用分野別要求仕様、及び温室効果ガスの削減量をまとめる。

特に、次世代パワー半導体 SiC の出口として最も期待される用途は、EV、HEV などの環境対応車への適用であることから、SiC の自動車への普及を目指したロードマップの提示、車両用 SiC モジュールの目標性能の明確化、車両用 SiC 仕様の標準化、

並びに自動車用インバータ試作などによる実証実験を行う。

(4) 取り組み・活動計画

応用技術調査検討では、技術調査WGと出口戦略WGの2つのワーキンググループ(WG)を設け、相互に連携して調査・検討を行う。

技術調査WGでは、“SiCの開発がいつの時点でどのレベルまで進むかの見極め”を行う。このため、学会調査・ヒアリング等による世の中の開発動向・レベルの把握と、プロジェクトの目標に対する進捗の把握に基づき、技術のベンチマークを実施する。出口戦略と連携することで、技術の進展度合いをしっかりと見極めながら、出口戦略の立案に反映させる。

出口戦略WGでは、市場調査からニーズを明確にして、研究開発の方向性を示す。どこに大きな市場があり、そこではどんな仕様のデバイスが必要であるかを示す。その情報から、どういう研究をやる必要があり、逆にこだわらなくてもいい項目は何かを明確にする。次に、SiC普及の効果を定量的に予測する。最後に、実証実験によって、SiCのメリットを判りやすく見せる。この為、オールSiCカーを作ってデモンストラレーションすることに対応する。

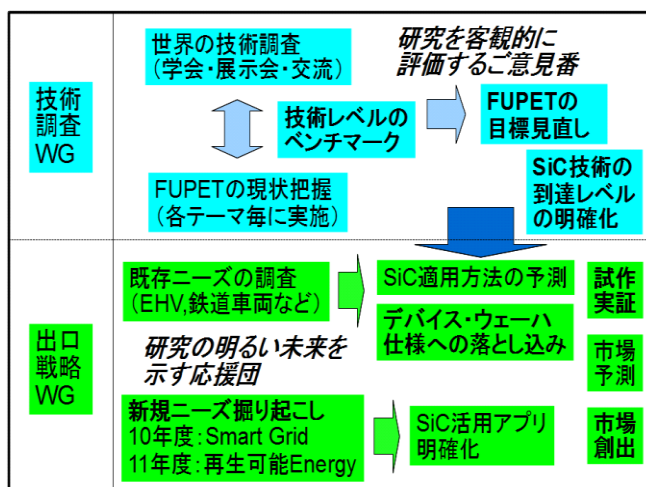


図 II.2.1.6-1 応用技術調査検討の活動の流れ

2.2 研究開発の実施体制

本プロジェクトにおいては、研究開発項目(1)・(2)・(3)・(4)に関しては経済産業省が、研究開発項目(5)・(6)・(7)・(8)は NEDO が、それぞれ市場調査等と有識者の意見聴取などを反映して基本計画を策定した。

(1)・(2)・(3)・(4)は平成 22 年度から平成 26 年度の 5 年間を想定して、外部有識者による採択審査を経て、実施者を決定した。採択された機関は技術研究組合 次世代パワーエレクトロニクス研究開発機構（以下、FUPET）である。

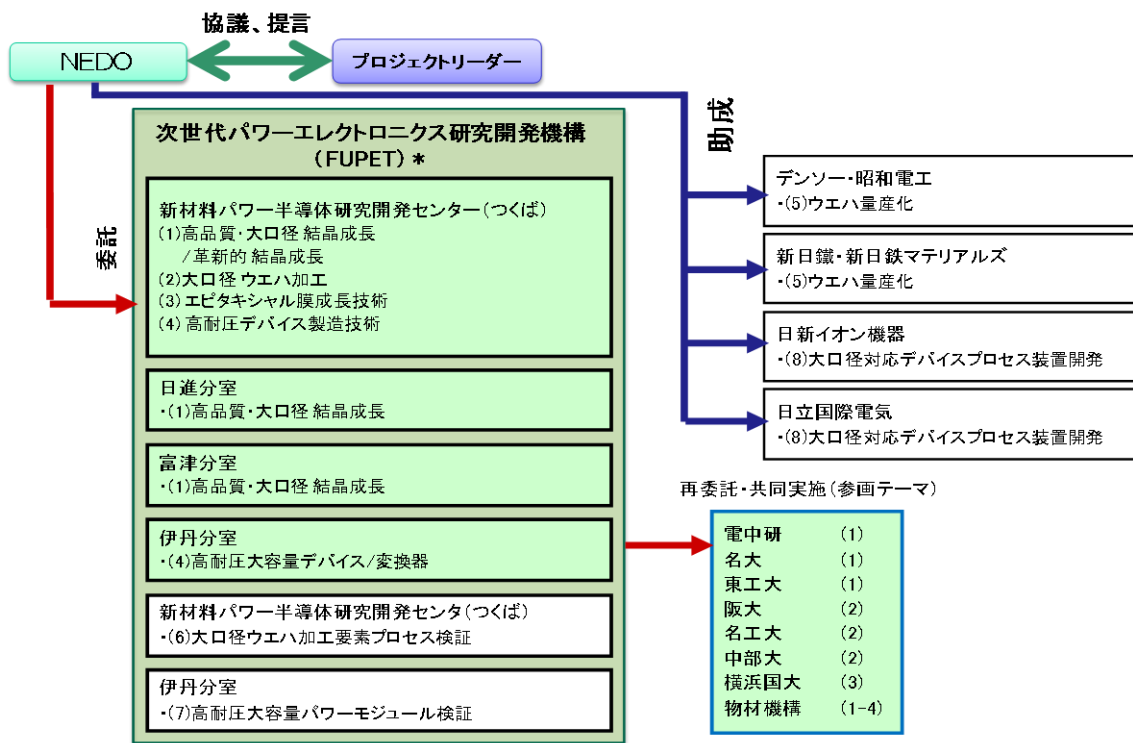
(5)・(6)・(7)・(8)は平成 23 年度単年度に実施する事業であり、うち(6)・(7)は FUPET が実施する(2)・(4)の加速としての位置付けから委託事業として行い、(5)・(8)に関しては助成事業として公募によって採択審査を経て実施者を決定した。

研究開発項目(5)に関しては、審査の結果、FUPET 日進分室として活動を行っているデンソー(株)・昭和電工(株)と、FUPET 富津分室として活動を行っている新日鐵(株)・新日鉄マテリアルズ(株)が助成先となった。研究開発項目(8)に関しては、イオン注入装置開発に関して日新イオン機器(株)が、活性化アニール装置開発に関して日立国際電気(株)が助成先となった。

研究開発項目(1)・(2)・(3)・(4) は、平成 23 年度より NEDO 事業としてマネジメントを経産省から NEDO に移行している。一方、研究開発項目(5)・(6)・(7)・(8)は当初より NEDO がマネジメントを担当している。本章冒頭で触れた、図 II-2.1.1 本研究開発の計画全体図を参照されたい。

図 II.2.2.1 に、NEDO に移管された直後である平成 23 年度の実施者フォーメーションを示す。これは、平成 22 年プロジェクト発足時の研究開発項目(1)・(2)・(3)・(4)の実施体制に、平成 23 年度のみ実施した委託事業(6)・(7)および助成事業 (5)・(8)を加えたものになっている。

本プロジェクトの管理・運営に関しては、技術的な指導・適切な予算の執行・効率化を意識した研究開発項目の組み換え等に指導力の発揮を期待し、プロジェクトリーダーを設置した。プロジェクトリーダーは、独立行政法人産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクス研究センター長 奥村 元氏に委嘱した。



図Ⅱ.2.2-1 平成23年度のプロジェクトの実施者フォーメーション

研究開発項目(1)・(2)・(3)・(4)（平成23年度は(6)・(7)も）を実施する研究委託先 FUPET は、新材料パワー半導体研究開発センター（センター長：デンソー）（以下、センター）を独立行政法人産業技術総合研究所（産総研）つくばセンター内に設け、産総研つくばセンターの施設・設備も活用しながら研究開発を行うこととした。また、学会等活動等を通じた国内外の技術動向調査、及び実用化・標準化等の検討を行うために、FUPET 本部内に応用技術調査委員会を設置した。

FUPET の組合に加盟して事業を担う企業・機関は次の通りである。

- 三菱電機株式会社
- 富士電機ホールディングス株式会社
- 株式会社 日立製作所
- 株式会社 東芝
- 昭和電工株式会社
- 日産自動車株式会社
- 新日本製鐵株式会社
- 株式会社 デンソー
- トヨタ自動車株式会社
- 株式会社 豊田中央研究所

日立化成工業株式会社
株式会社 タカトリ
株式会社 東京カソード研究所
株式会社 フジミインコーポレーテッド
旭ダイヤモンド工業株式会社
パナソニック株式会社
ローム株式会社
株式会社 東レリサーチセンター
株式会社 本田技術研究所
株式会社 明電舎
豊田通商株式会社
学校法人 関西学院
独立行政法人 産業技術総合研究所

センター内に設置した研究グループ、及び分室は次の通りである。

結晶成長研究グループ（グループリーダー：日立化成）
日新分室（デンソー基礎研究所内：分室長：デンソー）
富津分室（新日鐵先端技術研究所内：分室長：新日鐵）（平成 23 年度まで）
加工研究グループ（グループリーダー：産総研）
エピタキシャル成長研究グループ（グループリーダー：日立）
デバイス研究グループ（グループリーダー：産総研）
伊丹分室（三菱先端総合研究所内：分室長：三菱）
評価グループ（グループリーダー：パナソニック）

評価グループでは参画企業間・各テーマ間の連携の意義が大きい分析・評価に関して「共通基盤評価技術開発」を実施する。

各研究グループは、下記の再委託／共同実施先とも緊密な連携のもと、一体での研究開発を行う。

・再委託／共同実施先

財団法人 電力中央研究所（日新分室）
国立大学法人 名古屋大学（結晶成長研究グループ）
国立大学法人 東京工業大学（結晶成長研究グループ）
国立大学法人 大阪大学（加工研究グループ）
国立大学法人 名古屋工業大学（加工研究グループ）
学校法人 中部大学（加工研究グループ）
国立大学法人 横浜国立大学（エピタキシャル成長研究グループ）
独立行政法人 物質・材料研究機構（評価グループ）

応用技術調査委員会の構成は次の通りである。

委員長（プロジェクトリーダーの兼務）

技術調査WG（WGリーダー：センター長の兼務）

出口戦略WG（WGリーダー：トヨタ）

FUPET 内の運営にあたっては、NEDO からの委託契約をベースに、研究体としての運営規程、知的財産取扱規程を制定して、それらに則った運営を行うこととした。この両規程は、過去の関連プロジェクトにおいて長年培われてきた知見／実績を元に本プロジェクトに合うように再設定されたものである。プロジェクト全体のマネージング組織としてはプロジェクトリーダーのもとに、センター長、分室長、WGリーダー、主要参画企業の本プロジェクト責任者、及び FUPET 本部担当者等からなる「推進連絡会議」を設けている。1回／月程度の頻度で開催し、技術開発の進捗確認、予算／人員や成果に関する情報共有と研究遂行方針に関する議論を行っている。これは、実用化シナリオに基づき、参画企業での事業戦略とリンクする機能を有する。知財関連のトラブル解決のためには、プロジェクトリーダーのもとに、「知財審査会」を設け、案件ごとに知的財産取扱規程に基づいて処理することとしている。

また、プロジェクト内に、技術開発進捗についての情報共有、関連技術の動向、将来展開等を議論する「技術委員会」（プロジェクトリーダー、全参画機関の技術マネージャー、及び、センター長、グループリーダー、WGリーダーで構成）を設け、半期に1度開催している。実施体制の構築にあたっては、産学官の英知を結集し、異業種の連携を推進する意味から、産総研つくばセンターを中心とした集中研方式を軸とする体制を採用した。一方、事業化が近く、成果の早期事業化に向けて企業の資産を有効に活用できる場合には、企業の個別サイトを集中研の分室と位置付けて活用することとした。

2.3 研究開発の運営管理

NEDO は、研究開発全体の管理・執行に責任を有する。経済産業省および実施者と密接な関係を維持し、プログラムの目的及び目標、並びに本研究開発の目的および目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、年2回開催する NEDO 定期ヒアリングほか、随時のコミュニケーションを通して運営管理に NEDO の意思を反映させる。

2.4 研究開発成果の実用化、事業化に向けたマネジメントの妥当性

NEDO においては、前節のように随時ヒアリングを通じて進捗状況を把握しているが、その中で、特に事業化に向けて情勢との関係に注意している。また国内外の技術

開発動向を常にウォッチすることにより、適時・適切なベンチマークに努めている。進捗状況によって事業化が可能と判断できるものに関しては早期に開発を参加企業の自主開発に切り替えを推進している。一方、知的財産権の取得についても奨励しているが、開発項目の性質上特許化するよりも戦略的に不出願にしてノウハウを守ることが好ましいものについては適切に判断すべきと考えている。

	平成22年度	平成23年度	平成24年度	平成25年度	26年度	27年度
予算規模・体制	(1)結晶成長技術	大口径結晶の高品質・高速成長技術開発				
	(5)量産化基盤	(1)-2(昇華法の一部) 富津分室→新日鐵 共同研究(1/2)				
	(2)ウエハ加工技術	高速・低損傷加工・超平坦化技術開発				
	(6)加工要素検証					
	(3)エピ成長技術	大口径化・厚膜高速成長技術開発				
	(4)高耐圧デバイス技術	高耐圧デバイス・オールSiCモジュール化				
	(7)モジュール検証					
	(8)プロセス装置開発					
	METI直執行		NEDO事業			
ヒアリング	NEDO委員会・ 採択委員会(1~4)	採択委員会(5~8)	NEDOヒアリング 分室企業ヒアリング NEDOヒアリング (技術推進委員会)	NEDOヒアリング 中間評価 NEDOヒアリング	NEDOヒアリング NEDOヒアリング (技術推進委員会)	NEDOヒアリング 事後評価(予定)

図Ⅱ-2.3-1 プロジェクト運営にあたり開催しているヒアリング

3. 情勢変化への対応

NEDO は、予算の適正・効果的運用を意識した運営に努めている。本プロジェクトに関しては、平成23年度における研究開発項目(5)~(8)の追加もその一環である。一方で、事業化に近づいたと判断される場合は、委託事業から助成事業ないし共同研究事業に移行するなどの実施体制の組み替えを行っている。

本研究開発の発足から現在に至る体制の変化を図Ⅱ.3-1に示す。平成24年からは、FUPET 富津分室として実施してきた研究開発項目(1)高品質・大口径 結晶成長の一部が、早期に結果を達成しつつあることから、事業化が近づいたとして、NEDO との直接契約のもと、NEDO 負担率 1/2 の共同研究として実施している。

また、平成24年度より、新たな実施項目「高耐熱部材統合モジュール化技術開発」を実施することとした。本項目は中間評価での評価対象とはしないが、プロジェクト運営上の参考として記載しておく。SiC パワーエレクトロニクスの特長の一つは、Si デバイスでは達成できない 200℃以上の高温で動作可能な点にあり、これを生かすと大容量化と小型化の両立が可能となる。このため新たな製品分野の創成への寄与が高いものと予想されていた。しかしながら、SiC パワー半導体デバイスと同時に用い

る高耐熱キャパシタ、インダクタ、スナバ抵抗などの受動部品、デバイスを実装するための高耐熱基板の開発は、NEDO プロジェクトとしては実施されていなかった。これらの部品、材料を、ものをそのため、平成 24 年度に新たに公募を実施して、平成 24 年度から 26 年度までの 3 年間の計画で、本プロジェクトの研究開発項目(9)として実施することとした。

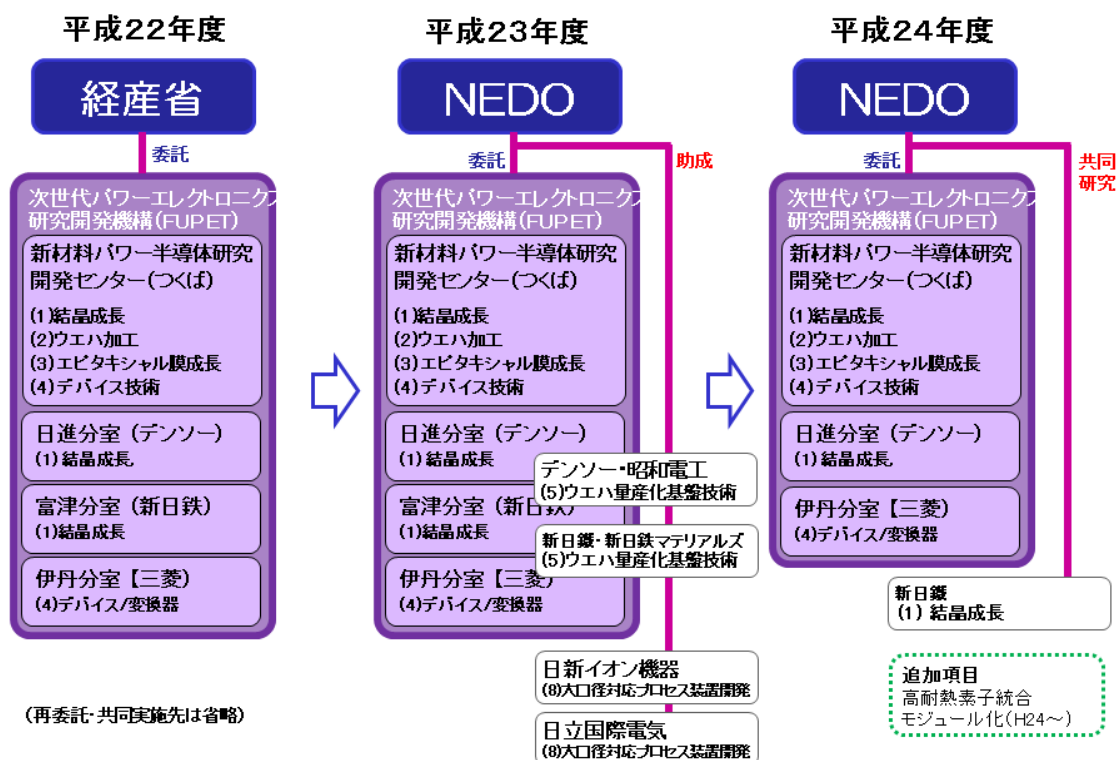


図 II.3-1 プロジェクトの実施者フォーメーションの変遷

本プロジェクトは、平成 21 年度から 24 年度までの予定で、本プロジェクトに 1 年先行して実施中であった NEDO プロジェクト「次世代パワーエレクトロニクス技術開発（グリーン I T プロジェクト）」と内容が密接に関連する。SiC パワー半導体が関係するプロジェクトのマネージメント上、全体像を常に意識しながら行うことが、費用対効果等の成果向上の面で効率的であることから、平成 23 年度からその基本計画を本プロジェクトと一体化し、「低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクス」プロジェクトとして実施することとした。

4. 中間評価結果への対応

本プロジェクトは平成 24 年度に中間評価を予定しており、その結果を適切に反映す

る。

5. 評価に関する事項

NEDO は、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義ならびに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成 24 年度、事後評価を平成 27 年度に実施する。また、中間評価の結果を踏まえて必要に応じプロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

Ⅲ. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

平成24年度までの中間目標と、目標に対する成果、目標の達成度を表Ⅲ.1-1 に示す。

表Ⅲ.1-1 全体成果のまとめ

目 標	研究開発成果	達成度
結晶成長技術		
(1)高品質・大口徑 SiC 結晶成長技術開発/革新的 SiC 結晶成長技術開発 (1)-1 高品質・大口徑 SiC 結晶成長技術開発 (1)-1-1 口径6インチで 10^3 個/cm ² 台の転位密度を実現するのに必要な高品質化にかかわる基盤技術確立	(1)-1-1 ①RAF シードの口径6インチ化に対し、ブロック内の応力集中抑制が課題であることを見出し、低応力成長技術により克服した。更に、RAF シードを用いたc面成長により口径6インチ結晶成長を実現し、転位密度 $2\sim 3 \times 10^3$ 個/cm ² 、螺旋転位密度 300~600 個/cm ² を確認した。 ② RAF 法繰り返し回数増による高品質 c面成長を口径1インチで実施し、繰り返し7回で転位密度 20 個/cm ² 、螺旋転位密度 1.3 個/cm ² を実証。	達成
(1)-1-2 口径6インチで0.5mm/h以上の結晶を実現するのに必要な成長速度向上にかかわる基盤技術確立	(1)-1-2 成長速度 0.56mm/h を確認。量産化製造技術に繋がる再現性および安定性について確認し、平成24年度末までに達成予定。	達成見込み(平成25年3月)
(1)-2 革新的 SiC 結晶成長技術開発 高速性、高品質性、長尺化/口径拡大等の各課題に対する要素技術を確立し、口径2インチ、厚さ1mmの4H-SiC単結晶の成長を実現	(1)-2-1 (ガス法) 高速性、高品質性、長尺化/口径拡大等の各課題に対する要素技術を確立し、口径2インチ、厚さ15mmの4H-SiC単結晶の成長を実現。 (1)-2-2 (溶液法) 新規な高温高压炉を立上げ、過飽和度と成長温度を最適に制御する高速成長技術、および貫通転位を基底面内の欠陥に変換して成長結晶中の転位を大幅に低減する高品質化技術、および大口徑化のための炭素濃度分布のシミュレーションモデルの作成を行い、要素技術を確立した。 種結晶として、2インチの円盤状結晶、溶媒には純Si(純度99.99999%)を用い、上記要素技術を反映した最適条件で成長を行い、成長結晶厚3.4mmの4H-SiC単結晶成長を実現。成長速度はおよそ500μm/h程度で昇華法と同等もしくはそれ以上を達成。最終目標である20mmを越える長尺成長の実現に向け、結晶性詳細評価を行い課	達成

	題抽出を今年度中に完了する。	
<p>(5)SiCウエハ量産化技術開発 (平成 24 年 2 月迄) 大口径 4H-SiC ウエハの量産化技術開発可能な環境整備（昇華法結晶成長炉、ウエハ加工装置）を行い</p> <p>(5)-1 有効面積(端部 3mm を除く)全域において転位密度 1×10^4 個/cm² 以下の口径 6 インチ 4H-SiC インゴットを実現する基盤技術の確立</p>	<p>(5)-1 RAF シードの口径 6 インチ化に対し、ブロック内の応力集中抑制が課題であることを見出し、低応力成長技術により課題を克服。RAF シードを用いた c 面成長により口径 6 インチ結晶成長を実現し、転位密度 6.8×10^3 個/cm²を確認（面内 3 点評価により、全面での転位密度 1×10^4 個/cm²以下を確認）。</p>	達成
<p>(5)-2 成長速度 0.25mm/h 以上で転位密度 5×10^4 個/cm² 以下の口径 6 インチ 4H-SiC インゴットを実現する基盤技術の確立</p>	<p>(5)-2 口径 6 インチ 4H-SiC インゴット成長において成長速度 0.25mm/h 以上、転位密度 5×10^4 個/cm²以下を確認。</p>	達成
加工技術		
<p>(2)大口径 SiC ウエハ加工技術開発</p> <p>①ウエハ切断技術に関して、3 インチ結晶で切断速度 150μm/分以上、同時切断枚数 10 枚以上、切り代 300μm 以下を実現</p> <p>②3~4 インチ結晶/ウエハを対象に、切断、研削、粗研磨、仕上げ研磨の各要素工程の最適化、および接続最適化を行い、6 インチ SiC 結晶/ウエハ加工の高速・高品質な一貫プロセス最適化の方針を決定</p>	<p>①ウエハ切断技術（ダイヤモンドマルチワイヤソー、マルチ放電切断）において 3 インチ結晶で以下を達成。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・切断速度：150μm/分以上 ・同時切断枚数：~10 枚 ・切り代：300μm 以下 <p>②各ウエハ加工要素プロセスのベンチマーク実験の結果に基づき、3 インチ結晶による一貫プロセス実験を実施。その検証データを基に、接続工程間の品質と速度を最適化するシステム工学的アプローチの有用性を示した。この成果を生かし大口径 6 インチ対応を進める。</p>	達成見込み(平成 25 年 3 月)
<p>(6)大口径 SiC ウエハ加工要素プロセス検証 (平成 24 年 2 月迄)</p> <p>①ダイヤモンドを用いたマルチワイヤソーにおいて SiC6 インチインゴットに対して 150μm/min 以上の高速切断が可能になる最大ワイヤ速度：約 4,000m/min、最大張力：70N の高速高剛性切断技術の実現</p> <p>②切断、研削、荒研磨、仕上げ研磨の各工程に関し個々の要素工程の能力限界と最適加工条件を抽出し、SiC ウエハ加工における高速一貫プロセス確立に資する総合的なデータを蓄積</p>	<p>①最大ワイヤ速度：約 4,000m/min、最大張力：70N を実施可能なダイヤモンドマルチワイヤソーを開発。3~4 インチ SiC 結晶の高速切断（切断速度 150μm/分以上@3 インチ）実験を実施し、装置性能を検証。</p> <p>②切断、研削、粗研磨、仕上げ研磨の各要素工程におけるベンチマーク実験を基に、高速化、低ダメージ化、平坦化を指標とした加工性能の最適化を実施。</p>	いずれも達成

エピタキシャル膜成長技術		
<p>(3)SiC エピタキシャル膜成長技術</p> <p>(3)-1 大口径対応技術</p> <p>みなし6インチ径のエピタキシャル膜成長を行い、6インチ成長プロセスにおける問題点を把握するとともに、当該成長膜で以下の品質を実現</p> <ul style="list-style-type: none"> ・均一度：厚さ±10%、ドーピング濃度±20% ・エピ成長起因の表面欠陥密度：2個/cm²以下 	<p>①みなし6インチ 4°オフ Si 面において 厚さ均一性：±0.85%、 ドーピング濃度均一性：±7.6% 表面欠陥密度：1.2個/cm²</p> <p>②みなし6インチ 4°オフ C 面において 厚さ均一性：±0.9%、 ドーピング濃度均一性：±19.2%</p> <p><前倒しで実施></p> <p>③6インチウエハ 4°オフ Si 面において 厚さ均一性：±1.95%、 ドーピング濃度均一性：±13.5%</p>	<p>①達成</p> <p>②達成見込み(平成24年12月)</p> <p>③前倒しで実施して、均一度について達成(欠陥密度については基板品質の影響が多いため不問)</p>
<p>(3)-2 高速・厚膜成長技術</p> <p>(口径2インチ、膜厚50μm以上の膜)</p> <p>①残留キャリア濃度：3×10¹⁴/cm³以下</p> <p>②エピ成長起因の表面欠陥密度：5個/cm²以下</p>	<p>①3インチ、膜厚50μm以上の膜において、残留キャリア濃度3×10¹⁴cm⁻³以下を実現。</p> <p>②3インチ、膜厚50μm以上の膜において、表面欠陥密度は7.5個/cm²まで到達。</p>	<p>①達成</p> <p>②達成見込み(平成24年10月)</p>
デバイス／変換器技術、機器技術		
<p>(4) SiC 高耐圧スイッチングデバイス製造技術</p> <p>(4)-1 新規耐圧構造デバイス</p> <p>より低損失化が可能な新規高耐圧デバイス構造とその作製要素プロセスを開発し、耐圧3kV以上の高耐圧SiC-MOSFETを実現</p>	<p>高チャネル移動度と高信頼性を兼ね備えたゲート酸化膜形成技術、CSL層導入と目標耐圧を両立するための終端構造設計、ゲート酸化膜への電界集中を緩和するためのトレンチ形成技術、SJ構造形成技術等の要素プロセス技術を開発した。これにより、プレーナ型MOSFETにおいて、耐圧2,640V、特性オン抵抗15.5mΩcm²を達成。終端構造の不具合で、現段階では中間目標を達成していないが、修正点が明確になっており、それを反映したロットを試作中であり、平成24年度中には達成見込み。</p>	<p>達成見込み(平成24年12月)</p>
<p>(4)-2 高耐圧大容量デバイス／変換器技術</p> <p>耐圧3kV以上の高耐圧SiC-MOSFETの実現とSiC-MOSFET、SiC-SBDを適用した3kV以上の電力変換器モジュール試作して当該電圧領域のスイッチング及び多並列接続に関する要素技術を確立</p>	<p>①SiCMOSFETのセル構造、ドリフト層等の素子構造最適化を行ない、高耐圧特性と低抵抗特性を両立するSiCMOSFETの構造設計を行い小容量デバイスを試作評価。</p> <p>②アバランシェ電圧として4kV程度を持つことを実証。</p> <p>③順方向特性に関しても最終目標を実現するに十分なオン特性を有することを検証。</p>	<p>達成見込み(平成25年3月)</p>
<p>(7)SiC 高耐圧大容量パワーモジュール検証(平成24年2月迄)</p> <p>耐圧3.3kV定格電流75AのSiC-SBDを開発し、Si-IGBTと組み合わせて1,000A級大容量パワーモジュールを試作・実証するとともに、All SiC デバイスパワーモジュール実現に必要とされるSiCFETの仕様に関する技術的指針の獲得</p>	<p>耐圧3.3kV 定格電流75AのSiCショットキーバリアダイオード</p> <p>①SBDの大面积化により150A以上の電流領域において良好な電流電圧特性を持つことを実証。</p> <p>②SW試験を行いリカバリーのないSW特性を有することを検証。</p>	<p>達成</p>

	1000A 級大容量パワーモジュール ①Si-IGBT とを組み合わせ1000A 級のハイブリッド型の大容量パワーモジュールを試作し 2000A のスイッチングを実証。 ②1 相のフルブリッジ回路を構成し連続通電試験を実施。	
(8)大口径対応デバイスプロセス装置開発 (平成 24 年 2 月迄) 6 インチ SiC ウェハを対象に、イオン注入、活性化熱処理、高温酸化等のデバイス化のための高温プロセス装置、あるいは透明ウェハ対応露光装置を開発し所定の処理特性の面内均一性を達成 <イオン注入装置> ・低温から 800℃までの全領域でのイオン注入 ・温度均一性：6 インチ面内：±15℃ ・Al 注入イオン電流：200μA 上	<イオン注入装置> ・常温から 800℃の全領域での自動イオン注入システムを開発。 ・静電チャックを改善し、500℃で ΔT=±14℃を達成。 ・イオンビームパラメータの最適化で Al ビーム電流 1500uA を達成。	達成 Al イオンビーム電流量は目標を大幅に越えて達成。
<活性化熱処理装置> ・熱処理温度：1,800℃以上 ・温度均一性：6 インチ面内：±30℃ ・一度に 25 枚以上処理可能なこと	・装置最高熱処理温度 2,000℃ ・6 インチ面間温度差 <±30℃達成 (±10℃をプロセス評価にて確認中) ・一括処理枚数 50 枚	達成 面内温度均一性は大幅に目標を越える見込み。
<高温酸化装置> ・1,200℃以上の高温でパイロジェニック酸化、および H ₂ 、NH ₃ 、N ₂ O ガス処理が可能なこと ・温度均一性：6 インチ面内：±15℃ ・一度に 25 枚以上処理可能なこと ・1,100℃で処理した Si ゲート絶縁膜に含まれる金属不純物が 1×10 ¹¹ cm ⁻² 未満	(未実施)	(未実施)
<露光装置> ・6 インチ 4H-SiC ウェハに対する重ね合わせ精度：中心点および4 隅においてばらつき (標準偏差の 3 倍以内) が 65nm 以下 ・解像度 (市販レジストを用いた標準プロセス) に関して、350nm のライン&スペースパターンを転写できること	(未実施)	(未実施)
共通基盤評価技術		
(A) 共通基盤評価技術(自主目標) SiC ベアウェハから MOS キャパシタまでの各種評価データを統合した SiC 統合評価プラットフォームを具体的に構築しその動作を確認する。	コンフォーカル微分干渉光学系を用いたウェハ表面検査手法を中心として「SiC ウェハ統合評価プラットフォーム」の構築を完了。これを活用した各種評価データの取得/蓄積/共有化の仕組みを構築中。ウェハ欠陥と電気特性の紐付けの手法を確立。	達成

注：項番は、基本計画の研究開発項目番号

2. 研究開発項目毎の成果

2.1 高品質・大口徑 SiC 結晶成長技術開発／革新的 SiC 結晶成長技術開発

2.1.1 高品質・大口徑 SiC 結晶成長技術開発

2.1.1.1 高品質・大口徑 SiC 結晶成長技術開発(その1)

(SiC ウエハ量産化技術開発[助成事業／研究開発項目(5)]を含む)

(1) 開発の成果

口径 6 インチで、転位密度 1×10^3 個/cm² 以下の高品質 SiC ウエハの早期実現を目指して、高品質化の差別化技術として RAF (Repeated a-face growth) 法を用いた昇華法による結晶成長技術の開発を推進している。中間目標である「口径 6 インチで、 10^3 個/cm² 台の転位密度を実現するのに必要な高品質化にかかわる基盤技術を確立する」に対し、これまでに、要素技術である RAF 法による大口徑種結晶成長技術、及びそれを用いたインゴット成長技術の開発を実施し、以下の成果を得た。

日進分室に 6 インチ結晶成長及び長尺用の成長炉を導入し、それに関わる実験室整備を完了した。RAF 法による大口徑種結晶成長技術においては、固有の課題として、種結晶インゴット成長時の応力集中抑制が不可欠であることを見出した。その上で、新たに考案した低 ΔT 成長 (インゴット結晶内の温度分布を小さくした成長) により低応力成長を実証し、口径 6 インチウエハの形成に成功した (図 III.2.1.1.1-9)。形成した口径 6 インチウエハの品質評価から、転位密度 $2 \sim 3 \times 10^3$ 個/cm² (螺旋転位密度 : $300 \sim 600$ 個/cm²) を確認しており、上記の中間目標を達成した。



図 III. 2.1.1.1-9 口径 6 インチウエハ外観

また、RAF 法の a 面成長の繰返し回数を増加させることで、1 インチサイズの試料で、**転位密度 20 個/cm² (螺旋転位密度 1.3 個/cm²)** まで低減できることを実証した (図 III.2.1.1.1-9)。これは a 面成長の繰返し回数を増やすことにより、作製した RAF 種結晶内の積層欠陥または基底面転位の c 軸方向の歪が減少し、その種結晶上に c 面成長した時に、積層欠陥や基底面転位が螺旋転位に変換されず結晶外へ吐き出されたため、更なる高品質化の可能性を実証した。

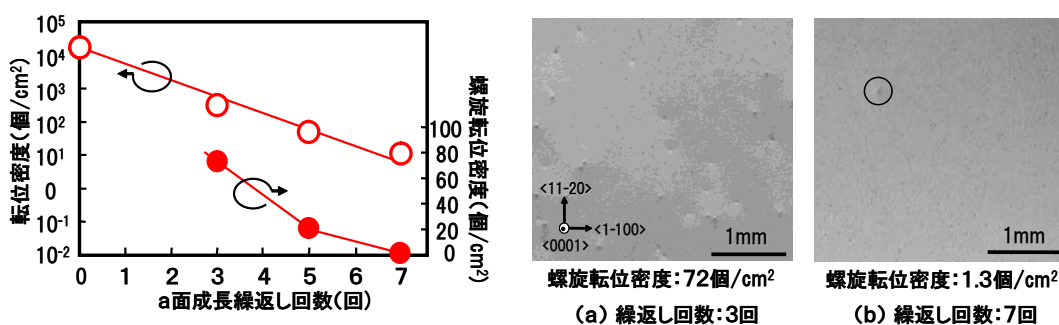


図 III. 2.1.1.1-9 繰り返し a 面成長による転位密度低減効果

(2) 成果の評価

1) 目標の達成度

中間目標である「口径 6 インチで、 10^3 個/cm² 台の転位密度を実現するのに必要な高品質化にかかわる基盤技術を確立する」に対して、上述した通り、口径 6 インチの結晶成長を実現し、**転位密度 $2\sim 3 \times 10^3$ 個/cm²**を確認して中間目標を達成した。これは、現在報告される中で、**世界最高品質の 6 インチ結晶**と考える。更に、最終目標を見据えて、RAF 法による更なる高品質化検討から**小口径で転位密度 20 個/cm² (螺旋転位密度 1.3 個/cm²)**までの低減を実証した。この結果、中間目標の達成に加え、更なる高品質化の指針を導出することに成功したと考える。

2) 成果の意義

上記目標の達成により、最終目標と定める「口径 6 インチで、転位密度 1×10^3 個/cm² 以下の結晶を実現」に向け、大きな進展が得られたと考える。加えて、高速・長尺といった生産性に関わる高度化技術を確立することで、最終目標の達成と共に、事業化に向けた競争力確保を図る基盤が整った。また口径 1 インチながらも、螺旋転位 (転位の中でも最もデバイスへの影響が大きい欠陥) 密度を、1.3 個/cm² というレベルまで低減できたことに関しては、この値は、**現状市販品の約 1000 分の 1、学会報告トップデータと比較しても約 100 分の 1 の値**であり、結晶品質の点で、他機関を大幅にリードしていると言える。

3) 知的財産権の取得

国内において平成 22 年度と平成 23 年度で計 10 件の特許の出願を完了した。
(平成 24 年度も継続的に出願申請を実施中である。)

4) 成果の普及

実事業開始に向けて本事業による技術開発を継続する。計画通り 6 インチ高品質 SiC ウェハを市場に投入することになれば、MOS 系デバイスの普及の足かせとなっている信頼性課題に一つの解を与えることとなり、**SiC MOSFET の実用化・普及を大きく促進すること**となるものと考えられる。これまでの、プロジェクト成果の外部発表の一覧を下記に記す。

表Ⅲ. 2.1.1.1-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳)

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT※出願	査読付き	その他	
H22FY	1 件	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件
H23FY	9 件	0 件	0 件	0 件	0 件	5 件
H24FY	1 件	0 件	2 件	2 件	0 件	0 件

5) 最終目標達成可能性

前述したように、現状の成果に基づき最終目標「口径 6 インチ、長さ 50mm 以上で、有効面積 (端部 3mm を除く) 全域において転位密度 1×10^3 個/cm² 以下の結晶を実現する」の実現についても十分達成可能と考える。

表Ⅲ. 2.1.1.1-2 最終目標達成のための課題と解決策

最終目標	研究内容	課題	解決策
口径 6 インチ、長さ 50mm 以上で、有効面積 (端部 3mm を除く) 全域において、転位密度 1×10^3 個/cm ² 以下の結晶を実現する。	①超高品質 RAF 技術の 6 インチ適用 ②6 インチ c 面成長の安定化 ③高度化技術の開発	①RAF 工程の安定化と効率化 ②c 面成長の安定化 ③高速・長尺用装置コンセプトの実証	①早期実証済 6 インチ RAF 技術の工程能力確保と効率化 ②増埧構造、工程改善による工程能力確保 ③新規機構 (原料供給改善・結晶位置制御、長時間温度安定機構) の効果検証

2.1.1.2 高品質・大口径 SiC 結晶成長技術開発(その2)

(SiC ウェハ量産化技術開発[助成事業／研究開発項目(5)]を含む)

(1) 開発の成果

現状の市販 4 インチウェハの転位密度を半減させると共に、量産性の点から成長速度と結晶長を倍増させて 6 インチウェハを実現することを目指し、「口径 6 インチで、0.5mm/h 以上の結晶を実現するのに必要な成長速度向上にかかわる基盤技術を確立する」ことを中間目標として取り組み、これまでに以下の成果を得た。

保有する差別化技術である結晶成長安定化技術の拡大適用により、国内で先駆けて 6 インチウェハを実現することに成功した(図Ⅲ.2.1.1.2-5)。成長速度は **0.56mm/h** であり、目標に掲げる成長速度 0.5mm/h を達成した。

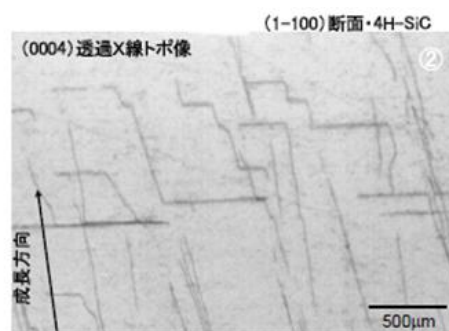
また、結晶欠陥制御開発に関する最終目標達成に向け、結晶高品質化に繋がる技術シーズ探索に関わる研究開発を実施した。4H-SiC 単結晶中に存在し、かつ〈0001〉方向のバーガスベクトルを有する貫通らせん転位について、転位伸展方向が結晶成長方向から(0001)面内へ偏向する現象を見出した。

貫通らせん転位は、SiC デバイスの信頼性に影響を与えるといわれており、本現象の再現性確認およびその制御法が確立できれば、昇華法結晶の貫通らせん転位を低減化できる技術に繋がる可能性がある。本技術の制御法を確立し、6 インチウェハへ適用することにより SiC デバイスの信頼性を改善する 6 インチ材料技術に繋がる事が期待される(図Ⅲ.2.1.1.2-16)。

転位密度の Overall な低減化(最終目標: 5000 個/cm² 以下)と並行し、応用デバイスの要求品質ニーズ(キラ欠陥など)に対応する、現実的な基板品質を有する 6 インチウェハの量産技術に繋がり得る転位密度低減化新技術シーズへの展開可能性を提示した。



図Ⅲ.2.1.1.2-5 開発した 6 インチ単結晶ウェハ



図Ⅲ.2.1.1.2-16 成長方向に平行に切り出した(1-100)面 SiC 単結晶試料の成長中期に相当する結晶領域についての(0004)透過 X 線トポグラフィ像(種結晶直上より約 5mm 付近)

(2) 成果の評価

1) 目標の達成度

本研究開発項目の中間目標「口径 6 インチで、0.5mm/h 以上の結晶を実現するのに必要な成長速度向上にかかわる基盤技術を確立する」について、6 インチ単結晶成長において成長速度 0.56mm/h が実現されていることを確認した。平成 24 年度中に、量産技術確立に繋げるための再現性および安定性について、更に N 増しを前提とした開発を実行し、平成 24 年度の基本計画目標を達成する計画である。

2) 成果の意義

0.56mm/h の成長速度を確認すると同時に、6 インチ大口径単結晶に顕在化しやすいマクロインゴット割れ問題を解決することで、国内で先駆けて 6 インチ単結晶を実現した。成長速度に関する再現性および安定性を見極め、平成 24 年度の基本計画目標を当初計画通りに達成することにより、プロジェクト後期の 2 年間（平成 25～26 年度）にて実行する、一定規模の製造フローに基づく 6 インチ単結晶製造技術開発について、その技術確立に繋げることが可能になる。**Si 用プロセス装置の転用が可能な 6 インチウエハの市場投入は、デバイスメーカーが待ち望む SiC パワーデバイス製造 6 インチ化のニーズに答えるものであり、ウエハの低コスト化、チップ取れ数の増加によるデバイスコストの低減に繋がることにより、SiC デバイスの普及拡大に大きく貢献することが期待される。**

3) 知的財産権の取得

平成 24 年 3 月末までに、計 3 件の国内出願を行った。これらについては、外国出願を検討中である。

4) 成果の普及

査読付き英文論文 3 件を発表。米国 Cleveland にて開催された ICSCRM2011 国際会議（International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2011）にてポスター発表（3 件）。

また、国内学協会にて 2 件の学術講演を実施した。

平成 23 年 12 月 6 日には国内にてプレスリリースを実施し、翌日の日本経済新聞全国紙朝刊をはじめとする国内主要誌面に掲載された。

平成 24 年 6 月 13 日に、半導体産業新聞社主催の**第 18 回半導体オブ・ザ・イヤー 2012**において、**半導体電子材料部門優秀賞**を受賞した。

表Ⅲ.2.1.1.2-19 に成果普及の詳細について示す。

表Ⅲ. 2.1.1.2-19 特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT※出願	査読付き	その他	
H22FY	0件	0件	0件	0件	0件	無し
H23FY	3件	0件	0件	0件	0件	講演5件 プレス発表1件
H24FY	0件	0件	0件	3件	0件	講演1件

5) 最終目標達成可能性

本プロジェクトの前期（平成23年度末）にて得られた開発成果（目標課題達成見込みを含む）をベースとして、表Ⅲ.2.1.1.2-20に挙げる研究開発を実行することにより、本研究開発項目の最終目標を達成する。

表Ⅲ. 2.1.1.2-20 最終目標達成のための課題と解決策

最終目標	研究内容	課題	解決策
有効面積全域において高さ50mm、転位密度 5×10^3 個/cm ² 以下の結晶を0.5mm/h以上で実現	<ul style="list-style-type: none"> ・高さ50mm以上の単結晶成長条件の確立、 ・プロジェクト前期で明らかにした転位欠陥低減化に関する開発課題の解決 ・なお、成長速度については0.56mm/hを確認。N増しによる再現性・安定性を確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> ①高さ50mm以上の単結晶成長におけるポリタイプ安定化、および内部応力低減化 ②転位密度の低減化 ③成長速度(0.5mm/h以上)の再現性および安定性実現 	<ul style="list-style-type: none"> ①新日鉄保有技術(窒素ドーピングによるポリタイプ安定化等)の、高さ50mm以上の単結晶への適用を中心とするポリタイプ安定化条件確立。また、数値計算を中心とした、高さ50mm以上の単結晶における内部残留応力の解明と低減化に向けた成長条件最適化 ②各種の転位欠陥発生現象の調査と、転位低減化機構の解明 ③結晶成長を規定している、温度をはじめとする各種の成長パラメーターの最適化

2.1.2 革新的 SiC 結晶成長技術開発

2.1.2.1 革新的 SiC 結晶成長技術開発(その1)ーガス法ー

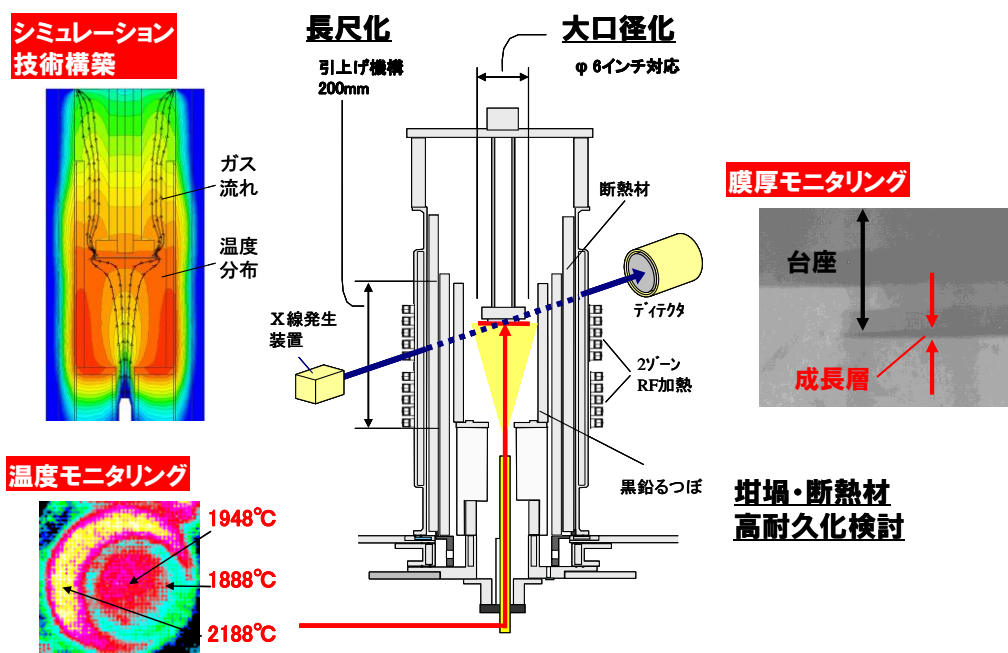
(1) 開発の成果

昇華法を超える低コスト化技術を実証することを目指し、昇華法が抱える「原料枯渇による収量制約」という問題を克服できる成長手法としてのガス法を取り上げ、「高速性、高品質性、長尺化/口径拡大等の各課題に対する要素技術を確認し、口径2インチ、長さ1mmの4H-SiC単結晶の成長を実現する」を中間目標として取り組み、これまでに以下の成果を得た。

まず、シミュレーション設計技術、温度、成長モニタリング技術及び、るつぼ部材の高耐久化技術を含めた装置開発を推進し、長尺・連続成長のキー技術である成長面の安定成長機構を導入した設備改造を完了した。

次に、高速性、高品質性、長尺化/口径拡大等の各課題の検討を進め、口径2インチ、長さ15mm成長を確認した。

更に、ガス法の優位性の一つと考える高速化・高品質化の両立を実証するために、電力中央研究所（土田主席研究員）への再委託により高速化と品質の相関を把握して両立に向けた指針を見出すべくシミュレーション解析及び実験検証に取り組み、0.94mm/h（昇華法の約3～4倍）の成長速度を確認した。



図Ⅲ.2.1.2.1-15 ガス成長炉 装置コンセプト

(2) 成果の評価

1) 目標の達成度

上述の通り、高速性、高品質性、長尺化の各課題に対する要素技術を確認するこ

とができ、口径 2 インチ、長さ 15mm の 4H-SiC 結晶成長を実現し、中間目標を大きく上回る長尺成長を実現した。それに加え、電中研との共同研究により、高速成長と結晶品質に関わる課題を抽出し、0.94mm/h（昇華法の約 3～4 倍）の成長速度を達成した。昇華法を凌駕する高速化・高品質化の両立に係るポテンシャルの実証に繋がる指針が得られた。

2) 成果の意義

上記目標の達成により、最終目標と定める「ガス法により、口径 2 インチ以上、長さ 20mm 以上の 4H-SiC 単結晶を実現した上で、昇華法に対する優位性を検証する」に向け、既に 15mm と最終目標に近づく長尺成長を実現したことは、昇華法が抱える「原料枯渇による収量制約」という問題を克服できる成長手法としてのポテンシャルを示したものであり、大きな成果が得られたと考える。特に、昇華法を凌駕する長尺化実証装置の基本コンセプトを見出せたことと、高速化の可能性が明示できたことは大きな進展と考える。

3) 知的財産権の取得

国内において平成 24 年度に計 4 件の特許を出願完了した。

（更に、平成 24 年度内も継続的に出願申請を実施中である。）

4) 成果の普及

2.1.1.1 の昇華法のところで、昇華法による実事業を開始する計画であることを述べたが、本テーマに関しても、将来的に昇華法を超える低コスト化技術として先行して実施する実事業への展開を念頭において技術開発を継続する。低コスト高品質ウエハの市場投入により、SiC デバイス市場の一層の拡大が期待できる。これまでに行った特許、論文発表実績を下表に示す。

表Ⅲ. 2.1.2.1-1 特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT*出願	査読付き	その他	
H22FY	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件
H23FY	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	3 件
H24FY	4 件	0 件	1 件	0 件	0 件	0 件

5) 最終目標達成可能性

前述したように、現状の成果に基づき最終目標「ガス法により、口径 2 インチ以上、長さ 20mm 以上の 4H-SiC 単結晶を実現した上で、昇華法に対する優位性を検証する」の実現についても十分達成可能と考える。

表Ⅲ. 2.1.2.1-2 最終目標達成のための課題と解決策

最終目標	研究内容	課題	解決策
<p>ガス法により、口径 2 インチ以上、長さ 20mm 以上の 4H-SiC 単結晶を実現した上で、昇華法に対する優位性を検証する。</p>	<p>①連続・長尺成長実証</p> <p>②高速・高品質化の実証</p>	<p>①新規装置による温度、ガス流量制御技術確立</p> <p>部材高耐久化</p> <p>②塩素系ガス成長工程の確立</p>	<p>①新規放熱機構ガス炉による長尺成長実証と品質確保</p> <p>部材高耐久化実証 (NbC 坩堝、断熱材保護構造)</p> <p>②日進分室実証炉への塩素系工程移管</p>

2.1.2.2 革新的 SiC 結晶成長技術開発(その2) – 溶液法 –

(1) 開発の成果

昇華法を超える超高品質・低コスト化技術を実証することを目指し、昇華法が抱える「非平衡条件下での成長／気相成長による成長速度制約」という問題を克服出来る成長手法としての溶液法を取り上げ、「高速性、高品質性、長尺化/口径拡大等の各課題に対する要素技術を確立し、口径 2 インチ、長さ 1mm の 4H-SiC 単結晶の成長を実現する」を中間目標として取り組み、これまでに以下の成果を得た。

TIA (Tsukuba Innovation Arena) パワーエレクトロニクス拠点の産総研西事業所内の専用建屋に、溶液法 SiC 成長用高温高压炉 (2400°C、100 気圧；図

Ⅲ. 2.1.2.2-29 (a))、小型溶液法 SiC 成長炉を、日立化成から大型溶液法 SiC 成長炉 (抵抗加熱) および長年産総研で蓄積してきた SiC 単結晶製造技術を搭載した設備群とともに集結して集中拠点を整備し、成長実験を開始した。

高速性の要素技術開発では、高温高压合成条件探索と融液組成検討を実施し、前者では、新規に導入した高温高压炉を用い、高温かつ低過飽和度の成長条件の下で安定した高速成長が実現できることを明らかにした。後者では、東京工業大学 (松本研究室) との共同研究により、融液組成探索ツールとしてレーザ加熱高温真空レーザ顕微鏡を開発、体系的な融液組成探索を開始した。

高品質性の要素技術開発では、先ず、ボイド欠陥の発生原因が融液中に溶存した雰囲気ガスであることを突き止め、原料融液の成長前加熱を行うことによるボイド除去技術を確立した。次に、SiC に特有な複数の結晶形が混入する多形欠陥を抑え単一の結晶相を成長させる為に、多形発生過程の詳細な観察評価を行い、過飽和度を制御して安定化させる技術を開発した。最後に、名古屋大学 (宇治原研究室) との共同実施により、転位欠陥の低減を検討し、**種結晶としてオフ基板を使用することにより、貫通転位を基底面内の欠陥に変換して成長結晶中の転位を大幅に低減する技術を開発した (図Ⅲ.2.1.2.2-24)。**

口径拡大／長尺化の要素技術開発では、るつぼからの炭素の溶け出しメカニズムを解明し、融液中の炭素濃度分布のシミュレーションモデルを作成した。

以上の要素技術を反映した最適条件で、種結晶として 2 インチの円盤状結晶、溶媒には**純 Si (純度 99.99999%)** を用いて結晶成長を行い、**厚さ 3.4mm** の 4H-SiC 単結晶を実現した (図Ⅲ.2.1.2.2-29)。**成長速度はおよそ 500 $\mu\text{m}/\text{h}$ 程度で昇華法と同等もしくはそれ以上を達成した。**

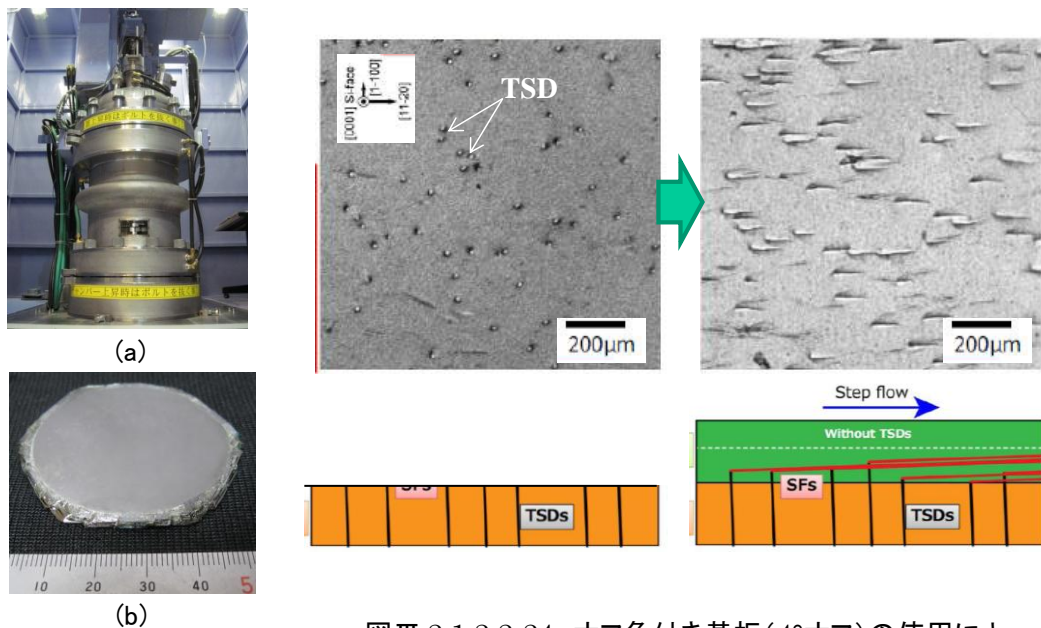


図 III.2.1.2.2-29 高温
高圧炉(a)と成長結晶(b)

図 III.2.1.2.2-24 オフ角付き基板(4°オフ)の使用による転位密度低減の原理;貫通らせん転位の基底面内欠陥への変換により、低減する。変換率は 80~100%

(2) 成果の評価

1) 目標の達成度

上記のとおり、高速性、高品質性、長尺化/口径拡大に係る要素技術を確立し、口径 2 インチ、長さ 3.4mm の 4H-SiC 単結晶の成長を実現し、中間目標を達成した。今後に向けては、現段階では結晶成長が進行するにつれ、結晶表面の荒れが顕在化する傾向がみられる。要素技術と学の知識の更なる融合を図り、最適な結晶成長条件を確立して、最終目標である 20mm を越える長尺成長を達成する。

2) 成果の意義

溶液成長技術は、熱的平衡状態に近い状態での理想的な成長が可能で、昇華法やガス法に比べ、圧倒的に低温度勾配化で結晶成長を行えるため、熱応力に起因する転位密度を最も低減できる結晶成長技術として期待され、長年にわたり SiC への適用が試みられてきたが、SiC 結晶相を安定にかつ高能率で得る最適解は見つかっていなかった。2011 年の ICSCRM2011 (Inter. Conference on Silicon Carbide and Related Materials) でトヨタ・住友金属が発表した引上げ法による結晶成長の成功は、溶液法の可能性を示すものとして注目すべきものであった。

本プロジェクトでは、実用化するキーは融液中に溶解する炭素濃度を高めることであるとの認識から、高温高圧成長をベースに、これに学の知見を融合するというアプローチを採用している点が最大の特長である。本プロジェクトの成果は、このスキームで、高速成長、高品質成長、大口径化に係る要素技術を確立するこ

とで、口径2インチ、厚さ1mm以上の4H-SiC単結晶を安定的に実現することができることを示したものである。この成果は、**高純度 (pure-Si 使用) かつ高炭素溶解度 (=高速) の特長を持つ高温高圧下の溶液法による SiC 単結晶実現への道**を切り開いたものとして画期的である。

更に、上述したように、名古屋大学 (宇治原研究室) との共同研究により、今回世界で初めて、**溶液法でオフ基板を使うことにより、貫通転位を基底面内の欠陥に変換し、成長結晶中の転位を大幅に低減**できることを見出した。変換率は、4H-SiC 結晶の場合 100%に達することも明らかにした。このことは、将来、**無転位結晶実現の可能性**があることを意味しており、溶液法による超高品質な無転位結晶実現への道を開いたものである。

加えて、本プロジェクトでは、今後、炭素の供給源として高圧 CH₄ ガスを導入して Si 融液中の炭素濃度を増加させ、成長速度を高めることを計画している。これにより、今現在、昇華法と同等な成長速度を画期的に高めることが期待でき、高スループット化による低コストが可能となる。

3) 知的財産権の取得

本研究開発項目において、3 件の特許を出願済である。

4) 成果の普及

本研究開発項目において、3 件の査読付き論文および、16 件の外部発表を行った。

表Ⅲ. 2.1.2.2-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳)

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT*出願	査読付き	その他	
H22 年度	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	5 件
H23 年度	3 件	0 件	0 件	0 件	0 件	11 件
H24 年度	0 件	0 件	0 件	3 件	0 件	0 件

5) 最終目標の達成可能性

本研究開発項目においては、最終目標達成に向けて、以下の残された課題があるが、各課題に対する解決策を推進していくことで、解決可能であると考ええる。

表Ⅲ. 2.1.2.2-2 最終目標達成のための課題と解決策

最終目標	研究内容	課題	解決策
<p>口径2インチ、長さ20mm以上の4H-SiC単結晶を実現した上で、昇華法に対する優位性を検証する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・溶液成長法における4H-SiCバルク単結晶成長技術の確立 ・高速化・高品質化・大口徑化実証実験 	<ul style="list-style-type: none"> ・要素技術の融合 ・低転位化 ・低応力化 	<ul style="list-style-type: none"> ・要素技術を融合して、温度条件・過飽和条件を最適化することにより、表面平坦性を維持しつつ、高温での高速成長を実現する検討を行う。また、融液組成探索ツール(レーザ加熱高温真空レーザ顕微鏡)を活用して最適フラックスの探索を行う。 ・貫通転位を基底面内の欠陥に変換して成長結晶中の転位を大幅に低減する高品質化技術の開発を行う。 ・$\Phi 50$ 大口徑化では、新たに熱応力による割れの課題が顕在化すると考えられる。シミュレーションを活用し、大口徑、長尺結晶の成長が可能で、かつ割れが発生しない温度環境を導出する。

2.2 大口径 SiC ウェハ加工技術開発

(大口径 SiC ウェハ加工要素プロセス検証(研究開発項目(6))を含む)

(1) 開発の成果

6 インチ SiC 単結晶インゴットの超高速切断から高平坦度仕上げ研磨までの一貫加工工程において、プロセス時間 24 時間以内を目指し、「3 インチ結晶で切断速度 150 $\mu\text{m}/\text{分}$ 以上を実現し、切断～仕上げ研磨の各要素工程の最適化および接続最適化を行い、6 インチの高速・高品質な一貫プロセス最適化の方針を得ること」を中間目標として取り組み、以下の成果を得た。なお、各要素工程の最適化には、平成 22 年度補正予算事業である研究開発項目(6)として加速実施した高速・高剛性マルチワイヤーソー開発および切断、研削、荒研磨、仕上げ研磨の各加工工程ごとの系統的实验およびデータ蓄積に基づくポテンシャル把握結果が反映されている。

最初の工程となる SiC インゴットの切断工程の研究では、まず、高線速、高張力が可能な高剛性と新規送り出し機構を備えたマルチワイヤーソーを新規に開発した(研究開発項目(6))。次に、このマルチワイヤーソーにて 2~3 インチ SiC 単結晶の切断実験を実施し、6 インチインゴット換算で 9 時間に相当する切断速度 800 $\mu\text{m}/\text{分}@2$ インチ (6 インチ換算 270 $\mu\text{m}/\text{分}$) を達成した(図 III.2.2-5)。これは従来技術のおよそ 3 倍速い切断速度である。

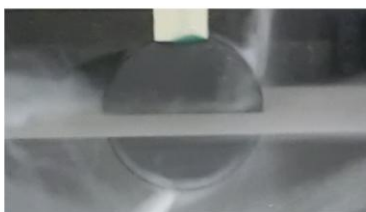
ダイヤモンドを使わない新規切断法と位置付けるマルチワイヤー方式放電加工切断においては、3 インチ SiC 単結晶の切断実験にて 200 $\mu\text{m}/\text{min}$ のマルチ切断を達成し、ダイヤモンドレス加工の将来性を示した。また中部大学(山口研究室)との共同研究では 50 μm 極細ワイヤーによる放電加工切断を実証し、カーフロス低減に資する成果を得た。

研削加工においてはビトリ系、レジン系など各種結合材の番手 #1000~#30000 のダイヤモンド砥石を中心に加工特性の調査を実施した。これらの砥石で形成された加工変質層の厚さをステップポリッシュ法にて評価したところ、その値は砥石番手の値に依らず、加工能率や表面粗さの対数と比例関係となる傾向があることが判明した(図 III.2.2-22)(研究開発項目(6))。これらの知見は一貫工程を構築する際に、前後工程の仕様に従って加工能率と表面粗さのバランスの良い砥石選定に役立つ成果となった。

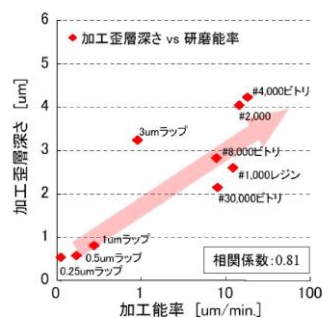
仕上げ研磨に相当する CMP (Chemical Mechanical Polish) 加工では、主にコロイダルシリカを使用した研磨による鏡面研磨実験を実施した。その結果、従来 CMP 加工ではスクラッチを完全に消すことが難しいとされてきたが、本研究では、スラリーと研磨パッドの最適化等により、コンフォーカル微分干渉顕微鏡(C-DIC)像においてスクラッチが観察されない 3 インチの SiC ウェハ加工を達成した(研究開発項目(6))。大阪大学(佐野研究室)との共同研究では、CARE (CAlyst-Referred Etching ; 触媒基準エッチング)によるエッチング仕上げを 4 インチウェハで実施し、同様に C-DIC

像で評価しスクラッチフリー面達成を確認している。仕上げ面評価においては、放射光トポグラフィ解析にも着手し、今後潜傷などの評価の難しい対象も視野に開発を深める計画である。また、名古屋工業大学（江龍研究室）との共同研究では、紫外線照射により、表面加工ダメージ層を非接触でマッピングする手法の開発に取り組み、中間段階として、ダメージ層と相関のある信号をマッピングする機能を開発した。

一貫加工工程の開発では、上述した切断から CMP までのこれまでの開発成果をもとに、代表的な要素プロセス条件を選定し、それらを組み合わせて 3 インチを使った一貫加工プロセスの検証実験を実施した。その結果、切断から CMP まで約 12 時間のプロセス時間で完了できることを検証した。この成果をふまえ、6 インチの一貫加工プロセス開発において 24 時間以内の目標値を達成するための方策・指針を検討した。工程全体の能率改善には切断面の表面粗さ、反り値を抑えた高速切断条件の探索、鏡面と高能率を可能とする低ダメージ研削技術の開発、CMP の高速平坦化条件を見出すことを基本方針として決定した。



図Ⅲ.2.2-5 マルチワイヤーソーによる切断実証



図Ⅲ.2.2-22 ダイヤモンド砥粒を用いた研削・研磨の加工能率と加工変質層深さの関係

(2) 成果の評価

1) 目標の達成度

中間目標に対し、切断プロセスにおける目標値は既に達成した。一貫プロセスの最適化においては、上述した大口径化の基本方針に沿って、研磨、CMP など各装置に備わるロギングシステムの解析をさらにすすめ、大口径化対応に向けた加工課題および対策技術の抽出を行う計画である。本計画はおおむね予定通り進んでおり、本年度内に完了する見込みである。

2) 成果の意義

切断技術開発においては、新規に開発した高速マルチワイヤーソーで達成した切断速度（口径 2 インチで 0.8mm/min）は、従来の固定砥粒ワイヤー切断に比べ 3 倍速い世界最速の切断速度であり、更に最終目標（口径 6 インチで 0.3mm/min 以上）実現に向け順調に推移しており、ウエハコスト削減に大きく寄与するものである。

また、次世代の加工技術と位置付けるマルチ放電加工切断技術において、高速マルチ切断が可能であることを実証したことは、更なる低コスト化へ向けたダイヤモンド

ンドレス加工の将来性を示すものである。

研削技術や各種研磨技術の開発、ならびに加工変質層の評価の結果は、SiC ならではの加工特性や加工面の特徴を明らかにし、高能率の一貫ウエハ加工プロセスを構築する上での貴重なデータベースとなった（研究開発項目(6)）。今後の研究加速につながることを期待できる。

更に、最終仕上工程である CMP 工程において、スラリーと研磨パッドの最適化等により、従来難しいとされてきたスクラッチフリー加工を実現できることを示した点は、エピタキシャルウエハの高品質化にとって極めて重要な成果である。

24時間加工の実現に向けて、最も加工時間を要している切断と CMP で、世界最高速切断とスクラッチフリーを実現したことで、現段階で世界トップレベルにあると言える。更にこの先、プロセス構成、加工材の選択、加工条件の最適化を行うことで、6 インチトータル加工時間 24 時間が実現できれば、他機関を遥かに凌駕する品質とコストポテンシャルを確保できると言える。

3) 知的財産権の取得

実用性の高い新しい加工技術を見いだしており、現在、知的財産権のまとめを進行中である。

4) 成果の普及

本プロジェクトでは、今まで取り上げられることのなかった、加工工程間を接続した実験・評価によって、高効率な SiC ウエハ加工工程を作り上げることが可能である。開発した先進技術は、加工専門の参画企業によって、実用化されるほか、ウエハメーカーの参画企業が受け皿となって、技術導入することにより、スループットの向上、ウエハコストの削減、ウエハ数量の拡大が促進され、SiC デバイスの普及拡大に貢献するものと期待される。また、成果の普及は、特許・プレス・論文・学会などの開示手段で可能な限り国内の企業、研究機関へ普及に努める。現時点の特許・論文等の件数を下表に示す。

表Ⅲ. 2.2.13-1 特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT [※] 出 願	査読付き	その他	
H22	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件
H23	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	9 件
H24	0 件	0 件	0 件	1 件	0 件	0 件

4) 最終目標達成可能性

中間目標も予定通り達成し、今後も引き続き計画通り課題解決に努めていくことで最終目標を達成可能と考えている。

表Ⅲ. 2.2.13-2 最終目標達成のための課題と解決策

最終目標	研究内容	課題	解決策
切断：速度300μm/分以上、同時切断枚数10枚以上、切り代250μm以下	<ul style="list-style-type: none"> 大口径対応ダイヤモンドマルチワイヤーソーおよびマルチ放電加工装置の開発 高速高品位、低カーフロス加工条件の確立 	<ul style="list-style-type: none"> ①装置開発 ②高速加工 ③平坦化加工 ④低カーフロス化加工 	<ul style="list-style-type: none"> ①、②高ワイヤー線速、高張力化（ワイヤーソー） ③加工条件最適化 ④放電制御技術開発
インゴットから表面仕上げ精度Rms（表面荒さ）0.1nm@2μm×2μmのベアウエハを実現する統合加工プロセスとして、プロセス時間24時間以内	<ul style="list-style-type: none"> 各要素プロセスの高性能化条件（高速&低ダメージ）の探索 新加工法の大口径プロセス応用検討と効果検証 	<ul style="list-style-type: none"> ①要素プロセス高性能化 ②全体最適化と検証 	<ul style="list-style-type: none"> ①_1 切断工程の圧倒的な高能率化、高品質化による後工程の負荷軽減 ①_2 各加工工程間の接続の評価による各要素工程ごとの役割・開発目標を明確化 ②_1 各要素工程の綿密なベンチマークと一貫工程化におけるシステム工学的検証 ②_2 加工仕上げ仕様の明確化（エピ工程接続、潜傷評価など）

2.3 SiC エピタキシャル膜成長技術

2.3.1 大口径対応技術

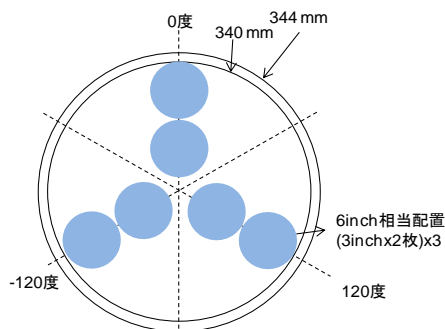
(1) 開発の成果

市販 3~4 インチウエハの均一度と低エピ欠陥密度の高品質性を備えた 6 インチエピタキシャルウエハの早期実現を目指し、「6 インチサイズのエピプロセスにおける問題点を把握し、厚さ均一度 $\pm 10\%$ 、濃度均一度 $\pm 20\%$ 、エピ欠陥密度 2 個/cm²以下を実現」することを中間目標として取り組んだ。新規に導入した 3 枚 x6 インチ CVD 装置を用いて、6 インチ化に向けたオフ角・面極性における成長条件、水素エッチングによる基板前処理条件等の要素技術の開発を 3 インチウエハ 2 枚用いた見做し 6 インチ (図Ⅲ.2.3.1-3) や 3 インチウエハで実施し、以下の成果を得た。

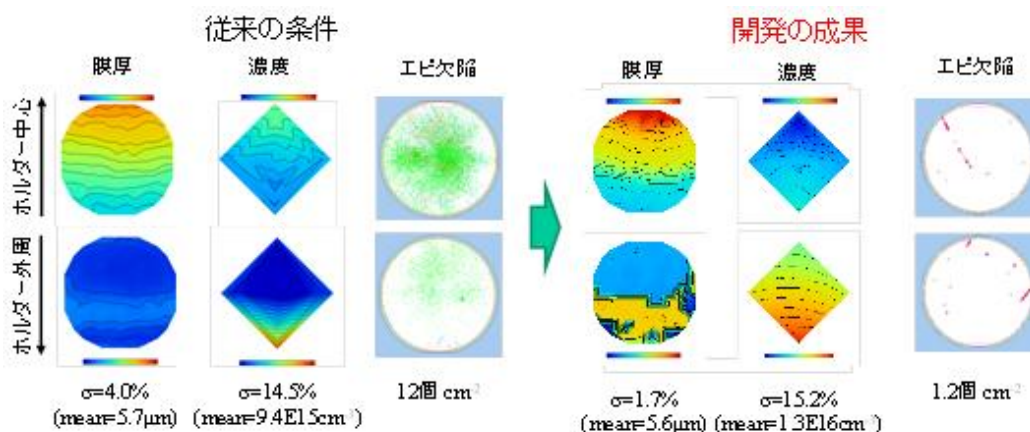
4°オフ Si 面については、3 インチウエハ 2 枚による見做し 6 インチでの均一性の検討、並びに、水素エッチング条件とエピ欠陥増減の傾向把握を実施した。その結果、水素エッチング条件としては低温・短時間の水素エッチングが有効であることが分かった。一方でバルク基板表面において研磨傷として表面に現れない研磨ダメージや洗浄状態がエピ欠陥の増減に大きく影響していることを見出した。成長条件とエピ欠陥との関係については C/Si 比の影響の大きいことがわかり、低 C/Si 比で成長させることがエピ欠陥の低減に有効であることが分かった。その成長条件を反映させたみなし 6 インチでの成長実験では、膜厚均一性： $\sigma = \pm 0.85\%$ 、濃度均一性： $\sigma = \pm 7.6\%$ 、エピ欠陥密度：1.2 個/cm²を達成した (図Ⅲ.2.3.1-17, 18)。また、6 インチウエハの使用を前倒しで行い、均一性の目標値を達成した。

4°オフ C 面については、6 インチ化にむけた課題導出のため、先ず、3 インチウエハ 1 枚での成長条件の検討を行い、みなし 6 インチでの成長実施に必要な基本成長条件を確立した。次に、その結果を基に、みなし 6 インチでの成長条件の検討を行い、膜厚均一性： $\sigma = \pm 0.9\%$ (中間目標 $\pm 10\%$)、濃度均一性： $\sigma = \pm 19.2\%$ (中間目標 $\pm 20\%$)を達成するとともに、6 インチ化に対する課題が、残留不純物濃度の更なる低減であることを明らかとし、その対応策として、原料ガス流量、C/Si 比、温度の成長条件最適化、炉構成部材からの吸着窒素の脱ガス抑止等を抽出した。

2°以下の低オフ角ウエハについては、3 枚 x6 インチ CVD 装置を用いた実験を開始、3 インチ微傾斜 Si 面基板において、水素エッチング条件および成長条件の検討を行い、3 インチウエハ全面でステップバンチング及び異常成長を抑制できる条件を導出した。



図Ⅲ.2.3.1-3 みなし 6 インチ配置；
径方向に 3 インチウエハ 2 枚を配置



図III.2.3.1-17, 18 条件検討による膜厚・濃度の均一性およびエピ欠陥密度の低減結果中間目標を達成し、現在、更に膜厚・濃度均一度はそれぞれ±0.85%、±7.6%に向上している向上している

(2) 成果の評価

1) 目標の達成度

当初想定した4°オフSi面に対し、みなし6インチで中間目標を達成するとともに、実際の6インチウエハの使用を前倒しで行い、均一度の目標値を達成した。6インチウエハに対するエピ欠陥密度については、使用した基板の結晶品質の影響が多いため不問とした。品質の良好な6インチウエハを入手後に確認する。

4°オフC面については、C面を使用した場合にMOS-FETの電界効果移動度が高くなることから、将来のC面使用を見越して検討しているもので、C面についてもみなし6インチにおいて均一度の目標を達成した。欠陥密度に関してもC/Si比の合わせ込により達成できる見通しを得ている。

低オフ角についても、将来、パワーMOS-FETの低抵抗化からトレンチMOS-FETが主流になることが想定されること、およびインゴットからのウエハ切り出し収率の向上へのニーズから、ウエハの低オフ角化が進むことを見越して検討しているものである。これに対しては、低オフ角化に伴う最大の課題であるステップバンチングの抑制する原理を導出することができた。

2) 成果の意義

4°オフSi面については、国内で1例目、世界で2例目の結果となった。内容的には、均一度は既報告例とほぼ同等であるが、エピ欠陥密度は高水準にあり、現状、世界の先頭を走っている。6インチ基板の市場投入を見据え、6インチエピ技術を確立しておくことで、6インチ基板の完成と同時に、高品質な6インチエピタキシャルウエハの垂直立上げが可能となる点で、SiCパワーデバイス製造6インチ化とそれに伴うコスト低下、デバイスの普及促進に大きく貢献するものである。

4°オフC面については、他に先駆けて成長速度というスループットの観点を含め6インチ化の目処をつけることができた。

低オフ角のエピ成長については、他に先行して口径のさらなる拡大と高品質化への可能性を示すことができた。

エピ欠陥に関して、これまで検出が出来なかった表面に現れない研磨ダメージや洗浄状態が、エピ欠陥の増減に大きく影響していることを見出したことは、今後の更なるエピ成長膜の高品質化につながるものである。今後、評価グループとも連携しながら技術確立を進める。

3) 知的財産権の取得

ECSCRM2012 (European Conference on Silicon Carbide & Related Materials) に備え、特許化を検討準備中である。

4) 成果の普及

6 インチウエハを使用したエピタキシャル成長の結果については国内初、世界 2 例目として MRS Spring meeting 2012 で発表を行った。

表Ⅲ. 2.3.1-7 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳)

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT※出願	査読付き	その他	
H22FY	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件
H23FY	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	3 件
H24FY	0 件	0 件	0 件	2 件	0 件	1 件

4) 最終目標達成可能性

Si 面 C 面共に 4° オフウエハにおいては最終目標達成は十分可能である。しかしながら、濃度均一性にはウエハのそりが影響することが見えている。エピ起因の表面欠陥はウエハ表面の研磨状態に大きく影響されることから、エピ成長プロセスの改善及びウエハ加工との連携を密にエピプロセスに必要なウエハ形状、研磨状態にしていく必要がある。

表Ⅲ. 2.3.1-8 最終目標達成のための課題と解決策

最終目標	研究内容	課題	解決策
<ul style="list-style-type: none"> ・ 均一度：厚さ ±5%、濃度 ±10% ・ 品質：エピ起因表面欠陥密度 ≤ 0.5 個/cm² 	<ul style="list-style-type: none"> 4° オフ Si 面 4° オフ C 面 	<ul style="list-style-type: none"> ① キャリア濃度分布 ② エピ欠陥密度 	<ul style="list-style-type: none"> ① そりの低減、そりに合わせたウエハの設置方法の検討によるウエハの変形防止 成長条件の最適化 ② ウエハ研磨状態の最適化と水素エッチング条件の最適化

2.3.2 高速・厚膜成長技術

(1) 開発の成果

高耐圧デバイスの作製に対応できる厚い高純度エピタキシャル膜が必要であるが、現状、成長速度とデバイス品質との両立は確認されていない。本研究開発項目では、4インチウエハを想定して高耐圧デバイスの作製に対応できる厚膜を高均一・高純度かつ高速で成長できるエピタキシャル膜成長技術の確立を目指し、「口径2インチ、膜厚50 μm 以上で、残留キャリア濃度 $3\times 10^{14}/\text{cm}^3$ 以下、エピ欠陥密度5個/ cm^2 以下の実現」を中間目標として取り組んだ。その結果、2手法（ガスフロー制御法、ハライド法）でのSiC高速厚膜成長のポテンシャルを確認し、以下の成果を得た。

ガスフロー法については、3インチウエハ上に成長速度100 $\mu\text{m}/\text{h}$ 以上で形成した膜厚50 μm 以上の厚膜（図III.2.1.3.2-2）において、残留キャリア濃度の中間目標（ $3\times 10^{14}/\text{cm}^3$ 以下）を達成した。一方、この厚膜のエピ成長起因の表面欠陥（エピ欠陥）密度については現時点では目標未達成であり検討継続中であるが、成長室内のクリーニング、ウエハ前処理の最適化、エピ条件の最適化などにより低減を図り、達成の見込みである。さらに、4インチ化に向けた面内均一性向上の検討を内外二重管でガスを供給することにより実施し、3インチウエハ内での面内均一性の改善を試みた。膜厚については面内分布 $\pm 2\%$ 以内を実現したが、ドナー濃度の均一性10%以内を同時に満たす条件は見いだせなかった。これについては今後、シミュレーション技術を導入して改善を図っていく。

ハライド法については、塩化水素添加により、意図した狙い通り、均質核生成を抑制して、4°オフウエハ上で成長速度100 $\mu\text{m}/\text{h}$ 以上の高速成長を達成したが、ステップバンチングが著しく、改善が必要である等の課題があることが分かった（図III.2.1.3.2-8）。また、懸念事項であった重金属などの不純物のエピ膜中への取り込みは生じていないことを確認した。

以上の知見をもとに、4インチ用の実証炉は、ガスフロー法の構造をベースに、塩素系ガスの活用もできる構成で仕様を確定した。

なお、炉内クリーニングに関する横浜国立大学（羽深研究室）との共同研究から、三フッ化塩素ガスによる炉内クリーニングに対してTaCコーティングは耐性がないことが分かり、引き続いて、SiCコーティングの耐性について検討を継続している。

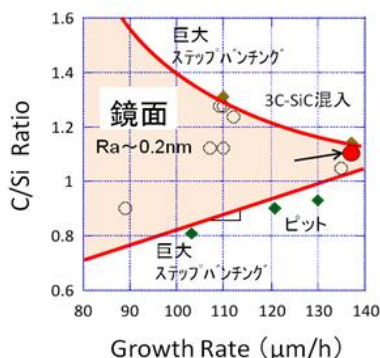


図 III.2.1.3.2-2 鏡面のエピ膜が得られる C/Si 比の範囲

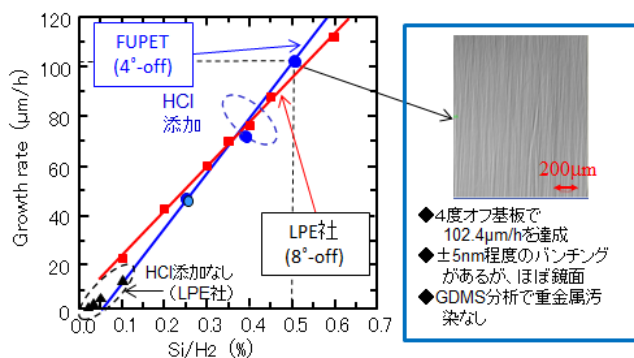


図 III.2.1.3.2-8 成長速度と SiH₄ 流量 (H₂ 流量との比で表示) の関係

(2) 成果の評価

1) 目標の達成度

上述の通り、残留キャリア濃度については、中間目標を達成した。エピ成長起因の表面欠陥密度については現時点では目標未達成であり検討継続中であるが、成長室内のクリーニング、ウェハ前処理の最適化、エピ条件の最適化などにより低減を図り、達成の見込みである。

最終目標達成に向けては、膜厚と濃度分布のトレードオフ、表面モフォロジーの改善等の課題を抽出することができ、それを反映し、**ガスフロー制御法とハライド法の長所を取り入れた新規実証炉を製作中**である。これにより、最終目標達成へ向けた基盤を整えることができた。

2) 成果の意義

3～5kV 及び 10kV 超級のデバイス応用（高速鉄道、系統）に必要な、高品質な厚いエピ膜を高スループット（～1 時間以内）で形成できる技術は実用化されておらず、仮に、**低速×複数枚の装置を用いて、低速で10倍近い時間をかけて成膜できたとしても、品質（低欠陥密度、均一性）を維持できる保証はない**のが現状である。このような状況において、本研究開発において、ガスフロー制御法とハライド法を取り上げ検討した結果、ガスフロー制御法では**成長速度 100 $\mu\text{m}/\text{h}$ 、膜厚 50 μm で鏡面成長を達成**するとともに、一方で、膜厚とドナー濃度の均一性のトレードオフ関係を把握することができた。ハライド法では、論文などの知見はある程度保持していたが、実際に膜成長、評価を行うことによって、高速成長の可能性を確認すると共に、**重金属汚染はない**が、一方で、表面に多数のバンチングが生じ、モフォロジーが悪いこと等を確認することができた。

このように、最終目標へいたる中間段階として、目標のどういう点が難しいのかが概ね把握でき、それに対処する方法を新規装置の仕様という形で落とし込んだことが現段階で得られら最大の意義である。この装置を平成24年度中に導入立上げ、成膜実験を開始して、未だ世の中で報告されていない高速厚膜エピ成長膜の電気的特性評価を早期に確認することが可能となる。

更に、この装置の導入により、早期に高速・厚膜によるデバイス試作が可能となり、**デバイスグループへ供給**することで、早期デバイス試作評価が可能となる。これにより、高速すなわち高スループットで高品質な厚膜の実用化が促進され、3～5 kV 級デバイスの実現とウェハコストの低減に繋がる。

3) 知的財産権の取得

現時点ではないが、国内出願1件を準備中である。

4) 成果の普及

まだ開発途中であり、普及する段階ではないと考えている。

表Ⅲ. 2.1.3.2-3 特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT※出願	査読付き	その他	
H22	0件	0件	0件	0件	0件	2件
H23	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H24	0件	0件	0件	0件	0件	0件

4) 最終目標達成可能性

4インチウエハ用の成長装置を開発中である。この装置の最適設計とエピ・プロセス条件の最適化により、最終目標は達成できるものと考えている。

表Ⅲ. 2.1.3.2-4 最終目標達成のための課題と解決策

最終目標	研究内容	課題	解決策
成長速度 100 ミクロン/h 以上で作製した、口径 4 インチ、膜厚 50 ミクロン以上の厚膜に対して;(1) 残留キャリア濃度: $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ の実現	目標達成が期待できる成長装置を新たに設計・製作し、これを用いたエビプロセスを最適化する	気相中の窒素濃度の低減	高真空中に排気できる成長室、ウエハ導入室の設置、高真空搬送系の設置
(2) 厚み±2%、ドーピング濃度±10%の均一度の実現	同上	①ウエハ内成長温度分布の均一化 ②ガス供給の最適化、平均化 ③ガス流れの最適化	①シミュレーションを活用した高周波誘導加熱コイル形状の最適設計 ②二重ガス導入管による原料ガス供給の最適化とウエハ回転機構の設置 ③シミュレーションによるガス流れの解析と成長室部材形状の最適化
(3) 表面欠陥密度 1.0 個/cm^2 の実現	同上	ダウンフォールの抑制	高真空下でウエハ搬送することによりパーティクルの巻き上げを抑制、ダウンフォールに起因する表面欠陥を低減

2.4 SiC 高耐圧スイッチングデバイス製造技術

2.4.1 新規耐圧構造デバイス

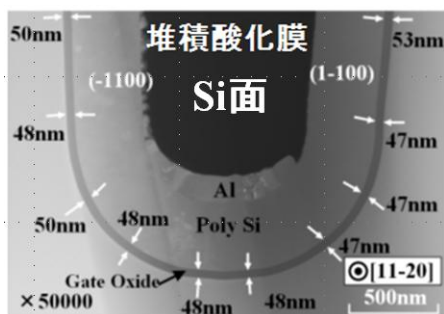
(1) 開発の成果

SiC-MOSFET は、Si-IGBT に対する優位性があるが、SiC デバイスで期待される特性オン抵抗より高い状況に鑑み、SiC-MOSFET の特性オン抵抗を限界へ向けて低減させ、耐圧 3kV 以上で特性オン抵抗 $15\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以下の高耐圧 SiC-MOSFET を実現することを目指し、「新規高耐圧デバイス構造とその作成要素プロセスを開発し、耐圧 3kV 以上の高耐圧 SiC-MOSFET を実現する」を中間目標として取り組み、以下の成果を得た。

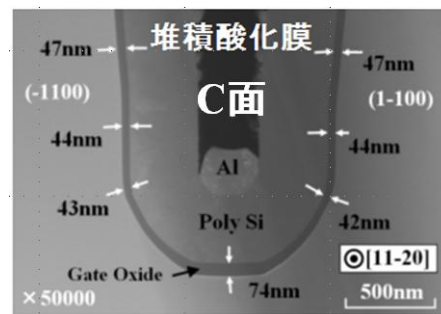
現状技術レベルの 3kV 級プレーナ MOSFET の抵抗成分を解析した結果、チャンネル抵抗に加え、JFET 抵抗（チャンネル端部の隣接する p-well に挟まれたドレイン領域の抵抗）およびドリフト抵抗（耐圧を支える為に必要な長さを持つ低濃度ドレイン領域の抵抗）の寄与が増大し、それぞれ約 40%、25%、30%を占めることが分かった。この点は、1kV 級 MOSFET の抵抗成分の 80%がチャンネル抵抗であるのとは大きく異なっている。

本研究開発では、**新構造プレーナ MOS 構造**として、**チャンネル移動度の高い C 面**を使い、かつ JFET 抵抗を低減する **JFET 抵抗低減構造**を採用した構造を提案、シミュレーション設計を行い、試作による検証を実施した。その結果、現在までに **JFET 抵抗低減構造の効果を確認**すると共に、耐圧を確保するための終端部構造の設計指針を得た。

トレンチ MOS 構造では、熱酸化膜から堆積酸化膜まで高信頼性と高チャンネル移動度を両立させるトレンチゲート酸化膜を検討し、**堆積酸化膜+再酸化によるゲート酸化膜形成法の可能性を見出した**（図Ⅲ.2.4.1-20, 21）。また、耐圧 3.3 kV を実現するためのトレンチ MOS 構造をシミュレーションにより検討し、酸化膜中の電界強度を 3 MV/cm 以下に抑えつつ、低オン抵抗を実現できる可能性を見出した。



図Ⅲ.2.4.1-20 Si 面トレンチ MOS キャパシタの断面写真



図Ⅲ.2.4.1-21 C 面トレンチ MOS キャパシタの断面写真

SJ 構造では、深さ 7.3 μm のトレンチ埋込に成功し、更に深さ 10 μm 以上のトレンチ埋込への対応についてもその実現手段を見出した。また、SiC ウェハを用いた裏面

アラインメント露光の検証を行い、ウエハ裏面マークを用いた合わせ露光が問題なく出来ることを実証した。また、3D デバイスシミュレーションを用いて、2ゾーン JTE (Junction termination extension) 構造により 3.3 kV 耐圧が実現できることを示した。更に、トレンチ型 MOSFET と SJ 構造とを組み合わせることで、トレンチ MOSFET を超える超低オン抵抗が実現できる可能性を提示した。

(2) 成果の評価

1) 目標の達成度

「新規高耐圧デバイス構造とその作成要素プロセスを開発し、耐圧 3 kV 以上の高耐圧 SiC-MOSFET を実現する」という中間目標に対し、**高チャネル移動度と高信頼性を兼ね備えたゲート酸化膜形成技術**(プレーナ、トレンチ共通)、**終端構造設計**(プレーナ)、**ゲート酸化膜への電界集中を緩和するためのトレンチ形成技術**(トレンチ)、**SJ 構造形成技術**等、デバイスシミュレーションにより理想化したデバイス構造、つまりは理想的なデバイス特性を実現するための各種要素プロセス技術を開発した。これらの技術を活用することにより、例えば JFET 抵抗低減構造を備えた新構造プレーナ型 MOSFET において、現時点でオン抵抗は、最終目標 ($15 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$) を達成している。一方で、現状、耐圧は中間目標値 (3 kV) を実証できていないが、その原因を把握しており、対策を施した次期試作において中間目標を達成する予定である。

2) 成果の意義

例えば、高チャネル移動度と高信頼性を兼ね備えたゲート酸化膜形成技術は、本事業で目標としている 3~5 kV 耐圧 MOSFET のみではなく、すべての電圧レンジで活用可能な共通技術であり、その波及効果は計り知れない。他の要素プロセス技術も含め、本研究計画では出来る限り単純化したプロセス技術開発を目指しており、実用化を強く意識した研究開発を行っている。オーソドックスなプロセス技術で作製できるプレーナ型 MOSFET において、素子設計を最適化することで 3 kV 以上の耐圧、最終目標とする $15 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ を越える低抵抗をシミュレーションと実験から示せたことは、同耐圧の Si-IGBT との差別化という意味で極めて大きな成果である。**ダブルトレンチ構造を用いたトレンチ型 MOSFET では、プレーナ型 MOSFET では達成不可能な $10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 以下の R_{onA} が実現可能であることをシミュレーションにより明らかにした。**また、素子構造として実現するためには極めてハードルが高いが、**トレンチ型 MOSFET と SJ 構造とを組み合わせることで、3.3 kV 耐圧、 $2.5 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ という、SiC のユニポーラ限界をも超える、極限までの低オン抵抗化が可能であることを示すことができたことは、SiC の可能性を提示した点で高く評価できると考える。**

3) 知的財産権の取得

上記関連の特許出願を行っている。

4) 成果の普及

トレンチ型MOSFETのゲートトレンチ形成技術に関する研究成果を、2011.12に開催された第20回SiC及び関連ワイドギャップ半導体研究会でポスター発表、更にトレンチ型MOSFETの素子設計に関する研究成果を、パワーデバイス分野において権威ある国際会議であるInternational Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's(2012.6)でポスター発表を行った。

表Ⅲ. 2.4.1-3 特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT [※] 出願	査読付き	その他	
H22FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H23FY	0件	0件	0件	0件	0件	1件
H24FY	1件	0件	0件	0件	0件	1件

4) 最終目標達成可能性

プレーナ型MOSFETでは、次期試作、或いは次々期試作において、耐圧3.3kV以上、特性オン抵抗 $15\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以下のSiC-MOSFETを実証するという最終目標を達成できると考えている。一方で、トレンチ型MOSFETやSJ構造を活用することにより更なる低オン抵抗化の可能性がシミュレーションで明らかになってきており、上記目論見通り早期に現在の最終目標を達成した際には、最終目標の再設定も検討中である。

表Ⅲ. 2.4.1-4 最終目標達成のための課題と解決策

最終目標	研究内容	課題	解決策
耐圧3.3kV以上、特性オン抵抗 $15\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以下のSiC-MOSFETの実証	プレーナ型MOSFETの開発 トレンチ型MOSFETの開発 SJ構造形成技術の開発	①耐圧構造の最適化 ②トレンチゲート酸化膜形成技術 ③ルーチンワークの長時間化	①素子試作とシミュレーションのルーチンで耐圧構造を最適化する ②堆積ゲート酸化膜の活用も含めた幅広い検討を行う。 ③FUPET資産をフル活用することによる、実験、評価時間の短縮

2.4.2 高耐圧大容量デバイス／変換器技術

(SiC 高耐圧パワーモジュール検証を含む)

(1) 開発の成果

3～5kV 領域の高耐圧スイッチングデバイスの実用化により、高速鉄道等のインバータの電力変換効率の向上や小型・軽量化による設計の自由度向上などが可能となり、低炭素社会の構築、産業競争力強化に極めて大きな効果が期待される。

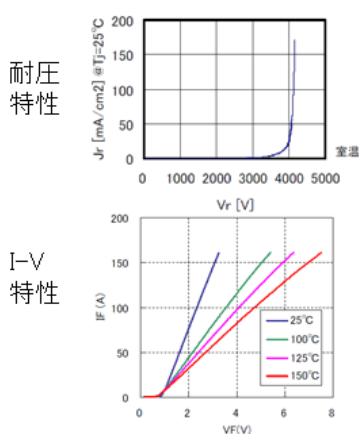
本研究開発項目では、3kV 以上、オン抵抗 80mΩ 以下、定格出力電流密度 100A/cm² 以上の高耐圧 SiC-MOSFET を開発し、それをを用いた MVA 級電力変換器を試作して、動作時の電力損失が同耐圧の Si 電力変換器の 50%以下であることを実証することを目指し、「耐圧 3kV 以上の高耐圧 SiC-MOSFET を実現すると共に、SiC-MOSFET、SiC-SBD を適用した 3kV 以上の電力変換器モジュールを試作して、当該電圧領域のスイッチング及び多並列接続に関する要素技術を確立する」ことを中間目標として取り組み、以下の成果を得た。

まず、新しい耐圧終端構造として、トレードオフの関係にある**高耐圧特性と低抵抗特性を両立できる擬似多階調構造**を開発した。

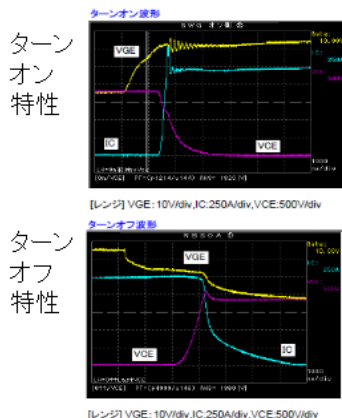
次に、この耐圧終端構造を適用して、SiC-MOSFET のセル構造、ドリフト層等の素子構造最適化に関しシミュレーションを用いて検討を行ない、3kV 以上の高耐圧特性と低抵抗特性を両立する SiC-MOSFET の構造設計を行った。また、構造を実現するためのプロセス技術の開発を行い、要素技術検証用小容量デバイスを試作評価した。その結果、試作品はアバランシェ電圧として 4kV 程度を持つことを実証でき高耐圧電力変換器への適用に対して十分な耐圧特性をもつことが分かった。また、順方向特性に関しても最終目標を実現するに十分なオン特性を有することが検証できた（図Ⅲ.2.4.2-18）。

また、大容量 SBD 開発においては、大面積化を図り 3.3kV 以上の耐圧、75A 以上（マージンも含めて 150A 強まで）での安定動作を達成するデバイスを実現した（図Ⅲ.2.4.2-8,9）。また、合わせて SW 試験を行いリカバリーのない SW 特性を有することを検証できた。試作した SBD の耐圧特性及び順方向特性から、試作した SBD は 4kV 強のアバランシェ電圧を実現しており高耐圧電力変換器に適用するに十分な耐圧特性を有していることを明らかにした。また、順方向特性は、150A 強までの電流領域において 25℃から 150℃までの温度範囲で良好な電流電圧特性が得られていることを明らかにした。

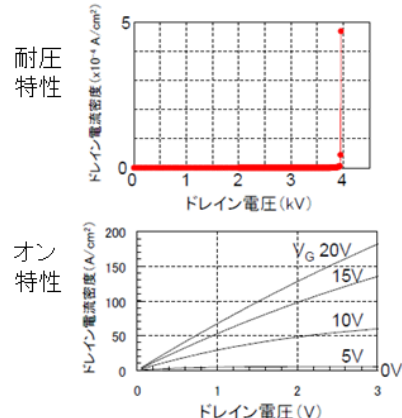
更に本 SBD と Si 絶縁ゲートバイポーラトランジスタとを組み合わせ 1000A 級のハイブリッド型の**大容量パワーモジュール**を試作した。ハイブリッドモジュールのスイッチング試験波形から、1250A の電流 (I_c) の ON/OFF 制御を実証した（図Ⅲ.2.4.2-21）。



図Ⅲ.2.4.2-8,9 試作 SiC-SBD の耐圧特性と順方向 I-V 特性



図Ⅲ.2.4.2-21 試作ハイブリッドモジュールのターンオン・オフ波形



図Ⅲ.2.4.2-18 TEG MOS の室温における Id-Vd 特性

(2) 成果の評価

1) 目標の達成度

SiC デバイスの高耐圧化に向けた耐圧終端構造として、従来構造では実現できなかった低抵抗特性と高耐圧特性を両立できる擬似多階調構造を考案した。この耐圧終端構造を適用して 3.3kV 耐圧の SBD を試作し、耐圧として実用上問題のないことを検証した。また、SBD の大面積化により目標通り 75A 以上の電流領域で良好なショットキー特性を有するダイオードを実現した。

このダイオードを用いて 1000A 級のハイブリッド型のモジュールを試作し、目標通り 1250A のスイッチングを実証した。また 1 相のフルブリッジ回路を構成して連続通電試験を実施し安定動作を確認した。

MOSFET のセル構造及びドリフト層などの素子構造の最適化により高耐圧特性と低抵抗特性を両立する構造設計を行った。この構造を適用した小容量のデバイスを試作し、特性評価を行った。目標通りアバランシェ電圧として 4kV 程度を持つことを実証すると共に順方向特性についても最終目標を実現するに十分なオン特性を有することを検証した。

2) 成果の意義

3.3kV 耐圧の大面積 SiC-SBD 技術を確立することができた。また、3.3kV 耐圧の SiC-MOSFET の基本技術を開発し、3.3kV 耐圧 SiC-MOSFET に目処を得ることができた。この技術を基にすることで、大面積 3.3kV 耐圧 SiC-MOSFET の開発を確実に実行することができる。これらの成果により、フル SiC 高耐圧大容量パワーモジュールの実現に必要な高耐圧 SiC チップ技術について見通しをつけることができた。

また、Si-IGBT と SiC-SBD を組み合わせた 3.3kV 耐圧、1000A 級の大容量ハイブリッドモジュールの動作検証を行うことで、高耐圧大容量パワーモジュールの

動作に関する技術を構築した。この技術に従ってフル SiC 高耐圧大容量パワーモジュールを設計することで、フル SiC モジュールを確実に設計することが可能となる。

以上のように、チップ技術、モジュール技術のいずれにおいても MVA 級のフル SiC 高耐圧大容量パワーモジュールを実現するために必要不可欠な技術に目処を得ることができており、中間時点での成果は最終目標の確実な実施と今後の飛躍的な市場拡大が予想される鉄道などを中心とする高耐圧電力変換器の実現に大きく寄与するものである。

3) 知的財産権の取得

知的財産権については未出願であり、今後取得を進める予定。

4) 成果の普及

本開発の成果を普及させるため、電気学会で 1 件、応用物理学会で 2 件の国内発表を行った。また、国際会議である SSDM (Solid State Devices and Materials) で 2 件の発表を行う予定。

表Ⅲ. 2.1.4.2-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳)

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT※出 願	査読付き	その他	
H22FY	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件
H23FY	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	3 件
H24FY	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件

4) 最終目標達成可能性

SiC-SBD の大面積化技術、SiC-MOSFET の基本技術を基に、目標どおりの性能を有する大面積低抵抗 SiC-MOSFET の実現を確実に実施する。また、1000A 級のハイブリッド SiC 高耐圧大容量パワーモジュールで得られた知見を基に、フル SiC 高耐圧大容量パワーモジュールの最適設計を行い、目標を達成する予定。

表Ⅲ. 2.1.4.2-2 最終目標達成のための課題と解決法

最終目標	研究内容	課題	解決策
耐圧 3kV 以上、オン抵抗 80mΩ 以下 (室温環境下)、定格出力電流密度 100A/cm ² 以上の SiC-MOSFET の実現	オン抵抗 80mΩ 以下の大面積 SiC-MOS 技術 定格出力電流密度 100A/cm ² 以上の低抵抗 MOSFET 技術	①オン抵抗の低減 ②低オン抵抗率化	①SiC-MOSFET の大面積化 ②SiC-MOSFET のセル構造最適化

<p>MVA級フルSiC電力変換器で動作時の電力損失が同耐圧のSi電力変換器の50%以下であることを実証</p>	<p>フル SiC 高耐圧大容量モジュール技術</p>	<p>①低損失化 ②チップ並列駆動</p>	<p>①スイッチングの高速化 ②主回路構造の最適化</p>
--	-----------------------------	---------------------------	-----------------------------------

2.4.3 大口径対応デバイスプロセス装置

2.4.3.1 大口径対応デバイスプロセス装置(その1)

(1)大口径化イオン注入装置開発の検討

6 インチ SiC ウェハに常温から 800℃までの広範囲高温注入ができるイオン注入量産装置を1年以内(2012年度末まで)に開発した。

(2) まとめ

1) 目標の達成度

100%

2) 成果の意義

本装置を SiC デバイス量産ラインに投入することにより、生産性向上、コスト低減による需要の喚起、SiC パワー半導体市場の拡大が促される。

3) 知的財産権の取得

国内特許を1件出願した。

4) 成果の普及

イオン注入装置の国際学会 (IIT2012 : Ion Implantation Technology 2012) で Poster 発表を行った。

表Ⅲ. 2.4.3.1-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳)

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT※出願	査読付き	その他	
H24FY	1件	0件	0件	1件	0件	0件

5) 最終目標達成可能性

6 インチ SiC ウェハに常温から 800℃までの広範囲高温注入ができるイオン注入量産装置を1年以内(2012年度末まで)に開発する、という最終目標を達成した。

2.4.3.2 大口径対応デバイスプロセス装置(その2)

(1) 活性化アニール装置の開発

本プロジェクトでは、まず要素評価機のハード設計・組立・調整を実施した。その後、製作した評価機を用いて反応炉の基本評価を実施し、さらに装置の耐熱評価、温度特性 (温度均一性、昇降温特性) のデータを取得し、評価機が設計通りのハード性能を有することを確認した。

(2) まとめ

1) 目標の達成度

100%

2) 成果の意義

本装置を今後量産化していく事は、高性能で安価なパワーデバイスを安定的に供給する事につながり、日本を含め世界の低炭素社会をより早期に実現することが可能となる。

3) 知的財産権の取得

8件出願予定である。

4) 成果の普及

プロジェクト成果の普及活動に関しては単年度のプロジェクトということもあり、装置立ち上げ及びハード評価が主のため外部発表は行っていない。今後、プロセス評価結果が出てくる段階で論文等を随時発表していく予定である。

表Ⅲ.2.1.4.3.2-1 特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT※出願	査読付き	その他	
H23FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件

2.5 共通基盤評価技術開発

(1) 開発の成果

共通基盤評価技術の研究開発は、SiC ウェハの表面観測と電気特性評価の関連の統計的把握を可能とする「統合評価プラットフォーム」を構築することを目的とする。更に上記「統合評価プラットフォーム」を活用し、SiC ウェハおよびプロセス過程での欠陥発生に関する基礎情報の蓄積を行うと共に、欠陥とデバイス特性やデバイス作製歩留まりとの関係を数値的に明確にするデータを蓄積することを目的とし、これまでに以下の成果を得た。

「統合評価プラットフォーム」は「観測システム」、「欠陥構造解析」、「電気特性解析」により構成される。新規に導入したウェハ表面観測装置（コンフォーカル微分干渉顕微鏡:C-DIC）の欠陥座標同定機能を生かし、プロセス前後での表面の変化を高精度で観測可能な「観測システム」を構築した。「観測システム」で同定された欠陥座標を使い、TEM、AFM 等の高度な構造解析装置が連携して効率的に位置決めが可能となるようデータフォーマットを含めて整備することで「欠陥構造解析システム」を構築した。更に、ウェハ内に時には数万以上存在する欠陥の各々の位置とその場所での電気特性との相関を統計的に評価する「電特評価システム」を構築し、「統合評価プラットフォーム」として完成させた（図Ⅲ.2.5-1）。

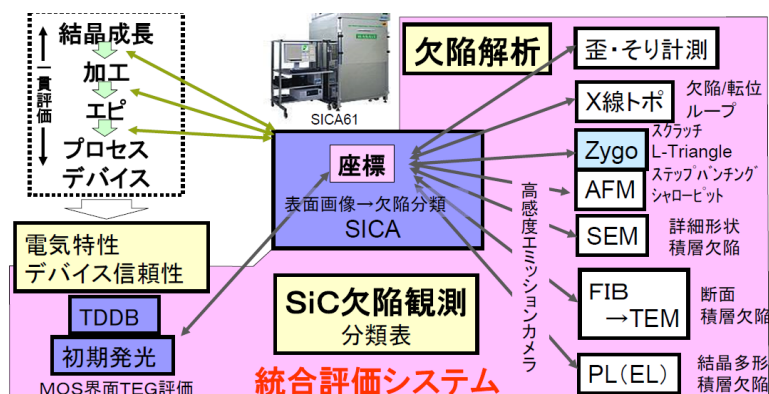
「電特評価システム」を利用し、MOS キャパシターの電気特性/信頼性とエピ表面の欠陥の関連の統計的解析に着手した。SiC 表面に分布している欠陥の部分に形成された MOS キャパシタ（例えば欠陥が観測されない平坦な表面、ステップバンチングを含む表面、エピプロセス後に観測された種々の欠陥を含む表面、TEG 作成プロセスにおけるマスクずれなどのプロセス欠陥を含む表面）の破壊電荷量が異なる値に分布することを確認した。上記、「観測システム」と「電特評価システム」が「統合評価プラットフォーム」として機能することを確認した。

「観測システム」により、欠陥の位置座標を高精細で決めることができるため、他の測定手段を用いた「構造解析」が効率的に行える。具体的には、放射光トポグラフ、AFM、SEM、TEM、PL（Photo luminescence）などを用いて、エピ表面に観測される欠陥の「構造解析」を行った。「構造解析」成果の例として、三角形に観測される欠陥は、積層欠陥（3C,8H 等）等を含んでおり、エピプロセス初期における欠陥や異物が原因である場合もあることが確認された。また、酸化前後での貫通らせん転位 TSD（Threading screw dislocation）欠陥周辺の表面の AFM 像をとることにより、TSD 欠陥上の酸化膜表面において、表面の凸凹が悪化することが確認された。また、物質材料研究機構（関口博士）との共同研究において、PL 像と低加速電圧領域の高分解能 SEM 像との相関を解析することにより、SEM 像から積層欠陥を捉えることに成功し、積層欠陥を比較的簡便に観察することを可能とした。

「観測システム」を利用し SiC デバイス作成における各々のプロセスの出来栄えに関

する一環評価に着手した。一環評価の例としては、加工条件とエピ条件を変えて表面の変化を観測することにより、洗浄状態や従来の手法では観測が困難な表面欠陥に起因して、エピ表面でのステップバンチングが起こる場合が有ることを確認した。今後、観測対象を結晶、デバイス製造プロセスに拡張、プロセス連携のために必要となる評価指標を整備して行く。

上記「統合評価プラットフォーム」によって蓄積される、市販ウエハの形状/欠陥等の品質に関する検査データをデータベースとして蓄積活用するための仕組みとして、「ウエハ情報共有システム」を構築した。



図III.2.5-1 SiC 統合評価プラットフォームの構成

(2) 成果の評価

1) 目標の達成度

自主設定目標に沿って、予定通り推移し、①「SiC 統合評価プラットフォーム」構築を完了し、観測システムと欠陥構造解析および電気特性解析が連携したデータが得られ、蓄積を開始したこと、②エピタキシャル膜に関して、欠陥と電気特性の紐付けのデータが得られるようになったこと、③欠陥構造解析により、品質に影響を与える三角欠陥の起点や内部構造が明らかとなったこと、④データ蓄積/共有化のための仕組みを構築したことにより、プロジェクトを横断する共通基盤としての評価プラットフォームが確立できた。

2) 成果の意義

他に例を見ない先進的取組みであり、① エピウエハ欠陥とデバイス信頼性の相関に道筋を付け、標準化に資する。② データベースを構築し、SiCの開発加速・事業活性化に資するという点で大きな意義があると考えられる。

3) 知的財産権の取得

現時点ではノウハウとして秘匿することを重視しているが、今後特許として開示した方が良い部分を切り分けて出願を検討する。

4) 成果の普及

今後、本プロジェクト以外にも、国内関連プロジェクトを含めて、体制を整備し、活動計画を策定した後に、成果の普及活動を行う方針である。

表Ⅲ. 2.5-4 特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT※出願	査読付き	その他	
H22FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H23FY	0件	0件	0件	2件	0件	13件
H24FY	0件	0件	0件	4件	0件	1件

4) 最終目標達成可能性

結晶欠陥とデバイス特性やデバイス作製歩留まりとの関係の明確化に向けて、集中研の特徴を生かし、結晶成長、加工、エピ、デバイスの各グループとの連携することにより達成する。すでに従来の評価法では観測されないウエハ表面の欠陥でエピや電気特性に影響を与えるものが見出されており、競争力確保につながる極めて重要な成果である。このような成果の蓄積が期待される。

表Ⅲ. 2.5-5 最終目標達成のための課題と解決法

最終目標	研究内容	課題	解決策
SiC ベアウエハからMOS キャパシタまでの各種評価データを統合したSiC 統合評価プラットフォームを構築し、デバイス特性やデバイス作製歩留まりとの関係を明確にする。	デバイス特性やデバイス作製歩留まりとの関係の明確化 本プロジェクト以外に、国内関連プロジェクトを含めた普及・標準化体制の整備	① 関連データの蓄積と解析 ② システムの高度化 ③ 標準化戦略の立案	① 結晶成長、加工、エピ、デバイスの各グループと連携により、相関を明確化することで達成する。 ② 評価結果の統合評価プラットフォームへのフィードバックによる欠陥認識アルゴリズム改善、解像度・処理スピード向上のための改造を行い高度化する。 ③ 秘匿する部分と特許化すべき部分を切り分けた出願の実施。

2.6 応用技術調査検討

(1) 活動の成果

応用技術調査検討では、次世代パワー半導体 SiC の実用化を牽引する為に、出口として期待されるアプリケーション領域の明確化、国内外の関連情報の収集/調査、ロードマップの提示、SiC 関連仕様の標準化検討、並びにインバータ試作などによる実証実験を行うことを最終目標として、技術調査 WG と出口戦略 WG の 2 つのワーキンググループ (WG) を設け、相互に連携して調査・検討を行っている。

技術調査 WG では、これまでに、学会調査・ヒアリングによる世の中の開発動向・レベルの把握と、プロジェクトの目標に対する進捗の把握に基づき、技術ベンチマークを実施した。その結果、以下のことが明らかとなり、各グループへ提示した。(i) 6 インチ高品質 SiC エピタキシャルウエハ製造技術では、① 6 インチウエハ実現で米国 Cree 社が先行し、海外複数企業からリリースのアナウンスがある中、本プロジェクトでも **新日鐵が既に 6 インチを実現し、日進分室も追隨**する見込みであり、実現すれば**結晶品質の点で優位**になる。② 加工については、6 インチインゴットからウエハにするまでの加工時間が現状技術で 3 日/枚以上と推定される中、本プロジェクトの**最終目標 24h/枚以内は、十分競争力のあるレベル**である。③ 大口径エピについては、Cree 社が先行するものの、本プロジェクトでもエピ欠陥密度低減と均一性の目標達成の見通しを得ている。従って、6 インチウエハ供給開始と同時にエピウエハの垂直立ち上げができるように量産化に向けた技術確立が必要である。また、(ii) 高耐圧スイッチングデバイス製造技術では、3kV 級の発表が未だ少ない中で GE 社が先行しているが、本プロジェクトもほどなく **GE 社を越える低オン抵抗を達成する見込み**であり、かつその先の開発の方向性も明確である。ただし、今後急速な低オン抵抗化が進むことが予測されることから、最終目標の再設定が必要になる。変換器に関しては、伊丹分室において、**MVA 級変換器の実現へ向けた開発が着実に進んでいる**。アプリケーション展開が期待できる。(iii) 共通基盤評価技術については、本プロジェクトで進める、結晶欠陥と電気特性との統計的相関解明は、他に例を見ない先進的取組みと言える。**集中研における連携で、従来技術では検出できなかった表面欠陥で電気特性に影響するものが見出されており、仕様への反映を検討する必要がある。**

出口戦略 WG では、これまでに、アプリケーション領域の明確化とロードマップの提示、および普及の効果の提示に取り組み、以下の成果を得た。なお、アプリケーション領域の明確化では、自動車、鉄道車両に加え、東日本大震災発生による環境の変化から、再生可能エネルギーの重要性が上がったことを受けて、ここに焦点を合わせて調査を進めた。(i) アプリケーション領域の明確化とロードマップの提示では、① 自動車への適用について、**自動車用 SiC 導入のロードマップ 1 次案**を作成した。2020 年時点に求められる品質・生産枚数から**高品質低コスト結晶成長技術の量産化が必要**であることを提示した。また、環境対応車の例としてプリウスを取り上げ、パワー

制御ユニットに使われるパワー半導体の進化をまとめた。**Si-IGBTの性能は理論限界に近づいており、SiC-MOSでその限界を超えることが可能**である。ただし、現状では、鉄道車両と異なり、SiC導入の具体的発表はない（海外メーカ注視必要）。②鉄道車両への適用調査については、国内3社での開発が進んでおり、平成24年には一部で実用化が開始された。ダイオードのみSiCのハイブリッド型だが、約30%の損失低減を実現している。フルSiC化など、今後の動向について調査を継続する。③再生可能エネルギーでは、太陽光、風力、地熱発電について調査を開始した。**コスト的に厳しい面はあるがMVA級の変換器の必要性は高まっており、パワーエレクトロニクスへのニーズ、SiC採用の可能性について調査を継続する。**(ii)普及の効果の提示では、**自動車へのSiC適用によるCO₂削減効果として2020年時点で年間320万トン、自動車、鉄道車両を除く分野で年間110万トンが見込める**ことを示した。更に、再生可能エネルギーの動向も踏まえ、幅広いニーズ調査を行う。

(2) 成果の評価

1) 目標の達成度

自主設定目標に沿って、予定通り推移した。技術調査WGでは、中間段階として技術ベンチマークを実施、世の中のレベルに対するプロジェクト目標の妥当性を客観的に評価し、本プロジェクトにおける技術開発の立ち位置を明確化するとともに、一部で目標の再設定の必要性を提示した。出口戦略WGでは、自動車に対するSiC適用のロードマップ1次案をまとめ、高品質低大口径結晶成長技術の量産化の必要性を提示した。鉄道車両ではSiCダイオードの適用が始まり、今後の動向を注目すべきことを示した。また、再生可能エネルギー分野はSiCの適用分野として注視すべきことを示した。SiC適用によるCO₂削減効果を提示した。

2) 成果の意義

上述の如く、プロジェクトの目標および進捗度合を**客観的に評価する機能**を果たしていることは、プロジェクト実施テーマの重み付けと効率的な推進にとって、また、環境変化への迅速な対応にとって、大きい意義を果たしている。例えば、加工、革新的結晶成長への優先的予算配分や、エピにおけるスループット検証の必要性提示、デバイスにおけるオン抵抗低減目標の再設定の必要性提示など。

震災の後、省エネの重要性がクローズアップされ対応しているが、一方でCO₂削減も忘れてはならない問題である。原発依存度が低下した今、CO₂削減は、近年の異常気象が引き起こす甚大な災害を見ても、待ったなしの状況にある。SiC適用によるCO₂削減効果を示したことは、CO₂削減の必要性を改めて問い直し、SiCの重要性を示すものとして重要である。

SiCパワー半導体の市場規模拡大には、自動車、鉄道車両以外への適用展開が欠かせない。再生可能エネルギー分野への適用可能性に着目した調査を開始したことは、本プロジェクトで開発するMVA級の変換器技術の適用拡大の点からも意義がある

ものと考えられる。

MVA 級になると、1 チップの電流容量を増やして、できるだけ多並列数を減らしたい。これは、自動車用でも同じことである。そうなる**と決め手は高品質な結晶欠陥の少ないウエハであり、本プロジェクトの高品質大口径結晶成長技術開発の意義を改めて明示したことは重要である。**

3) 知的財産権の取得

ユーザサイドの仕様を提示することにより、共通基盤評価技術開発と連携し、標準化戦略として検討する。

4) 成果の普及

特許、論文、外部発表は未だないが、調査結果の内、可能な部分は、SiC 関連の国家プロジェクトメンバーおよび国内の SiC 関連企業、大学等研究機関が参加して構成される SiC アライアンスを通して、共有化が図られている。

表Ⅲ. 2.6-1 特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT※出 願	査読付き	その他	
H22FY	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件
H23FY	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件
H24FY	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件

4) 最終目標達成可能性

これまでの調査に基づく絞り込みとシステムとデバイスを繋ぐ技術者・研究者（実装、変換器技術者）の招聘やヒアリングによる体制強化により、後半 2 年間で予定する適用分野別の仕様明確化、産業貢献度（市場規模、CO₂ 削減効果）ロードマップ作成を行い達成する。招聘するメンバーには同じ NEDO プロの研究開発項目②次世代パワーエレクトロニクス技術開発のメンバーを加え、相乗効果を発揮させる。

表Ⅲ. 2.6-2 最終目標達成のための課題と解決法

最終目標	研究内容	課題	解決策
出口として期待されるアプリケーション領域の明確化、国内外の関連情報の収集/調査、ロードマップの提示、SiC 関連仕様の標準化検討、並びにインバータ試作などによる実証実験を行う	自動車、鉄道車両に加え再生可能エネルギーを調査しアプリケーション領域を明確化する 技術ベンチマーク、技術ロードマップの更新 適用分野別に産業貢献度(市場規模、CO ₂ 削減)ロードマップ作成 適用分野別に要求仕	① 再生可能エネルギー分野の SiC 適用可能性明確化 ② 技術ベンチマーク、ロードマップ更新 ③ ロードマップ作成 ④ 要求仕様、CO ₂ 削減量明確化	① これまでの調査を基にした絞り込みとシステムとデバイスを繋ぐ技術者等へのヒアリング ② 学会参加、ヒアリングによる更新 ③ ①に基づく年次推移予測 ④ ①に基づく数値化とまとめ

	様、CO2 削減量をまとめる 自動車用インバータ試 作などによる実証実験	⑤ インバータ試作に よる実証実験	⑤ インバータ試作
--	--	----------------------	-----------

IV. 実用化、事業化の見通しについて

1. 実用化、事業化の見通し

1.1 ウエハ関連技術(結晶成長、加工、大口径エピ)

1.1.1 集中研開発技術の実用化・事業化の見通し

1.1.2 日進分室開発技術の実用化・事業化の見通し

1.1.3 富津サイト(分室)開発技術の実用化・事業化の見通し

非公開

1.2 デバイス／変換技術・機器技術

1.2.1 集中研開発技術の実用化・事業化の見通し

1.2.2 伊丹分室開発技術の実用化・事業化の見通し

非公開

本節の研究開発項目に関する実用化・事業化の見通しの詳細は、参画企業の企業戦略と密接に関係することから、事業原簿非公開版のみに記載することとし、ここでは報道等から予測可能な範囲での事業化の見通しをNEDOの見方として簡潔に記載する。なお、NEDOは、随時、委託先ならびにプロジェクト参画企業にヒアリング等を行って、参画企業の積極的な事業展開意欲と見通しを確認している。このため、プロジェクト終了後早い時期に、成果が事業化できるものと考えている。

SiCパワーデバイスの研究開発意欲は国内外で確実に高まっている。耐圧1200V級までのSiCデバイス・変換器に関しては、Siに対する高い優位性が、既に十分確認され、SiCデバイスの製品化も始まっている。比較的作りやすいSiC-SBDは、既にサーバー電源のハイグレード品等で市場を確立しつつあり、2010年から市販が開始された低耐圧MOSFETも順次市場を拡大していくものと予測される。このため、本プロジェクトの成果である高品質・大口径SiCウエハが市場に参入する初期フェーズにおいては、1200V級デバイスの展開による需要が期待できる。ウエハの品質が安定して供給体制が整えば、デバイスの低コスト化が可能となって、産業規模もさらに拡大するものと思われる。

また、一部企業によって、電車などにSiCデバイスを適用したインバータが試験搭載されつつあることからわかるように、高耐圧SiCデバイスの需要は確実にある。

そのため、本プロジェクトで開発中の 3kV 級の高特性デバイス・変換器についても、早期の事業化が期待できる。

1.3. 集中研開発技術の実用化、事業化の方策

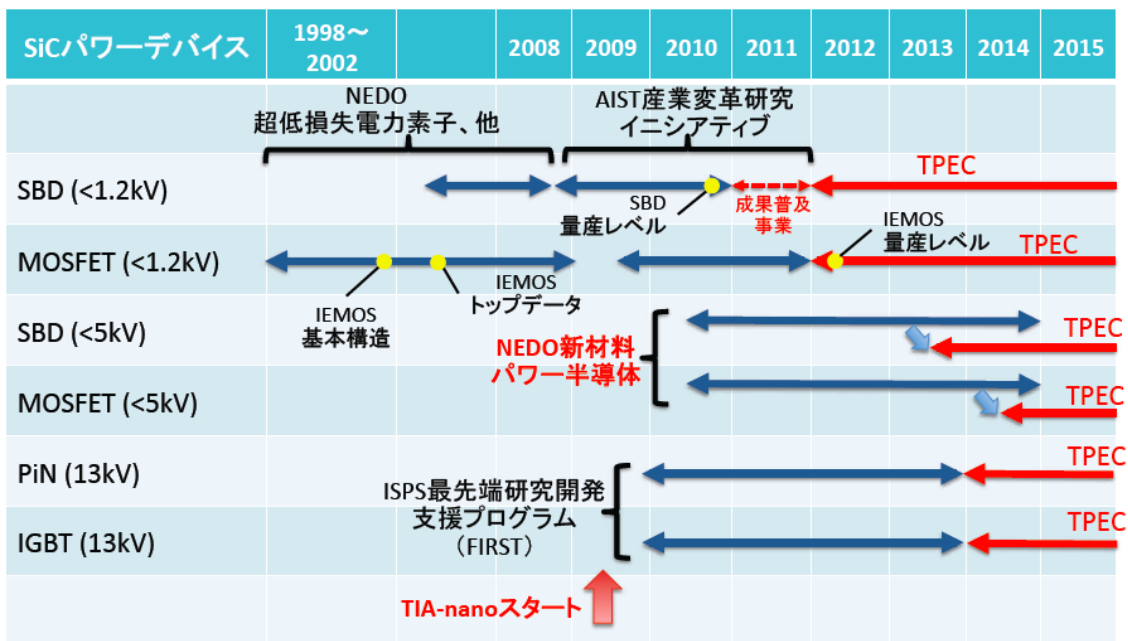
昨今、DRAM・システム LSI 中心に、我が国半導体産業における国際的産業競争力の低下が叫ばれ、業界として憂慮すべき事態に陥っている。この原因に関してはいろいろなことが言われているが、資金力も含めた企業の研究開発力の低下や内製を重視する日本固有の研究開発マインド、要素技術の統合化段階における最終製品構想力の欠如等が大きな要因を占めていることは間違いない。この事態を打開するため、産学官連携に基づく「オープンイノベーション」をキーワードにして産業競争力開発拠点構築の試みが進み出している。海外では同様な試みが 10 年以上前からスタートし、シリコンナノエレ分野の IMEC（ベルギー）等、大きな成果を生み出しているとされている。我が国における取り組みの代表的なものが、経済産業省や文部科学省の強力な支援のもとで動きだした「つくばイノベーションアリーナ（TIA-nano）」であり、その中では「パワーエレクトロニクス」がコア技術領域の一つとして取り上げられ、本プロジェクトの集中研究拠点が置かれている産業技術総合研究所の各種リソースを活用して関連技術の産学官ハブ機能（人材育成も含む）を果たせるようにプラットフォームとしての体制構築が進みつつある。

一方、上記プラットフォームにおいては、H24 年度からパワエレ関連企業の共同研究連合体として、「つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション（TPEC）」が発足した。ここでは SiC パワーデバイス試作のための専用プロセスラインをコアインフラとして、材料企業からデバイス企業、並びにそこで試作されたデバイスチップのユーザとしての応用機器企業が 10 社以上も集まって研究開発コンソーシアムを形成している。参画企業にとっては、最終の応用機器のイメージを共有しながらアライアンスを組もうとする他業界の参画者と共にそれに必要なデバイス技術や応用技術を公平なコストシェアで開発出来る仕組みであり、TPEC で創出された成果は基本的にはすべて使うことが出来る。即ち、最終的な投資に至るビジネス判断ができる段階まで、コスト削減と同時に単独で行う以上の開発成果を得られるのがその最大のメリットである。

本プロジェクトの集中研での開発成果を実用につなげる仕組みとして、プロジェクト参画企業が自社に持ち帰るのはもちろんであるが、TIA-nano 並びに TPEC の活用を想定している。技術開発体制としてのオープンイノベーションの重要性が増す中、特に異業種にまたがるいくつかの成果を組み合わせることで実用化につなげるためには、上

記のような技術開発拠点を効率的に活用することが我が国産業競争力の迅速な確保につながるものと信じる。

事実、TPEC の前身である産総研「産業変革研究イニシアティブ」において、単一の SiC MOSFET のデバイス性能としては世界トップデータとして認知されていた「IEMOS」の量産化技術に2企業（デバイス企業と装置企業）と産総研が共同研究体制で取り組み、3年弱で容量や信頼性／安定性を確保した量産レベルのデバイス化技術を確立した結果、企業側では早期に応用機器（汎用インバータや太陽光パワーコンディショナー）のプロトタイプを完成させるに至っている。もともと、IEMOS の技術は過去の NEDO プロにおいて開発されたものであり、その基本技術をいわゆる「死の谷」を克服して実用化につなげるためには、上記の TPEC のような体制が極めて有効に機能することが実証されたと考えられる。図IV.2-1 に他国家プロジェクト成果も含めて、TPEC を活用してそれらの成果を実用化につなげる中期的計画を示す。



図IV.2-1 プロジェクト成果の実用化へ向けた中期的計画

1.4 大口径対応デバイスプロセス装置開発における実用化・事業化の見通し

1.4.1 日新イオン機器における実用化・事業化の見通し

(1) 成果の実用化可能性

本量産装置が市場に投入されるのは、デバイスメーカーの6インチ生産ラインが構築される時期である。デバイスメーカーの6インチ生産ライン構築は、所望性能のSiCデ

デバイスが販売価格に見合うコストで製造できることが不可欠である。本 NEDO プロジェクトの成果として 6 インチ SiC ウエハの開発は達成されつつあり、6 インチウエハが上市されるタイミングに合わせて本装置を導入できるように進めている。

(2) 事業化までのシナリオ

SiC パワーデバイスが、市場に受け入れられるには性能・価格の両面を勘案して Si-パワー MOSFET に対して競争力を有する必要がある。本装置開発は、デバイス性能・コスト・歩留りの改善に寄与すると思われる。

他方、GaN 等の他の新材料のパワーデバイスへの適用の研究開発も平行して進んでいるので、どの方式が主流になるかは看過できない関心事である。

(3) 波及効果

開発された高温加熱注入装置技術は、SiC のみならず Si 半導体への注入その他で結晶欠陥を残さずに注入する技術として広く IC 製造技術に寄与する可能性があると考えられる。

1.4.2 日立国際電気における実用化・事業化の見通し

(1) 成果の実用化可能性

本プロジェクトでは新規開発部である高温炉部分以外、販売実績の多い既存熱処理装置をベースとしているため、ウエハハンドリング部やガス供給及び排気部、コントローラ部等は非常に信頼性が高い。また、新規開発部のハード性能確認は既に完了しており、成果の装置技術としての適用可能性は明確で、実用化の見通しは十分にあると言える。

(2) 事業化までのシナリオ

助成期間である平成 23 年度中にハード性能の確認まで終了しており、平成 24 年度からは本装置にて顧客へのプロセスのデモンストレーションを行っていく。このデモンストレーションを通じて本装置のプロセス性能を証明し、国内を中心に SiC 量産ラインを投資予定の顧客へ順次販売していく予定である。

(3) 波及効果

本プロジェクトの成果物である量産対応型超高温アニール装置の活用により、SiC デバイスの品質、歩留まりの向上が見込まれ、本格的な SiC デバイスの普及を加速させることが期待される。

添付資料

特許、論文、外部発表等リスト

1. 結晶成長技術開発

1.1 高品質・大口徑 SiC 結晶成長技術開発

1.1.1 高品質・大口徑 SiC 結晶成長技術開発（その1） （SiC ウエハ量産化技術（助成事業）を含む）

【特許】

非公開

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月日
1	浦上泰、郡司島造、山口聡、近藤宏行、廣瀬富佐雄、安達歩、恩田正一	FUPET, DENSO, Toyota Central R&D Laboratories, Toyota Motor Corporation	TSD Reduction by RAF(repeated a-face) Growth Method	Materials Science Forum Vols. 717-720 (2012) pp 9-12	有	2012.5.14
2	郡司島造、浦上泰、廣瀬富佐雄、安達歩、恩田正一、西川恒一	FUPET, Toyota Central R&D Laboratories, DENSO, Toyota Motor Corporation	Fourier Transform Analysis of Basal Plane Dislocation Structure in Repeated a-face Grown Crystals	Materials Science Forum Vols. 717-720 (2012) pp 319-322	有	2012.5.14

【社外発表】

番号	発表者	所属	タイトル	発表先	発表年月日
1	廣瀬富佐雄、山内庄一、恩田正一	FUPET, デンソー	SiC パワー半導体用基板ウエハ作製プロセス	第3回 SiC 技術フォーラム	2011.7.25
2	浦上泰、郡司島造、山口聡、近藤宏行、廣瀬富佐雄、安達歩、恩田正一	FUPET, DENSO, Toyota Central R&D Laboratories, Toyota Motor Corporation	TSD Reduction by RAF(repeated a-face) Growth Method	International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2011 (ICSCRM2011)	2011.9.12
3	郡司島造、浦上泰、廣瀬富佐雄、安達歩、恩田正一、西川恒一	FUPET, Toyota Central R&D Laboratories, DENSO, Toyota Motor	Fourier Transform Analysis of Basal Plane Dislocation Structure in Repeated a-face Grown Crystals	International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2011 (ICSCRM2011)	2011.9.14

		Corporation			
4	浦上泰,郡司島 造,山口聡,近藤 宏行,廣瀬富佐雄 安達歩,恩田正一	FUPET, デンソー, 豊田中研, トヨタ自動車	RAF 法(Repeated a-face)による螺旋転位の低減	SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第 20 回講演会	2011.12.8
5	郡司島造,浦上 泰,廣瀬富佐雄,安達歩,恩田正一,西川恒一	FUPET, 豊田中研, デンソー, トヨタ自動車	RAF 結晶中の基底面転位構造のフーリエ変換解析	SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第 20 回講演会	2011.12.8

1.1.2 高品質・大口徑 SiC 結晶成長技術開発（その2） （SiC ウェハ量産化技術（助成事業）を含む）

【特許】

非公開

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月日
1	佐藤信也, 柘植弘志 勝野正和, 藤本辰雄 大橋 渡	新日本製鐵	Interaction of 6H-type stacking faults with threading screw dislocations in PVT-grown 4H-SiC single crystals	Material Science Forum, 717-720 (2012) p.411	有	Accepted on 2011.12.7 発表:2012.6
2	勝野正和, 藤本辰雄 矢代弘克, 柘植弘志 佐藤信也, 平野芳生 矢野孝幸, 大橋 渡	FUPET 新日本製鐵	Complex behavior of threading dislocations observed in PVGT-grown 4H-SiC single crystals	Material Science Forum, 717-720 (2012) p.355	有	Accepted on 2011.12.7 発表:2012.6
3	柘植弘志, 佐藤信也 勝野正和, 藤本辰雄 大橋 渡	新日本製鐵	Growth of high quality 4H-SiC crystals in controlled temperature distributions of seed crystals	Material Science Forum, 717-720 (2012) p.13	有	Accepted on 2012.1.12 発表:2012.6

【社外発表】

番号	発表者	所属	タイトル	発表先	発表年月日
1	柘植弘志, 佐藤信也 勝野正和, 藤本辰雄 大橋 渡	新日本製鐵	Growth of high quality 4H-SiC crystals in controlled temperature distributions of seed crystals	International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2011 (ICSCRM2011)	2011.9.12
2	佐藤信也, 柘植弘志 勝野正和, 藤本辰雄 大橋 渡	新日本製鐵	Interaction of 6H-type stacking faults with threading screw dislocations in PVT-grown 4H-SiC single crystals	International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2011 (ICSCRM2011)	2011.9.12
3	勝野正和, 藤本辰雄 矢代弘克, 柘植弘志 佐藤信也, 平野芳生 矢野孝幸, 大橋 渡	FUPET 新日本製鐵	Complex behavior of threading dislocations observed in PVGT-grown 4H-SiC single crystals	International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2011 (ICSCRM2011)	2011.9.12
4	藤本辰雄	新日本製鐵	昇華再結晶法によるバルク結晶開発状況	日本学術振興会第161委員会第71回研究会	2011.9.22
5	藤本辰雄	新日本製鐵	昇華再結晶法によるSiC単結晶基板の開発動向	SiC及び関連ワイドバンドギャップ半導体研究会第20回講演会	2011.12.8
6	藤本辰雄, 平野芳生 柘植弘志, 勝野正和 佐藤信也	新日本製鐵	6インチ口径炭化ケイ素(SiC)ウェハ	半導体オブザイヤー2012・半導体用電子材料部門優秀賞 授賞式受賞講演	2012.6.13

1.2 革新的 SiC 結晶成長技術開発

1.2.1 革新的 SiC 結晶成長技術開発（その1） ガス法

【特許】

非公開

【論文】

なし

【社外発表】

番号	発表者	所属	タイトル	発表先	発表年月日
1	山内庄一, 原一都, 廣瀬富佐雄 恩田正一	FUPET, デンソ ー	SiC 単結晶成長技術の現 状と課題	応用物理学会結晶 工学分科会	2011.6.23
2	S.Yamauchi, K.Hara,S.Onda	FUPET, DENSO	SiC Bulk Growth Using HTCVD	International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2011 (ICSCRM2011)(招待 講演)	2011.9.12
3	J.Kojima, K.Hara, S.Yamauchi, S.Onda	FUPET, DENSO	Development of SiC Single Crystals Growth	2011 International Conference on Solid State Devices Materials (SSDM2011) (ワー クショップ講演)	2011.9.30

1.2.2 革新的 SiC 結晶成長技術開発（その2） 溶液法

【特許】

非公開

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月日
1	三谷武志,岡村雅之 高橋徹夫,小松直佳 加藤智久,奥村元	FUPET 産総研	Control of Void Formation in 4H-SiC Solution Growth	Materials Science Forum Vols. 717-720 (2012) pp 57-60	有	2012.5.14
2	Toru Ujihara, Shigeta Kozawa, Kazuaki Seki, Alexander, Yuji Yamamoto, Shunta Harada,	名古屋大学	Conversion Mechanism of Threading Screw Dislocation during SiC Solution Growth	Materials Science Forum, Volumes 717-720, pp.351-354	有	2012.5.14
3	Shunta Harada, Alexander, Kazuaki Seki, Yuji Yamamoto, Can Zhu, Yuta Yamamoto, Shigeo Arai, Jun Yamasaki, Nobuo Tanaka, Toru Ujihara	名古屋大学	Polytype Transformation by Replication of Stacking Faults Formed by Two-Dimensional Nucleation on Spiral Steps during SiC Solution Growth	Crystal Growth and Design 12 (6) pp.3209-3214. (DOI:10.1021/ cg300360h)	有	2012.5

【社外発表】

番号	発表者	所属	タイトル	発表先	発表年月日
1	三谷武志,岡村雅之 高橋徹夫,加藤智久 N.セングッドバン,奥村 元	FUPET 産総研	4H-SiC 溶液成長における ポイド状欠陥の抑制	第58回 応用物理学関係 連合講演会	2011.3.24
2	Alexander, 関和明, 小澤茂太, 山本裕治, 宇治原徹, 竹田美和	名古屋大学	溶液成長における 4H-SiC(0001)面上の成長 多形変化過程の観察	第 58 回 応用物理学関係 連合講演会_(2011 年春季)	2011.3.24
3	小澤茂太, 関和明, 山 本祐治, Alexander, 宇治原徹, 竹田美和	名古屋大学	溶液成長により作製した SiC 結晶の転位挙動解析	第 58 回 応用物理学関係 連合講演会_(2011 年春季)	2011.3.24
4	宇治原徹	名古屋大学	溶液法による SiC 結晶成長 -多形制御・結晶性-	第 58 回 応用物理学関係 連合講演会_(2011 年春季)	2011.3.24
5	丸山伸伍, 松本祐司	東工大応セ ラ研	レーザ加熱高温真空レー ザ顕微鏡の開発と SiC 溶液 成長に向けたフラックスの 熱挙動観察	第58回 応用物理学関係 連合講演会_(2011 年春季)	2011.3.24
6	宇治原徹, 小澤茂太, 山本祐治, 関和明, 原 田俊太	名古屋大学	-SiC 溶液成長における貫 通らせん転位分解メカニズ ム	第 72 回応用物理学学会学術 講演会_(2011 年秋季)	2011.8.30

7	丸山伸伍, 松本祐司	東工大応セラ研	高温真空レーザー顕微鏡による SiC 溶液成長に向けた Si-Ni 系フラックス薄膜の熱挙動観察	第 72 回応用物理学学会学術講演会_(2011 年秋季)	2011.8.30
8	宇治原徹、小澤茂太、関和明、Alexander、山本祐治、原田俊太	名古屋大学	Conversion Mechanism of Threading Screw Dislocation During SiC Solution Growth	The 2011 International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM 2011)	2011.9.14
9	三谷武志、岡村雅之、高橋徹夫、小松直佳、加藤智久、奥村元	FUPET, 産総研	Control of void formation in 4H-SiC solution growth	International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2011 (ICSCRM2011)	2011.9.12
10	原田俊太、Alexander、関和明、山本祐治、宇治原徹	名古屋大学	Polytype transformation path on 4H-SiC during top-seeded solution growth	2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2011)	2011.9.28
11	三谷武志、岡村雅之、高橋徹夫、小松直佳、加藤智久、奥村元	FUPET, 産総研	4H-SiC 溶液成長におけるボイド抑制	第 41 回結晶成長国内会議	2011.11.4
12	丸山伸伍、松本祐司	東工大応セラ研	High-throughput screening of Si-Ni-based metal flux for SiC solution growth by using a high-temperature vacuum laser microscope	2011 MRS (Materials Research Society) Fall Meeting & Exhibit	2011.11.28
13	三谷武志、岡村雅之、高橋徹夫、小松直佳、加藤智久、奥村元	FUPET, 産総研	4H-SiC 溶液成長におけるボイド抑制法	SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第 20 回講演会	2011.12.8
14	宇治原徹、原田俊太、山本祐治、関和明、堀尾篤史、三橋貴仁	名古屋大学	SiC 溶液成長における貫通転位の交換過程 – Ultra-High Quality の可能性 –	SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第 20 回講演会	2011.12.9
15	小沼碧海、丸山伸伍、松本祐司	東工大応セラ研、FUPET	高温真空レーザー顕微鏡による SiC 溶液成長に向けた Si-Cr 系フラックス薄膜の熱挙動観察	第 59 回応用物理学関係連合講演会_(2012 春季)	2012.3.17
16	原田俊太、山本祐治、関和明、堀尾篤史、三橋貴仁、宇治原徹	名古屋大学	溶液成長における貫通らせん転位低減の促進	第 59 回応用物理学関係連合講演会_(2012 春季)	2012.3.17
15	小沼碧海、丸山伸伍、松本祐司	東工大応セラ研	高温真空レーザー顕微鏡による SiC 溶液成長に向けた Si-Cr 系フラックス薄膜の熱挙動観察	2012 春季第 59 回応用物理学関係連合講演会	2012.3.15-18

2. 大口径 SiC ウェハ加工技術開発 (大口径 SiC ウェハ加工要素検証を含む)

【特許】

なし

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月日
1	山田秀貴, 山口作太郎, 山本 則正, 加藤智久	中部大学, FUPET, 産総研	Cutting speed of electric discharge machining for SiC ingot	Materials Science Forum Vols. 717-720 (2012) pp 861-864	有	2012.5.22

【社外発表】

番号	発表者	所属	タイトル	発表先	発表年月日
1	山田秀貴, 山口作太郎, 加藤 智久	中部大学, FUPET, 産総研	Cutting speed of electric discharge machining for SiC ingot	International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2011 (ICSCRM2011)	2011.9.12
2	赤星勇利, 半月寛之, 山田秀貴, 山本則正, 渡邊裕文, 浜辺誠, 河原敏男, 山口作太郎	中部大学, 産総研	被加工物回転台を用いたワイヤ放電加工	平成23年度電気関係学会 東海支部連合大会	2011.9.26
3	山田秀貴, 赤星勇利, 半月寛之, 山本則正, 山口作太郎, 加藤智久	中部大学, FUPET	加工速度による SiC 放電加工への影響	平成23年度電気関係学会 東海支部連合大会	2011.9.26
4	前田 弘人, 出口 喜宏, 高鍋 隆一, 松田祥伍, 加藤 智久	FUPET、産総研、タカトリ、旭ダイヤ	高速マルチワイヤソーによる SiC インゴットの高速切断	SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第20回講演会	2011.12.8
5	堀江 裕一郎, 淵山 正毅, 多和靖展, 吉川直樹, 加藤 智久	FUPET、産総研	SiC 単結晶切断用マルチワイヤ放電加工機の開発	SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第20回講演会	2011.12.8
6	堀田 和利, 河田 研治, 長屋 正武, 貴堂 高德, 加藤 智久	FUPET、産総研	ステップポリッシュ法による SiC ウェーハ加工歪層深さの評価	SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第20回講演会	2011.12.8
7	山田秀貴, 山本 則正, 山口作太郎, 加藤 智久	中部大学, FUPET, 産総研	SiC 放電加工の放電率と加工速度との関係	SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第20回講演会	2011.12.8
8	山本 則正, 赤星勇利, 山田秀貴, 加藤 智久, 山口作太郎	中部大学, FUPET, 産総研	インゴット回転台を用いた炭化ケイ素のワイヤ放電加工	SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第20回講演会	2011.12.8
9	堀田 和利, 河田 研治, 長屋 正武, 貴堂 高德, 加藤 智久	FUPET、フジミ、デンソー、昭和電工、産総研	機械加工された SiC ウェハの加工歪層深さ評価	第59回応用物理学関係連合講演会(2012年春季)	2012.3.17

3. エピタキシャル膜成長技術開発

3.1 大口径対応技術

【特許】

なし

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月日
1	児島一聡、伊藤佐千子、長田晃代、奥村元	FUPET, 産総研	Improvement of homoepitaxial layer quality grown on 4H-SiC Si-face substrate lower than 1 degree off angle	Materials Science Forum Vols. 717-720 (2012) pp 141-144	有	2012.5.14
2	工藤千秋、田村謙太郎、藍郷崇、伊藤渉、西尾譲司、児島一聡、大野俊之	FUPET、パナソニック、ローム、新日鐵、東芝、産総研、日立	Dependence of growth condition on 4H-SiC epitaxial layer quality with wafer size corresponding to 150 mm	Proceedings of 2012 MRS Spring Meeting	有	

【社外発表】

番号	発表者	所属	タイトル	発表先	発表年月日
1	児島一聡、伊藤佐千子、長田晃代、奥村元	FUPET、産総研	Improvement of homoepitaxial layer quality grown on 4H-SiC Si-face substrate lower than 1 degree off angle	International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2011 (ICSCRM2011)	2011.9.14
2	児島一聡、長田晃代、奥村元	FUPET、産総研	4H-SiC 微傾斜Si面基板上に作製したエピタキシャル膜の表面モフォロジーと多形制御	SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第20回講演会	2011.12.8
3	田村謙太郎、大島博典、杉山直之、松畑洋文、北島真、児島一聡、大野俊之	FUPET、産総研	SiC エピタキシャルウエハの帯状欠陥へのバルク基板表面ダメージによる影響	SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第20回講演会	2011.12.8
4	工藤千秋、田村謙太郎、藍郷崇、伊藤渉、西尾譲司、児島一聡、大野俊之	FUPET、パナソニック、ローム、新日鐵、東芝、産総研、日立	Dependence of growth condition on 4H-SiC epitaxial layer quality with wafer size corresponding to 150 mm	2012 MRS (Materials Research Society) Spring Meeting & Exhibit	2012.4.11

3.2 高速・厚膜成長技術

【特許】

なし

【論文】

なし

【社外発表】

番号	発表者	所属	タイトル	発表先	発表年月日
1	石田夕起、高橋徹夫、 奥村 元、荒井和雄、 吉田貞史	産総研	近接垂直ブローCVD 炉を用いた 4H-SiC エピ膜の高速・厚膜成長	第 71 回応用物理学関係学術講演会_(2010 年秋季)	2010.9.14
2	石田夕起、高橋徹夫、 奥村 元、荒井和雄、 吉田貞史	産総研	4H-SiC エピ膜の高速厚膜エピ成長における C/Si 比の影響	SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第 19 回講演会	2010.10.21

4. デバイス/変換器技術・機器技術開発

4.1 新規耐圧構造デバイス

【特許】

非公開

【論文】

なし

【社外発表】

番号	発表者	所属	タイトル	発表先	発表年月日
1	小島貴仁、有吉恵子、 米澤喜幸、原田信介、 田中保宣、奥村元	FUPET、富士電機、東芝、産総研	堆積ゲート酸化膜による 4H-SiCトレンチ MOS キャ パシタの電気特性改善	SiC 及び関連ワイドギャッ プ半導体研究会 第 20 回講演会	2011.12.8
2	原田信介、加藤真、小 島貴仁、有吉恵子、田 中保宣、奥村元	FUPET、産 総研	Determination of optimum structure of 4H-SiC Trench MOSFET	24 th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD2012)	2012.6.5

4.2 高耐圧大容量デバイス/変換器技術 (SiC 高耐圧大容量パワーモジュール検証を含む)

【特許】
なし

【論文】
なし

【社外発表】

番号	発表者	所属	タイトル	発表先	発表年月日
1	渡邊寛、中田修平、中木義幸、藤井善夫、大塚健一、川上剛史、今泉昌之、豊田吉彦、炭谷博昭、大森達夫	FUPET、三菱電機	3.3kV 級SiC-SBD の開発	平成23年電気学会産業応用部門大会	2011.9.8
2	小西和也、中田修平、中木義幸、中尾之泰、長江明美、豊田吉彦、炭谷博昭、大森達夫	FUPET、三菱電機	発熱解析によるSiC-SBDにおける欠陥の影響評価	第59回応用物理学関係連合講演会_(2012年春季)	2012.3.17
3	渡邊寛、中田修平、中木義幸、藤井善夫、大塚健一、川上剛史、小山アキ洋、今泉昌之、豊田吉彦、炭谷博昭、大森達夫	FUPET、三菱電機	3.3kV SiC-SBDの試作評価	平成24年電気学会全国大会	2012.3.21

5 大口径対応デバイスプロセス装置開発

5.1 大口径対応デバイスプロセス装置開発（その1）

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内/外国/PCT	出願日	状態
1	(株)日新イオン機器(株)	特願 2012-149845	国内	H24/07/03	出願

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

【論文】

なし

【社外発表】

番号	発表者	所属	タイトル	発表先	発表年月日
1	飛川和紀	日新イオン機器(株)	IMPHEAT high temperature ion implantation system	IIT2012 (Ion Implantation Technology 2012)	2012.06.25.

5.2 大口径対応デバイスプロセス装置開発（その2）

【特許】

なし（準備中）

【論文】

なし

【社外発表】

なし

6. 共通基盤評価技術開発

【特許】

なし

【論文】

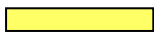
番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月日
1	大谷昇	関西学院大、FUPET	Toward the reduction of performance-limiting defects in SiC epitaxial substrates	ECS Transactions 41(8), 253-260	有	2011.10
2	山口博隆、松畑洋文	FUPET、産総研	平行ビームを使ったX線トポグラフィによる SiC の転位観察	日本結晶学会誌 54, 18-23	有	2012.2
3	山口博隆、松畑洋文	FUPET、産総研	Threading dislocations in 4H-SiC observed by double-crystal X-ray topography	Materials Science Forum, Vols. 725	有	2012.6
4	山下任、百瀬賢治、武藤大祐、下平祥貴、山竹邦明、宮坂佳彦、佐藤貴幸、松畑洋文、北畠真	FUPET、昭和电工、産総研	Characterization of triangular-defects in 4° -off 4H-SiC epitaxial wafers by synchrotron X-ray topography and by transmission electron microscopy	Materials Science Forum, Vols. 717-720 (2012) 363-366	有	2012.6
5	大谷昇、勝野正和、藤本辰夫、佐藤信也、柘植弘志、大橋渡、松畑洋文、北畠真	FUPET、関西学院大、新日鐵	High resolution x-ray diffraction (HRXRD) studies of the initial stages of PVT-growth of 4H-SiC crystals	Materials Science Forum, Vols. 717-720 (2012) 489	有	2012.6
6	畠山哲夫、一ノ関共一、杉山直之、松畑洋文	FUPET、産総研	Correlation between Surface Morphological Defects and Crystallographic Defects in SiC	Materials Science Forum, Vols. 717-720 (2012) 359-362	有	2012.6

【社外発表】

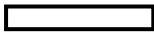
番号	発表者	所属	タイトル	発表先	発表年月日
1	山下任、宮坂佳彦、山竹邦明	FUPET	透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた、4° -off 4H-SiC エピウェーハの三角欠陥起点の解析	日本顕微鏡学会 第 67 回 学術講演会	2011.5.16
2	北畠真	FUPET	国家プロジェクト「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」における、共通基盤評価技術の取り組みー表面欠陥と電気特性/歩留まり/信頼性との紐付けー	第 6 回 SiC 研究会個別討論会「SiC デバイス特性に関連した欠陥評価」	2011.7.29

3	山下任、百瀬賢治、武藤大祐、下平祥貴、山竹邦明、宮坂佳彦、佐藤貴幸、松畑洋文、北島真	FUPET、昭和電工、産総研	Characterization of triangular-defects in 4° -off 4H-SiC epitaxial wafers by synchrotron X-ray topography and by transmission electron microscopy	International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2011 (ICSCRM2011)	2011.9.12
4	大谷昇、勝野正和、藤本辰夫、佐藤信也、柘植弘志、大橋渡、松畑洋文、北島真	FUPET、関西学院大、新日鐵	High resolution x-ray diffraction (HRXRD) studies of the initial stages of PVT-growth of 4H-SiC crystals	International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2011 (ICSCRM2011)	2011.9.13
5	畠山哲夫、一ノ関共一、杉山直之、松畑洋文	FUPET、産総研	Correlation between Surface Morphological Defects and Crystallographic Defects	International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2011 (ICSCRM2011)	2011.9.13
6	山口博隆、松畑洋文	FUPET 産総研	Threading dislocations in 4H-SiC observed by double-crystal X-ray topography	14th International Conference Defects-Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors	2011.9.28
7	大谷昇	関西学院大、FUPET	(Invited) Toward the reduction of performance-limiting defects in SiC epitaxial substrates	220th ECS (Electrochemical Society) Meeting	2011.10.10
8	北島 真	FUPET、パナソニック	Testing system for the SiC wafers and epitaxial films	第 31 回 LSI テスティングシンポジウム	2011.11.9
9	山下任、宮坂佳彦、山竹邦明、武藤大祐、百瀬賢治、佐藤貴幸、松畑洋文、北島真	FUPET 昭和電工 産総研	透過型電子顕微鏡による 4H-SiC エピウェーハの三角欠陥起点の解析	SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第 20 回講演会	2011.12.8
10	山下任、百瀬賢治、武藤大祐、下平祥貴、小田原道哉、影島慶明、宮坂佳彦、山竹邦明、佐藤貴幸、松畑洋文、北島真	FUPET 昭和電工 産総研	斜入射放射光 X 線トポグラフィおよびフォトルミネッセンスイメージングによる 4H-SiC エピウェーハ上三角欠陥の構造解析	SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第 20 回講演会	2011.12.8
11	田中俊明、杉山直之、大島博典、松畑洋文、北島真	FUPET 産総研	エピ膜結晶表面の積層欠陥と微小欠陥の光学観察と構造評価	SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第 20 回講演会	2011.12.8
12	田中俊明、松畑洋文、北島真	FUPET 産総研	4H-SiC エピ膜結晶の励起準位と積層欠陥エネルギー準位の相関解析	SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第 20 回講演会	2011.12.8
13	鮫島純一郎、石山修、下里淳、田村謙太郎、大島博典、山下任、田中俊明、杉山直之、関根正樹、先崎純寿、松畑洋文、北島真	FUPET、産総研	4H-SiC 表面欠陥とゲート酸化膜寿命	第 59 回応用物理学関係連合講演会(2012 年春季)	2012.3.18
14	北島 真	FUPET	SiC ウェハの検査・評価技術	応用物理学会 第 40 回薄膜・表面物理セミナー「半導体 SiC の基礎と応用」	2012.8.3

技術分野	分野構造		評価パラメータ	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021			
	大項目	中項目		小項目	重要課題											
パワー半導体 デバイス技術	Si/パワー デバイス	ウエハ	IGBTの低損失化 (薄ウエハ化)	6		8										
			MOSFETの低損失化 (SU型)	85		65						2.5@600 15@1200				
			ウエハ	6										8		
		SiC/パワー デバイス	ウエハ	低損失化・高耐圧化	<10000		5000			1000						
				MOSFET オン抵抗 ($m\Omega\text{cm}^2$) @耐圧(V)	7@1200				3@1200							
				SiC-SEB V@耐圧(V)(200A/cm ²)	1.7@1700		2.2@3300									
		GaN/パワー デバイス	ウエハ	大容量化・高耐圧化	30@600	30@1200	60@600	60@1200	100@600	20@3300 100@1200						
				IGBT 電流(A)@耐圧(V)								20@>10k				
				材料・プロセス・デバイス 技術	SiC-SEB SiC-MOS-FET											
		GaN/パワー デバイス	ウエハ	バルクGaNウエハ	2		4					6				
	GaN on Si ウエハ			>1E5		>1E4					>1E4					
	転位密度 (1/cm ²)			4	6	8										
	GaN/パワー デバイス	ウエハ	低損失化・高耐圧化	>1E9	>1E8		>1E8									
スイッチングデバイス オン抵抗 ($m\Omega\text{cm}^2$) @耐圧(V)			1@200		3@600		1@600				5@1200 on GaN					
大容量化・高耐圧化			10@200		20@600		50@600				50@1200 on GaN					
実装技術	実装部品	材料・デバイス構造	GaN スイッチング FET ノーマルOFF													
		バルクGaN技術	大口径高品質 結晶成長技術													
		ウエハ径・欠陥密度・デバイス構造	FET on GaN 基板													
回路・部品	回路・制御技術	高出力パワー密度	15		20			30		40						
		使用温度高温化	樹脂材料/周辺部品 使用可能温度(°C)	175		200					250					
		高温実装材料														
回路・部品	回路・制御技術	回路・制御技術	ワイドバンドギャップ半導体デバイス 特性に適した回路・制御技術													
		受動部品	キャパシタ、インダクタ													



薄黄色の網かけは当該時点での要求スペックを示す



箱の長さは当該技術が出現する時期を示す



矢印の長さは当該技術が実用に供される期間を示す

(ナノテク・部材イノベーションプログラム、ITイノベーションプログラム、エネルギーイノベーションプログラム)

「低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト」

基本計画

電子・材料・ナノテクノロジー部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

エネルギー生成方法の多様化は、資源枯渇および地球温暖化の解決に向けた重要な検討課題であるが、中でも、電気エネルギーへの移行は、課題解決の有力な手段のひとつである。電力の生成から消費に至るフローにおいて、電力利用効率向上の手段として、パワー半導体デバイスによる電力変換・制御（直流・交流変換、周波数制御等）は、すでに多くのフェーズで行われている。さらに、これまでパワー半導体が適用されていなかった機器への展開や、新たな応用分野が急激に広がることによって、パワー半導体デバイスが利用される局面は大幅に増加すると見込まれる。たとえば、ハイブリッド自動車の普及など電化の進む社会への転換がその起動力の一つである。また、高度に情報化が進む今日の社会では、ブロードバンドの普及、IT機器の高度化・設置台数の急激な増加に伴い、機器が消費する電力の急激な増大が見込まれており、情報関連機器の省エネルギー化が重要な課題となっている。このためにも、パワー半導体デバイスが電力利用効率向上に大きく役立つと考えられる。このように、パワー半導体デバイスによる電力損失の低減は低炭素社会の実現に向けて極めて重要である。

現在は、パワー半導体デバイスの材料として主にSi（シリコン）が使用されているが、電力損失がSiの1/100以下、数kVの高耐圧性など、パワー半導体として極めて優れた性能を有した新材料SiC（炭化珪素）の実用化が期待されている。SiCパワー半導体デバイスを用いることにより、従来のSiデバイスを用いた電力変換モジュールと比べ、電力損失が格段に低い、また小型で大電力を扱える電力変換機器を実現することが期待される。インバータ等の電力変換装置の適用範囲が鉄道や次世代自動車などの環境産業をはじめとして極めて広いことから、社会全体への波及効果が極めて大きく、さまざまな産業において、その成長の鍵となるものである。したがって、パワー半導体デバイスおよび電力変換機器における技術力は我が国産業の国際競争力を左右するものである。

我が国における関連技術開発としては、主として産業用モータ駆動用を想定して、SiCウエハ品質と関連づけたSiCデバイスの大容量化/高信頼化の技術開発、或いはインバータコア技術開発がNEDOプロジェクト（「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技

術開発」2006年～2008年など）において行われてきている。同プロジェクトにて開発されたSiCウエハ品質向上および評価技術・デバイスプロセス技術・回路技術・熱設計技術等、全体的な技術の高度化の結果として、Siデバイスに比べ大幅な損失低減（同定格インバータユニットにおいて、現在主流のSi-IGBTを適用した場合に比べ、70%損失を低減）が実証されるに至っている。

IT産業の電力消費低減に寄与するため、データセンタやその電力源に用いる交流・直流変換等の高効率化を実現したり、電気自動車のように新たに拡大しつつある応用製品に適した電力変換機器を実現したりするためには、具体的な適用製品を想定して、高電流密度化（大容量化）や、デバイス・機器の信頼性向上といったSiCデバイス性能の高度化を進めることが重要である。同時に、SiCデバイスとの組み合わせにおいて力を発揮する材料・部品・回路設計・ノイズ対策や熱設計などの課題を解決していく必要がある。

一方、SiCパワー半導体デバイスの効率向上・適用範囲拡大を支え、普及の鍵となるのは、SiC半導体材料の高品質化と供給安定化であるが、現在のSiCウエハ市場は、4インチウエハが限定された規模で生産されている状況であって、かつ海外企業による寡占状況と言わざるを得ない。このことから生じる供給安定性への不安及び高価格が開発・普及への足かせになっている。それだけでなく、諸外国においてはごく最近になって6インチウエハ実現がアナウンスされ、かつ、高耐圧領域でのSiC電力変換器の実証が進みつつある。

このような背景のもと、6インチ級SiCウエハ量産化技術の構築と対応するデバイス化プロセス装置開発、並びにSiCパワー半導体デバイスを用いた電力変換器の効能実証を早期に実現することが緊急の課題となった。SiCパワー半導体デバイスの応用製品としては、急激に増大しつつあるIT産業の電力消費量増加の対策となるデータセンタ用電源や、その電力源として意味がある分散型太陽光発電システムなどに用いる電力制御機器が有望であり、その高効率化・小型化・高信頼化に貢献するデバイス技術開発・設計技術開発等を前記したウエハやプロセス装置開発と並行して行うことは極めて重要である。

以上のように、これらの課題に対して積極的な取り組みを行うことは、電力分野における省エネルギー技術の国際的牽引、及び我が国の産業競争力強化にとって極めて重要な意味を持つものである。

そこで上記を目的として、本研究開発プロジェクトをナノテク・部材イノベーションプログラム、ITイノベーションプログラム、およびエネルギーイノベーションプログラムの一環として、実施する。

（2）研究開発の目標

本研究開発の目標は、高品質・低コストな大口径SiCウエハ製造技術、SiC高耐圧スイッチングデバイス製造技術、応用に即した電力変換器の設計技術開発、システムシステムにおけるSiCスイッチングデバイスの効果実証、さらに高温実装技術をはじめとする要素技術の確立である。

研究開発項目①においては、別紙の研究開発計画に基づき、平成24年度までに基盤技術を確立し、平成26年度までに①高品質・大口径結晶成長、ウエハ加工、エピタキシャル膜形成まで一貫した製造技術の確立、②高耐圧スイッチングデバイス製造技術を確立し、これを用いた低損失電力変換器の試作・実証等を行う。

また、SiC大口径ウエハ化に関して、現状の昇華法結晶成長技術を6インチ対応とし、ウエハ加工プロセスと併せ6インチ4H-SiCウエハを実現する。また、ウエハ加工要素プロセスの能力検証を加速し、SiCデバイス化のための高温プロセス装置等に関して6インチ対応装置を開発すると共に、3kV以上の高耐圧領域でのSiCダイオードを用いた低損失パワーモジュールの性能検証を行う。

さらに、SiCの特長である高い接合温度において動作するSiCパワー素子の近傍に配置できる高耐熱受動部品を開発するとともに、それらを配置したパワーモジュールを試作して各実装部品間の相互の影響を検証し、それによって各開発部品の優位性を明らかにする。

研究開発項目②においては、別紙の研究開発計画に基づき、データセンタやその電源源としての分散型太陽光発電システムにおいて交流・直流変換等、電力制御に用いられているパワーデバイスを、従来のシリコンに代わりより低損失かつ高耐電圧であるSiCを用いたものとする技術開発を行うとともにシステムレベルでの実証を行う。これにより、電源で発生するエネルギー損失を飛躍的に削減する技術を確立するため、平成24年度末までに次の最終目標を達成する。

- ・電力容量が2kW級のサーバ電源のプロトタイプを試作し、その電力変換効率が負荷50%で94%以上であることを実証する。
- ・電力容量が30kW級の太陽光発電用パワーコンディショナのプロトタイプを試作し、これが定格出力時に98%以上のシステム効率をもつことを実証する。
- ・デバイス温度200～250℃で動作させることを可能とする高温実装技術を開発し、60W/cm³級の出力パワー密度を持つ革新的電力変換器の動作検証が可能なレベルの要素技術を確立する。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施するとともに、国内外の関連情報の収集及び調査等を行う。研究開発項目は以下の通り設定する。

研究開発項目① 低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト

- (1) 高品質・大口径SiC結晶成長技術開発／革新的SiC結晶成長技術開発
[委託事業・共同研究事業（NEDO負担率：1／2）]
- (2) 大口径SiCウエハ加工技術開発 [委託事業]
- (3) SiCエピタキシャル膜成長技術（大口径対応技術／高速・厚膜成長技術）

[委託事業]

- (4) SiC高耐圧スイッチングデバイス製造技術 [委託事業]
- (5) SiCウエハ量産化技術開発 [助成事業(助成率: 2/3)]
- (6) 大口径SiCウエハ加工要素プロセス検証 [委託事業]
- (7) SiC高耐圧大容量パワーモジュール検証 [委託事業]
- (8) 大口径対応デバイスプロセス装置開発 [助成事業(助成率: 2/3)]
- (9) 高耐熱部品統合パワーモジュール化技術開発 [委託事業、共同研究事業(NEDO負担率: 2/3)]

研究開発項目(9)は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する事業であり、原則、委託事業として実施する。ただし、上記以外のもの(※1)は、共同研究事業(NEDO負担率: 2/3)として実施する。

※1 民間企業単独、民間企業のみでの連携、大学等の単独等、産学官連携としないもの。

研究開発項目② 次世代パワーエレクトロニクス技術開発(グリーンITプロジェクト)

- (1) SiCパワーデバイスを用いたデータセンタ用サーバ電源技術開発
[共同研究事業(NEDO 負担率: 1/2)]
- (2) SiCパワーデバイスを用いた太陽光発電用パワーコンディショナ技術開発
[共同研究事業(NEDO 負担率: 1/2)]
- (3) 次世代SiC電力変換器基盤技術開発 [委託事業]

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、研究開発項目①のうち(1)から(4)まで、(6)および(7)は経済産業省が、企業、大学等の研究機関(委託先から再委託された研究開発実施者を含む)から公募によって研究開発実施者を選定し、共同研究契約等を締結する研究体を構築して開始したものであり、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下「NEDO」という。)が本研究開発の運営・管理を承継するに当たっては、その時点までの進捗状況を踏まえた研究開発内容・計画及び実施体制の妥当性について、外部有識者による審議を含めた評価を行った上で最適な研究開発体制を構築し、業務委託契約を締結して実施する。

上記以外の研究開発項目は、NEDOが、単独ないし複数の原則本邦の企業、大学等の研究機関(原則、本邦の企業等で日本国内に研究開発拠点を有していること。なお、国外の企業等(大学、研究機関を含む)の特別の研究開発能力、研究施設等の活用または国際標準獲得の観点から国外企業等との連携が必要な部分を、国外企業等との連携により実施することができる。)から公募によって研究開発実施者を選定し実施する。

本研究開発において、NEDOが主体となつて行うべき基礎的・基盤的研究開発である研究開発項目①のうち（１）から（４）、（６）、（７）および（９）並びに研究開発項目②の各事業は委託または共同研究により実施し、市場化に向けた産業界の具体的な取り組みが示されるべき実用化研究開発である研究開発項目①のうち（５）および（８）の事業は助成（助成率2/3）により実施する。

また、研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、研究体にはNEDOが委嘱する研究開発責任者（プロジェクトリーダー）として、研究開発項目①及び②については独立行政法人産業技術総合研究所 先進パワーエレクトロニクス研究センター長 奥村 元氏を、さらに研究開発項目②に関してはサブプロジェクトリーダーとして、独立行政法人産業技術総合研究所 先進パワーエレクトロニクス研究センター 清水 肇氏を置き、その下に研究者を可能な限り結集して効果的な研究開発を実施する。

（２）研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及びプロジェクトリーダーと密接な関係を維持しつつ、事業の目的及び目標、並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて、外部有識者の意見を運営管理に反映させる技術検討委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、四半期に一回程度プロジェクトリーダーとともに事業の進捗について報告を受けること等により進捗の確認及び管理を行うものとする。

３．研究開発の実施期間

本研究開発の期間は、平成21年度から平成26年度までの6年間とする。ただし、この期間内において、研究開発項目毎に研究開発期間を設定する。研究開発項目①のうち（１）から（４）については、平成22年度から平成26年度までの5年間とし、（５）から（８）については、平成23年3月から平成24年2月までとし、（９）については、平成24年度から平成26年度までの3年間とする。

また、研究開発項目②については、平成21年度から平成24年度までの4年間とする。

４．評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義及び将来産業への波及効果等について、研究開発項目①については、外部有識者による研究開発の中間評価を平成24年度、事後評価を平成27年度に実施し、研究開発項目②については、事後評価を平成25年度に実施する。中間評価結果を踏まえ、事業の加速・

縮小など必要な体制の再構築を含め、後年度の研究開発に反映することとする。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

5. その他の重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

① 共通基盤技術の形成に資する成果の普及

得られた研究開発成果のうち、共通基盤技術に係るものについては、プロジェクト内で速やかに共有した後、NEDOおよび実施者が協力して普及に努めるものとする。

② 知的基盤整備事業又は標準化等との連携

得られた研究開発の成果については、知的基盤整備事業又は標準化等との連携を図るため、データベースへのデータの提供、海外展開を行う上で、性能評価指標やインターフェース等に関する標準案の検討及び提案等を積極的に行う。

③ 知的所有権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的所有権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第26条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先及び共同研究先に帰属させることとする。

なお、国際展開を見据えた、パワー半導体デバイスおよび電力変換機器に係る技術に係る知財管理を適切に行うこととする。

(2) 基本計画の変更

NEDOは、研究開発内容の妥当性を確保するために、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、プログラム基本計画の変更、第三者の視点からの評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(3) 根拠法

本プロジェクトは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1項第1号ニ、第2号及び第3号に基づき実施する。

(4) その他

受託者は、本研究開発から得られる成果の産業面での着実な活用を図るため、事業化への計画を立案する。事業の進捗等を考慮して計画の必要な見直しを行うとともに、研究開

発期間中であっても、実用化が可能な成果については、迅速な事業化に務めるものとする。具体的には、高品質・低コストな大口径S i Cウエハ及びS i C高耐圧スイッチングデバイスの実用化・事業化に加え、最終製品であるオールS i C電力変換器搭載ハイブリッド／電気自動車・鉄道等の実用化についても具体的な計画の立案に務めるものとする。

6. 基本計画の改訂履歴

- (1) 平成21年3月、「次世代パワーエレクトロニクス技術開発（グリーンITプロジェクト）」制定。
- (2) 平成23年1月、「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」制定。
- (3) 平成23年3月、「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」および「次世代パワーエレクトロニクス技術開発（グリーンITプロジェクト）」の基本計画の統合に伴う改定。
- (4) 平成23年7月、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法の改正に伴う改訂。
- (5) 平成24年3月、研究開発項目①（9）の追加による改定。

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目①「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」

(1)「高品質・大口径S i C結晶成長技術開発／革新的S i C結晶成長技術開発」

1. 研究開発の必要性

次世代パワー半導体として期待されるS i Cの開発・普及にあたっては、ウエハの品質及び供給の不安定性、高コストが最大のボトルネックとなっている。高品質・低コストな大口径S i C結晶成長技術の確立により、S i Cウエハを安定的に供給することによって、多量のウエハを必要とするデバイス及びインバータ等のモジュール開発を加速し、早期の実用化につなげることが可能となる。

2. 研究開発の具体的内容

現在のS i C結晶成長法である昇華法は、生産性、品質、コストともに課題がある。これらを解決するため、昇華法の抜本的な高度化のほか、飛躍的な品質や生産性の向上が期待される革新的な結晶成長技術（ガス法、液相法等）の開発を行う。また、大口径・高品質S i C結晶の評価技術を開発する。

3. 達成目標

昇華法において、以下の項目を満たす製造技術を確立する。なお、平成24年度までに基盤技術を確立し、平成25年度以降、大口径ウエハ加工技術、大口径エピタキシャル膜成長技術の成果を合わせ、結晶成長から加工、エピタキシャル膜成長に至るまでの一貫した6インチエピウエハ製造技術として確立する。また、革新的結晶成長法についても、平成24年度までにそのための要素技術を確立し、平成26年度までに将来的に昇華法を凌駕するポテンシャルを評価可能な大型結晶を実現してその可能性を検証する。さらに、大口径・高品質S i C結晶の評価技術を確立する。

【中間目標】

昇華法においては、口径6インチで、

- ① 10^3 個/cm²台の転位密度を実現するのに必要な高品質化にかかわる基盤技術を確立する。
- ② 0.5mm/h以上の結晶を実現するのに必要な成長速度向上にかかわる基盤技術を確立する。

革新的結晶成長法においては、高速性、高品質性、長尺化／口径拡大等の各課題に対する要素技術を確立し、口径2インチ、厚さ1mmの4H-S i C単結晶の成長を実現する。

【最終目標】

昇華法においては、口径6インチ、長さ50mm以上で、

- ① 有効面積（端部3mmを除く）全域において転位密度 1×10^3 個/cm²以下の結晶を実現する。
- ② 有効面積（端部3mmを除く）全域において転位密度 5×10^3 個/cm²以下の結晶を成長速度0.5mm/h以上で実現する。

革新的結晶成長法においては、口径2インチ以上、長さ20mm以上の4H-SiC単結晶を実現した上で、昇華法に対する優位性を検証する。

研究開発項目①「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」

(2)「大口径S i C ウェハ加工技術開発」

1. 研究開発の必要性

S i Cはダイヤモンドに次ぐ高硬度を有しているため精密加工が極めて困難であり、例えば、現在の4インチウェハの切断に際しては、高価なダイヤモンドスラリーを多量に使わなければならないうえ、その切断スピードは極めて遅く、数日を要している。結晶の大口径化に伴い、既存の加工技術では、更に時間を要することになり、加工工程がボトルネックになるおそれがある。また、加工コストはウェハのコストの約1/3を占めており、低コスト化の観点からも技術の高度化が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

切断、研削、研磨の各技術について、6インチウェハに対応した高精度化、高速化及び低コスト化に資する加工技術の開発を行う。具体的には、高速・高効率・低損傷な切断技術の開発、研削精度向上のためのナノレベルでの砥石制御技術、耐薬品性の高いS i Cに有効な化学的機械的研磨法（CMP）の開発等を行う。

なお、これらの各工程は前後の工程に大きな影響を与えるため、密接な連携を図りつつ研究開発を実施することとする。

3. 達成目標

6インチ結晶において、以下の項目を満たす実用的な加工（切断・研削・研磨）技術を確立する。なお、平成24年度までに基盤技術を確立し、25年度以降、大口径結晶成長技術、大口径エピタキシャル膜成長技術の成果を合わせ、結晶成長から加工、エピタキシャル膜成長に至るまでの一貫した6インチエピウェハ製造技術として確立する。

【中間目標】

ウェハ切断技術に関して、3インチ結晶で切断速度150 μ m/分以上、同時切断枚数10枚以上、切り代300 μ m以下を実現する。また、3～4インチ結晶/ウェハを対象にして、切断、研削、粗研磨、仕上げ研磨の各要素工程の最適化、及び接続最適化を行い、6インチS i C結晶/ウェハ加工の高速・高品質な一貫プロセス最適化の方針を決定する。

【最終目標】

6インチ結晶/ウェハを対象に、以下の効率性を実現する。

- ① 切断：速度300 μ m/分以上、同時切断枚数10枚以上、切り代250 μ m以下
- ② インゴットから表面仕上げ精度Rm s（表面荒さ）0.1nm@2 μ m×2 μ mのベアウェハを実現する統合加工プロセスとして、プロセス時間24時間以内

研究開発項目①「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」

(3)「SiCエピタキシャル膜成長技術(大口径対応技術/高速・厚膜成長技術)」

1. 研究開発の必要性

エピタキシャル膜の品質はデバイスの性能・歩留まりに直接影響するため、その技術開発は極めて重要である。SiCエピタキシャル膜の作製にあたっては、1,600°Cから1,800°Cの高温環境下でシランガス(SiH₄)とプロパンガス(C₃H₈)からSiCを合成するため、高温環境下での極めて精密な制御技術を要する。そのため、SiCデバイスの普及において、エピタキシャル膜成長プロセスの高コスト性がボトルネックになっており、低コスト化には大口径ウエハを同時に多数枚処理できるエピタキシャル膜成長技術及びその品質評価技術の確立が必要である。

一方、デバイスの高耐圧化に対応するためには、数10μm以上の厚いエピタキシャル膜が必要となる。そのため、プロセス時間の観点から、厚いエピタキシャル膜の作製には成長速度が重要であり、高速エピタキシャル膜成長技術が必要となるが、現状デバイス品質との両立は確認されていない。それゆえ、高耐圧デバイスの実現・普及には、量産に対応できる高速成長での高品質・厚膜エピタキシャル膜成長技術及びその特性評価技術の確立が必要となる。

2. 研究開発の具体的内容

SiCウエハの大口径化に対応した、大面積で均一かつ低欠陥なエピタキシャル膜を高スループットで成長できるエピタキシャル膜成長技術及び高耐圧デバイスの作製に対応できる厚膜を高均一・高純度かつ高速で成長できるエピタキシャル膜成長技術を開発する。また、その両者に対応した大口径/厚膜SiCエピタキシャルウエハ評価技術を開発する。

3. 達成目標

SiCエピタキシャル膜成長の大口径対応技術と高速・厚膜成長技術を確立する。大口径対応技術については、平成24年度までに基盤技術を確立し、平成25年度以降、大口径結晶成長技術、大口径ウエハ加工技術の成果を合わせ、結晶成長から加工、エピタキシャル膜成長に至るまでの一貫した6インチエピウエハ製造技術として確立する。高速・厚膜成長技術については、平成24年度までにプロトタイプ炉によって要素技術開発を進め、平成25年度以降、高耐圧デバイス用厚膜エピタキシャル膜成長技術の確立を目指すとともに、高耐圧デバイス製造技術開発のために厚膜・高純度エピウエハを提供する体制を整える。

【中間目標】

① 大口径対応技術

みなし6インチ径のエピタキシャル膜成長を行い、6インチ成長プロセスにおける問題

点を把握すると共に、当該成長膜に対して以下の品質を実現する。

- ・ 均一度：厚さ±10%、ドーピング濃度±20%
- ・ 品質 エピ成長起因の表面欠陥密度：2個/cm²以下

② 高速・厚膜成長技術

口径2インチ、膜厚50μm以上のエピタキシャル膜に対して以下の品質を実現し、SiC厚膜形成技術を確立する。

- ・ 純度 残留キャリア濃度： 3×10^{14} /cm³以下
- ・ 品質 エピ成長起因の表面欠陥密度：5個/cm²以下

【最終目標】

①大口径対応技術

口径：6インチ、処理枚数：3枚以上のエピタキシャル膜に対し、以下の品質を実現する。

- ・ 均一度：厚さ±5%、ドーピング濃度±10%
- ・ 品質 エピ成長起因の表面欠陥密度：0.5個/cm²以下

②高速・厚膜成長技術

成長速度100μm/h以上で作成した口径4インチ、膜厚50μm以上のエピタキシャル膜に対し、以下の品質を実現する。

- ・ 純度 残留キャリア濃度： 3×10^{14} /cm³以下
- ・ 均一度：厚さ±2%、ドーピング濃度±10%
- ・ 品質 エピ成長起因の表面欠陥密度：1.0個/cm²以下

研究開発項目①「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」

(4)「SiC高耐圧スイッチングデバイス製造技術」

1. 研究開発の必要性

3～5kV領域の高耐圧スイッチングデバイスの実用化により、高速鉄道等のインバータの電力変換効率の向上や小型・軽量化による設計の自由度向上など、低炭素社会の構築、産業競争力強化に極めて大きな効果が期待される。

2. 研究開発の具体的内容

3～5kV級の高耐圧かつ低損失なSiCスイッチングデバイスを製造するための新規耐圧構造の設計／作製技術、高耐圧デバイス酸化膜信頼性向上技術、限界性能向上技術、高耐圧デバイス実装技術、高耐圧デバイス評価技術、大容量電力変換器設計技術の開発を行う。

3. 達成目標

以下の項目を満たすSiC高耐圧スイッチングデバイス製造技術を確立する。

新規耐圧構造デバイスについて、平成24年度までに、当該耐圧構造設計・作製プロセス技術、高耐圧デバイス酸化膜信頼性向上、高耐圧デバイス実装技術、高耐圧デバイス評価技術、高温実装技術などの要素技術を開発し、25年度以降、エピタキシャル膜の成長技術（高速・厚膜成長技術）の成果を活用して、新規耐圧構造を適用した低損失なSiC高耐圧スイッチングデバイスを試作し、動作実証を行う。

高耐圧大容量デバイスについて、平成24年までに、高耐圧大容量デバイス設計・試作技術、限界性能向上技術、電力変換器設計技術などの要素技術を開発する。25年度以降、エピタキシャル膜の成長技術（高速・厚膜成長技術）の成果を活用して、SiC高耐圧大容量スイッチングデバイスの製造技術の確立を進めるとともに、大容量電力変換器の試作を行い、大容量・低損失動作の実証を行う。

【中間目標】

①新規耐圧構造デバイス

より低損失化が可能な新規高耐圧デバイス構造とその作製要素プロセスを開発し、当該構造で耐圧3kV以上の高耐圧SiC-MOSFETを実現する。

②高耐圧大容量デバイス

耐圧3kV以上の高耐圧SiC-MOSFETを実現すると共に、SiC-MOSFET、SiC-SBDを適用した3kV以上の電力変換器モジュールを試作して、当該電圧領域のスイッチング及び多並列接続に関する要素技術を確立する。

【最終目標】

①新規耐圧構造デバイス

必要な各種要素技術を高度化し、耐圧：3 kV以上で特性オン抵抗：15 mΩ cm²以下の高耐圧SiC-MOSFETを実現する。

②高耐圧大容量デバイス

耐圧：3 kV以上、オン抵抗80 mΩ以下（室温環境下）、定格出力電流密度100 A/cm²以上の高耐圧SiC-MOSFETを開発し、当該デバイスを用いたMVA級電力変換器を試作して、その動作時の電力損失が同耐圧のSi電力変換器の50%以下であることを実証する。

研究開発項目①「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」

(5)「SiCウエハ量産化技術開発」

1. 研究開発の必要性

平成22年になり、海外ウエハメーカーによるSiC6インチウエハ実用化の動きがより活発化してきており、平成23年から24年には少量ながら、4インチウエハと同等品質の6インチウエハ試供品が市場投入されると見込まれる。これにより本格展開に向けて大口径SiCウエハの独占供給による価格吊り上げやそれに伴う日本国内関連産業の停滞が懸念される。

この状況を打破するためには、本体プロジェクトによる高品質・大口径化技術開発の完了に先立って、既存技術を活用していち早く6インチウエハを実現することが急務である。早期の6インチ実現を進めることにより、量産化に向けた技術課題の早出しが進むだけでなく、SiC基板供給の海外依存を脱却し、国内SiC基板の安定供給による国内SiC市場の立ち上げ加速化につながる。また、本体プロジェクトで開発を進める高度化技術（高品質・高生産性）の受け皿となるウエハ技術検証ライン構築にも資すると期待できる。

2. 研究開発の具体的内容

昇華法をベースとした既存技術活用により、早期に6インチ4H-SiCウエハ実現にむけた道筋を明確にする。そのために、バルク結晶成長やウエハ加工に関わる大口径対応装置導入・立上げを進め、6インチ4H-SiCインゴットの実現と共に、その量産化に向けた課題抽出を進める。その中では、必要な製造要素技術の工業レベルでの再現性、および量産性の検証を含めた生産性向上技術、低コスト化技術（装置改善・工程改善）、検査技術の開発を並行して進め、月産1,000枚規模のSiCウエハ生産技術へ展開可能な、量産化製造に関する基盤技術を確立する。

上記開発成果は、将来的には、6インチSiCウエハを継続的に試作可能なプロトライン構築に繋げる。そのラインを活用してデバイス・システム開発にウエハ供給を実施し、その評価結果をフィードバックすることで量産化技術開発の加速化を図る。

3. 達成目標

大口径4H-SiCウエハの量産化技術開発可能な環境整備（昇華法結晶成長炉、ウエハ加工装置）を実施し、

- 有効面積（端部3mmを除く）全域において転位密度 1×10^4 個/cm²以下の口径6インチ4H-SiCインゴットを実現する基盤技術を確立する。

または、

- 成長速度 0.25 mm/h以上で転位密度 5×10^4 個/cm²以下の口径6インチ4H-SiCインゴットを実現する基盤技術を確立する。

研究開発項目①「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」

(6)「大口径S i C ウェハ加工要素プロセス検証」

研究開発の必要性

S i C ウェハの加工技術に関して、産業的に見合ったウェハコストを実現するため、インゴット切断、研削、粗研磨（ラッピング）、仕上げ研磨（CMP）の4工程を6インチ級の大口徑ウェハに対応させながら、従来技術を越える高能率、低ダメージ、超平坦化を一貫プロセスとして達成することが、今後の高品質6インチウェハ早期実用化のためには必須となる。しかしながら、高硬脆材料であるS i Cインゴットを能率良く、かつ加工変質層の発生を最小限に抑えてウェハに加工する上記4工程における最適な要素プロセスは、未成熟であると共に個々の能力限界が明確ではない。

特に切断技術においては、ワイヤー速度、ワイヤー張力不足に起因する切断能率の低さが問題視されている。また、上記各工程においては、高能率化と低損傷化の二律背反性がS i Cウェハ加工にとって極めて解決が難しい課題となっており、本体プロジェクトにおける大口徑ウェハ高速一貫加工プロセスの確立のためには、S i C材料に対する各種加工法の特徴、および加工ダメージ層形成過程の高精度な分析を通じて、個々の要素工程の能力限界と最適加工条件を抽出しておくことが早期に求められる。

2. 研究開発の具体的内容

本体プロジェクトにおける大口徑S i Cインゴットから高品質ウェハを実現する大口徑ウェハ一貫加工プロセス開発に資するため、インゴット切断、研削、粗研磨、仕上げ研磨の各要素プロセスに関して、現状技術での試加工実験を通して、能力限界・個別課題の抽出を進め、大口徑S i Cウェハ高速一貫加工プロセス加工への適用性を検証する。

3. 達成目標

切断技術として、ダイヤモンドを使ったマルチワイヤーソーにおいて、S i C 6インチインゴットに対して150 μ m/分以上の高速切断が可能になる最大ワイヤー速度：約4,000m/min、最大張力：70Nの高速高剛性切断技術を実現する。更に、切断、研削、粗研磨、仕上げ研磨の各工程に関して、個々の要素工程の能力限界と最適加工条件（砥石、砥粒、研磨定盤種、装置技術、加工動作管理、能率等）を抽出し、S i Cウェハ加工における高速一貫プロセス確立に資する統合的なデータ蓄積を行う。

研究開発項目①「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」

(7)「SiC高耐圧大容量パワーモジュール検証」

1. 研究開発の必要性

3～5kV領域の高耐圧デバイスの実用化により、高速鉄道等のインバータの電力変換効率の向上や小型・軽量化による設計の自由度向上など、低炭素社会の構築、産業競争力強化に極めて大きな効果が期待される。この電圧領域では、社会インフラとしての応用分野が広いにもかかわらず、SiCを用いたパワースwitchングデバイスやパワーモジュールの開発が諸外国に比べて後手に回っている。しかしながら、パワーモジュール応用がより簡易なダイオードを選択するだけでも、リカバリー損失及びターンオン時のSwitchング損失を低減でき、従来のSiデバイスを用いたものに対して大幅な低損失化・小型化が可能となり、早期実用化に大きな進展が期待できると共に、上記電圧領域におけるAll SiCデバイスパワーモジュール実現に技術的指針を与えられることから、SiCダイオードを用いた高耐圧パワーモジュール検証への早期の取り組みが求められている。

2. 研究開発の具体的内容

高耐圧(3.3kV級)かつ低損失なSiCショットキーバリアダイオードを実現するための新規耐圧構造設計・作製プロセス技術、高耐圧デバイス評価技術の開発を行う。また、当該SiCショットキーバリアダイオードとSwitchング素子としてSi絶縁ゲートバイポーラトランジスタを選択(ハイブリッド構造)した大容量パワーモジュール設計技術を開発し、SiC大容量パワーモジュールの試作/動作実証を行うことで、SiCデバイスの活用が当該電圧領域におけるパワーモジュールでも有効であることを実証する。

3. 達成目標

耐圧3.3kV定格電流75AのSiCショットキーバリアダイオードを開発し、Si絶縁ゲートバイポーラトランジスタと組み合わせて1,000A級大容量パワーモジュールを試作してその動作を実証するとともに、All SiCデバイスパワーモジュール実現に必要とされるSiCFETの仕様に対する技術的指針を得る。

研究開発項目①「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」

(8)「大口径対応デバイスプロセス装置開発」

1. 研究開発の必要性

S i Cデバイス化プロセス技術において、先行しているS iデバイス技術と大きく異なり、更なる開発の必要性があるのは、プロセス温度がより高いイオン注入、活性加熱処理、高温酸化等の高温熱処理プロセス、並びにウエハが透明であることに起因した困難さが残存する露光プロセスである。これらのデバイス化プロセスではS iデバイス用の装置技術を転用することが本質的に困難であり、また、既存のS i C 4インチプロセス装置技術の延長では均一性等の生産レベルで必要とされる性能の達成も困難である。S i Cの6インチウエハが実用化されても以後のデバイス化プロセスで対応できず、このままでは6インチウエハに立脚したデバイス開発に支障を来す。実用化のためには、S i C 6インチウエハを想定した当該デバイス化プロセス装置の開発が不可欠である。

2. 研究開発の具体的内容

S i Cデバイス化プロセスの内、S iデバイスプロセスとは異なる高温プロセス技術、或いは透明基板対応技術に関して、6インチウエハ対応装置を開発する。更に、当該装置を用いたデバイス試作によって最終性能を確認できるよう、研究計画終了後に必要な措置をとる。

3. 達成目標

6インチS i Cウエハを対象に、イオン注入、活性化熱処理、高温酸化等のデバイス化のための高温プロセス装置、或いは透明ウエハ対応露光装置を開発し、所定の処理特性の面内均一性を達成する。具体的には、

イオン注入装置の場合、

- ・ 室温から800°Cまでの全領域でイオン注入が可能なこと
- ・ 温度均一性：6インチ面内：±15°C
- ・ A1注入イオン電流：200μA上

活性化熱処理装置の場合、

- ・ 熱処理温度：1, 800°C以上
- ・ 温度均一性：6インチ面内：±30°C
- ・ 一度に25枚以上処理可能なこと。

高温酸化装置の場合

- ・ 1, 200°C以上の高温でパイロジェニック酸化、及びH₂、NH₃、N₂Oガス処理が可能なこと。
- ・ 温度均一性：6インチ面内：±15°C
- ・ 一度に25枚以上処理可能なこと。

- 1, 100°Cで処理したSiゲート絶縁膜に含まれる金属不純物が $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 未満であること。

露光装置の場合、

- 6インチ4H-SiCウエハに対する重ね合わせ精度に関して、中心点及び4隅において、ばらつき（標準偏差の3倍以内）が65nm以下であることであること。
- 解像度（市販のレジストをもちいた標準プロセス）に関して、350nmのライン&スペースパターンを転写できること。

研究開発項目① 「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」

(9) 「高耐熱部品統合パワーモジュール化技術開発」

1. 研究開発の必要性

Siパワー半導体素子で達成不可能なレベルの小型・軽量電力変換器の実現には、SiCパワー半導体素子の採用と、その高温動作・高速スイッチングが有効である。例えば電気自動車などの応用分野において、これに関連する技術開発に対する期待が大きい。中でも、高耐熱の受動素子等の開発と、それらをパワー半導体素子近傍に配置する実装技術が重要である。しかし、従来のSiパワー半導体素子の動作温度を超える環境に対応する実装技術、並びに実用的高耐熱部品の開発は未着手であり、早期開発が望まれている。

このため、SiC高性能パワー半導体素子を対象にした高温実装技術の開発と、これに適合する高耐熱部品の要素開発を連携して進める必要がある。

2. 研究開発の具体的内容

Siでは動作不可能な接合温度領域（200～250℃）においてSiCパワー素子が高速スイッチング性能を発揮できるよう、開発する耐熱部品をパワー素子近傍に配置するために必要な高信頼接合技術等の実装基盤技術を開発する。

上記の実装技術に対応する高温領域において基本性能（耐電圧・周波数特性等）を有し、かつ実装プロセスに対する耐性を有する受動部品（スナバコンデンサ・スナバ抵抗等）、および過酷なヒートサイクルに耐えるメタライズ放熱基板・配線基板等の構造部材の要素技術を開発する。

部品レベルの耐熱性および電気特性、並びに部品を実装技術によって統合し単一パッケージ化した際の耐熱性および電気特性を評価し、問題点を把握する。これにより、高耐熱動部品と、それに対応した統合モジュール技術を効率的に開発する。

3. 達成目標

接合温度が225℃以上で動作するSiCパワー素子の近傍に、新規開発の高耐熱受動部品を配置したパワーモジュールを試作し、各実装部品間の相互の影響を検証する。また、試作したパワーモジュールの耐熱性と電気特性の評価を通して、高温動作における課題を抽出するとともに、その解決の見通しを示す。

ここで、試作するパワーモジュールは耐電圧1200V／50A級とし、開発・搭載する受動部品および部材の仕様は下記のとおりとする。

(スナバコンデンサ) 静電容量0.1μF級、耐電圧1kV級、共振周波数10MHz級のコンデンサにおいて、使用時の耐熱温度250℃であり、-40～250℃の温度領域における静電容量の変動が±10%以下、かつ、体積が40mm³以下（例えば、5×4×2mm）。

(スナバ抵抗) 抵抗値 $10\ \Omega$ 級、定格電力 $1\ \text{W}$ 級の抵抗体において、使用時の耐熱温度 $250\ ^\circ\text{C}$ であり、 $-40\sim 250\ ^\circ\text{C}$ の温度領域における抵抗値の変動が $\pm 10\%$ 以下、かつ、 $10\ \text{MHz}$ までの周波数領域における抵抗値の変動が $\pm 10\%$ 以下、かつ、体積 $20\ \text{mm}^3$ 以下 (例えば、 $6.3 \times 3.1 \times 1\ \text{mm}$)。

(メタライズ放熱基板) 熱伝導率 $180\ \text{W}/(\text{mK})$ 以上、曲げ強度 $600\ \text{MPa}$ 以上、破壊靱性 $6\ \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 以上の絶縁素材を用いた、サイズ $5000\ \text{mm}^2$ 以上、厚み $1/80\ \text{inch}$ ($0.32\ \text{mm}$) 以下で両面に金属プレートが接合されたメタライズ放熱基板において、耐電圧 $1200\ \text{V}$ 以上、 $-40\sim 250\ ^\circ\text{C}$ の温度範囲での耐ヒートサイクルが 1000 回以上。

(配線基板) 使用時の耐熱温度 $250\ ^\circ\text{C}$ であり、当該温度において耐電圧 $1200\ \text{V}$ 、 $50\ \text{A}$ 級の電流が通電可能な内部配線を有し、かつ、実装されるパワー素子電極に対する内部配線の位置精度 $\pm 20\ \mu\text{m}$ 以下。

研究開発項目②「次世代パワーエレクトロニクス技術開発（グリーンITプロジェクト）」

(1)「SiCパワーデバイスを用いたデータセンタ用サーバ電源技術開発」

1. 研究開発の必要性

近年のIT技術の進展によりIT機器が消費する電力も膨大な量が見込まれている。こうした背景の下、省エネルギー化・地球温暖化解消の観点から、データセンタ用サーバ電源に代表される数kW級電源機器の電力損失の大幅低減と機器小型化の実現が必須課題となっており、その実現には電源機器へのSiCパワーデバイスの適用が有効である。そのためには、SiCパワーデバイスの高性能化とSiCパワーデバイスを適用した電源機器用電力変換器の高度化に関する技術開発が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

電力容量が数kW級のデータセンタ用電源の省エネルギー化、小型化に向け、SiCパワーデバイスの高性能化技術開発を行い、それらの開発により得られた高性能デバイスを電源機器用電力変換器へ適用して電力変換技術の開発を行う。加えて、上記電源のプロトタイプを試作し、その低損失、高効率特性を実証する。SiCパワーデバイス開発においては、SiCダイオード、SiCスイッチングデバイスの高性能化、スイッチング特性改善等の技術開発を実施する。サーバ電源開発においては、電源機器に適した駆動方式、高効率化等に関わる技術開発を行う。

3. 達成目標

耐圧：600V以上、電流容量：40A以上、オン抵抗率： $2.5\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 以下（室温環境下）のSiCスイッチングデバイスを開発する。また、電力容量が2kW級のサーバ電源のプロトタイプを試作し、その電力変換効率が50%負荷で94%以上であることを実証する。

研究開発項目②「次世代パワーエレクトロニクス技術開発」

(2)「SiC パワーデバイスを用いた太陽光発電用パワーコンディショナ技術開発」

1. 研究開発の必要性

パワーエレクトロニクス応用としてモータ駆動と同様に重要な数10kW級の太陽光発電用パワーコンディショナに関して電力損失の大幅低減と機器の小型化を実現するためには、SiCデバイスの適用が有効である。そのためには、SiCパワーデバイスの高性能化と、SiCパワーデバイスを適用したパワーコンディショナの高度化に関する技術開発が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

太陽光発電システム用パワーコンディショナの省エネルギー化、小型化に向け、SiCパワーデバイスの高性能化技術開発を行うと共に、駆動回路方式に対応したSiCデバイスのしきい値制御技術を行う。さらに、それらの開発により得られた高性能デバイスを用いて、太陽光発電システム用パワーコンディショナへ適用する電力変換技術の開発を行う。加えて、上記パワーコンディショナのプロトタイプを試作し、その低損失、高効率特性を実証する。デバイス技術においては、SiCダイオード・SiCスイッチングデバイスの低オン抵抗化技術、しきい値制御技術、変換器の駆動方式、スイッチング技術及び、フィルタの最適化技術開発を実施する。

3. 達成目標

耐圧：1200V以上、電流容量：75A以上、オン抵抗率： $5\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 以下（室温環境下）のSiCスイッチングデバイスを開発する。このSiCスイッチングデバイス技術を用いて、太陽光発電用パワーコンディショナ技術を開発して、電力容量が30kW級の太陽光発電用パワーコンディショナのプロトタイプを試作し、これが定格出力時に98%以上のシステム効率をもつことを実証する。

研究開発項目②「次世代パワーエレクトロニクス技術開発」

(3)「次世代SiC電力変換器基盤技術開発」

1. 研究開発の必要性

高出力パワー密度を持つ革新的電力変換器を実現するためには、パワーデバイスを高速かつ高温で動作させる必要があり、高温環境下での高信頼化技術や周辺回路デバイス等を含めた設計技術と実装技術が不可欠となることから、これらの技術を開発・統合する電力変換器の高出力パワー密度性能を検証する必要がある。

2. 研究開発の具体的内容

次世代パワーデバイスを利用した革新的電力変換器設計技術と高温実装技術等を開発し、それらを取り入れた電力変換器の高出力パワー密度性能の検証を行う。

より具体的には、次世代パワーデバイスを、高温で反復動作させると共にその優れた高温特性の活用を可能とする実装要素技術（配線、絶縁、冷却、回路レイアウト技術等）を開発する。また、高温環境下でのデバイス特性試験を通じて高パワー密度変換器の統合設計体系に高温条件を導入する。これらにより、次世代パワーデバイスを用いた電力変換器の高出力パワー密度性能の向上を図る。

3. 達成目標

次世代パワーデバイスをデバイス温度^(注1) 200～250℃で動作させることを可能とする高温実装技術を開発する。また、デバイス温度250℃という高温動作デバイス条件を取り入れた高出力パワー密度変換器の統合設計技術の適用により、60W/cm³級の出力パワー密度^(注2)を持つ革新的電力変換器の動作検証が可能なレベルの要素技術を確立する。

(注1) 外部環境温度にデバイス自己発熱による温度上昇分を加えた温度をデバイス温度と定義する。以後に記載されるデバイス温度は全て同定義である。

(注2) 出力パワーをSiCパワーデバイス・周辺回路素子・フィルタ・ヒートシンクから成る構成体の総体積により除算したものを出力パワー密度と定義する。

なお、平成22年度計画策定にあたり、産業技術政策動向等および目標の必須性を勘案して基本計画の見直しを行った結果、「研究開発項目③」の「(1) 電力変換器用SiCパワースイッチングデバイス基盤技術」については、当該研究開発は平成21年度をもって終了することとした。