

低炭素社会の実現に向けた  
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく  
イノベーション政策立案のための提案書

## 次世代半導体デバイスの技術開発課題と展望 － SiC 半導体デバイス－

令和 4 年 5 月

**Technological Issues and Future Prospects of the Next Generation  
Semiconductor Devices:**  
SiC Semiconductor Devices

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action  
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構  
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2021-PP-14

## 概要

低炭素化社会に向けて、世界的に再生エネルギーの大幅な導入拡大による供給エネルギーの電力シフトが進行する一方、需要においても情報化社会の進展に伴い電力需要が増加している。またこの傾向は将来、さらに拡大すると考えられる。このような背景を元にパワーデバイス、なかでも SiC デバイスが大きく注目されている。その理由は SiC の持つ広いバンドギャップ、高い熱伝導率などの優れた物性に加えて、次世代半導体の中では結晶製造技術、デバイスプロセス技術が充実しているからである。

本提案書では、SiC のパワーデバイス材料としての特徴と共に、応用が期待される SiC デバイス市場について、特に自動車、エネルギー、情報通信、産業用に注目して、それら市場の現状と将来予測をまとめた。実際に SiC デバイスの実用化は自動車用途などで始まりつつあるが、コスト面では未だに Si との差は大きい。本提案書において以下の政策提言を行った。

SiC パワーデバイスのさらなる普及拡大のためには、低コスト、高効率、高信頼性のデバイス製造技術の開発が必要である。このためには、大口徑で低欠陥密度の SiC 単結晶製造技術および低欠陥密度高効率エピタキシャル膜製造技術、およびデバイス特性に影響する欠陥構造の特定、その生成過程と挙動を解明し制御する欠陥制御技術が重要である。さらにデバイスプロセス技術においても MOSFET のチャンネル形成技術の大幅な改善が必要である。

## Summary

While a shift in the energy supply of electric power is underway worldwide as a result of the significant expansion of renewable energy introduction toward a low-carbon society, the demand for electric power is also increasing in line with the development of an information society. This trend is expected to expand further in the future. Power devices, especially SiC devices, are attracting significant attention reflecting the situation.

The reason is that in addition to the excellent physical properties of SiC such as wide bandgap and high thermal conductivity, crystal manufacturing technology and device process technology are enriched among next-generation semiconductors.

This report summarizes the current status and future forecast of the SiC device market, focusing on the automotive, energy, information and telecommunication, and industrial applications, along with the characteristics of SiC as a power device material. In fact, SiC devices are beginning to be put into practical use in automotive applications, but there is still a large gap with Si in terms of cost. In this report, the following policy recommendations are made.

To further expand the use of SiC power devices, it is necessary to develop low-cost, highly efficient, and highly reliable device manufacturing technologies. For this purpose, it is important to develop SiC single-crystal fabrication technology with large diameter and low defect density, epitaxial film fabrication technology with low defect density and high efficiency, and defect control technology to identify defect structures that affect device characteristics and to clarify and control their formation process and behavior. In addition, in device process technology, significant improvement of MOSFET channel formation technology is also necessary.

## 目次

### 概要

1. SiC 半導体デバイスについて	1
1.1 はじめに	1
1.2 SiC の特徴	1
1.3 SiC 半導体デバイスの特徴	3
2. SiC 半導体デバイスの用途と市場	4
2.1 はじめに	4
2.2 自動車	5
2.3 エネルギー	6
2.4 情報通信	7
2.5 産業用	7
3. SiC 半導体デバイスの製造方法	7
3.1 SiC 単結晶基板の製造方法	7
3.2 SiC 半導体デバイスの製造方法	8
4. SiC 半導体デバイスの課題	9
4.1 単結晶基板製造技術の課題	9
4.2 エピタキシャル成長技術の課題	10
4.3 SiC パワーデバイスプロセスの課題	10
5. まとめ	11
6. 政策立案のための提言	11
参考文献	12

## 1. SiC 半導体デバイスについて

### 1.1 はじめに

パワーデバイスは様々な機器に供給される電力を制御する役割を担っており、交流のモーターで駆動される機器にとって心臓部分となる、電力の出力と周波数の調整のためのパワーコントロールユニット等に用いられている。これは電流をスイッチするトランジスタと、整流するためのダイオードの組み合わせによって作られており、機器の電力利用効率を高めるためには、パワーデバイスの損失を低減することが重要である。特に高電圧で大きな電流を許容するように設計されたパワーデバイスでは素子自身の抵抗によって生じる導通時の発熱は大きなものとなる。これは導通損失と呼ばれる。ワイドギャップ半導体は、バンドギャップが大きくなるにつれて絶縁破壊電界という、アバランシェ降伏の発生に至る臨界電界強度が単調に増大する。素子の設計の際に、電流を遮断するオフ状態では絶縁破壊電界を超える電界がかからないようにする必要があるため、ワイドギャップ材料ではその設計に自由度が大きく、ドーピング濃度が高い (= 低抵抗な) 層を用いて素子が構成できる。そのため導通損失を低減するのが容易となる。

これとは別に、通電を開始・遮断する瞬間にデバイス内部の電荷分布が非定常に変化する際に大きな過渡電流が生じるのがスイッチング損失であり、動作周波数が高いほど顕在化する。パワートランジスタには、バイポーラ型である IGBT と、ユニポーラ型である MOSFET の二つの種類があり、バイポーラ型の方が導通損失を低減するのに有利である一方、スイッチング損失が大幅に増大してしまう。これはキャリア注入によって抵抗を変調させる仕組みに由来したバイポーラ型の欠点である。車載用など大電流が必要となるパワーコントロールユニットを Si で構成する場合、低抵抗化のために IGBT が用いられるが、これを SiC へ置き換えると MOSFET の構造でありながら、同耐圧で導通損失が低いデバイスが実現し、同時にスイッチング損失が大幅に低減できる。

このようにパワーデバイスへの適用においては、SiC を始めとするワイドギャップ半導体には、Si に対する本来的な優位性があり、今後 Si からの置き換えが進むことが大いに期待される。中でも SiC は既に自動車や鉄道への適用が本格化するなどし始めて普及期に入っており、急速な普及が期待されるワイドギャップパワー半導体のトップランナーである。しかしながら未だに結晶成長技術やデバイスプロセス技術が年々進展している最中である一方、コスト面では未だに Si との差は大きく、さらなる技術の進展が望まれる。このような状況を踏まえ本提案書ではパワーデバイス材料としての SiC の特徴のほか、SiC パワーデバイス市場と技術の現状と展望についてまとめた。

### 1.2 SiC の特徴 [1]

ワイドギャップ半導体としてパワーデバイス応用が可能な候補には、SiC のほか、GaN、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ダイヤモンドなどがあるが、既に 6 インチまでのウェハ製造技術が確立されて量産が開始されているだけでなく、p 型・n 型の価電子制御が広い濃度範囲で可能であるのが SiC である。単結晶基板の製造と、そこに成長させる高品質なエピタキシャル膜の成長技術は、高耐圧用の縦型パワーデバイスの形成に必須であり、SiC の大きな魅力となっている。さらに、プロセス技術として重要なイオン注入を用いた価電子制御技術、長期動作に堪える信頼性を持つゲート構造の形成技術等の面でも、ワイドギャップパワー半導体の中で唯一、本格的な実用化のための技術要素が既に揃っている材料であるといえる。

前述のとおり、パワーデバイスの高性能化には導通損失の低減は不可欠であり、導通損失に基づいて半導体材料ごとの性能指標を決めたのが Baliga の性能指数と呼ばれる数値である [2]。これはユニポーラ型デバイスを形成した場合のドリフト抵抗の理論上の下限値であり、各半導体材料の臨界電界強度が大きいほど、またキャリア移動度が高いほど有利となる。Si に比べて大きな臨界電界強度を示す 4H 結晶の SiC では、Baliga の性能指数は 400~500 程度と見積もられている。

これが、SiのようにIGBTを形成せずとも、ユニポーラ型のMOSFETの構造で数kVの中耐圧～高耐圧素子を実現できる理由である。また今後は10kV以上の超高耐圧用途を目的としたSiC製のIGBTの開発も期待される。SiCは、他のワイドギャップ半導体とは異なり間接遷移型半導体であり、少数キャリア寿命が長い。そのためバイポーラ動作を行うときに大きな伝導度変調が可能という利点がある。

結晶構造の観点では、SiCは多数の結晶多形を持つことが特徴であり、代表的なものだけでも3C、4H、6H、15Rなどが挙げられる。この中で、本格的にパワーデバイス応用が進んでいるのは六方晶の4H型であり、その理由は表1のとおり、これらの中でバンドギャップが最も大きく、しかもデバイス構造上重要となるc軸方向の電子移動度が高いためである。4Hのc軸方向にはSi原子層とC原子層が繰り返されており、SiとCの互いのsp<sup>3</sup>混成軌道が4つのSi-C結合を形成している。4H結晶は、六方晶系の中でも図1のようにc軸に沿って4つの原子層を一つの周期とした繰り返しを持つことが特徴である。多くの結晶多型が存在することは、4H相の成長中に誤って他の結晶が混在する可能性を意味し、その抑制によって貫通転位の発生を防ぐことが重要となっている。

表1 SiCの主な結晶多型とその物性 [3]

	3C-SiC	4H-SiC	6H-SiC
周期的積層構造	ABC	ABCB	ABCACB
格子定数(Å)	$a = 4.36$	$a = 3.08 / c = 10.08$	$a = 3.08 / c = 15.12$
バンドギャップ(eV)	2.36	3.26	3.02
臨界電界強度(MV/cm) @ドナー濃度 $10^{16} \text{ cm}^{-3}$	1.4	2.5	2.8
電子移動度( $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	1000	1020( $\perp c$ ) 1180( $\parallel c$ )	450( $\perp c$ ) 100( $\parallel c$ )
熱伝導率( $\text{Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	4.9	4.9	4.9
比誘電率	9.7	9.7( $\perp c$ ) 10.2( $\parallel c$ )	9.7( $\perp c$ ) 10.2( $\parallel c$ )

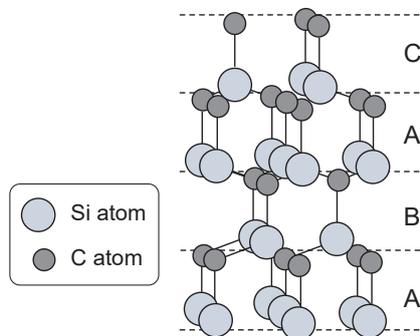


図1 4H-SiCの結晶構造の模式図

### 1.3 SiC 半導体デバイスの特徴

高耐圧で大電流の通電を要求されるパワーデバイスでは、ダイオードも、MOSFET もウェハ上下方向に電流を流す縦型素子が用いられている。集積回路のようにウェハ面内方向に通電する横型構造では、プロセスの自由度が高いものの素子面積が大きくなって、チップ面積当たりの電流の密度が大幅に低下する。さらに素子内の電界が不均一となり、電界集中した領域が素子の耐圧を制限してしまう。そこで縦型素子で、周縁部の電界を緩和するフィールドプレート構造を持たせることで、高耐圧・高電流密度の素子が実現されている。現行の 4H-SiC ウェハには 350  $\mu\text{m}$  程度の厚さのものが主として用いられるが、この厚さ方向に通電する際の抵抗を抑制するために、高ドーパ濃度の低抵抗基板が必要である。ドナーとなる窒素ドーパを行って n 型としたものが (0001) 方向に成長させられる。この低抵抗基板の上に、CVD 法によって、ドーパ濃度を低く制御した高品質なエピタキシャル層を数  $\mu\text{m}$  ~ 10  $\mu\text{m}$  程度の厚さで成長させてエピウェハを得ている。このエピタキシャル層内に、オフ状態で縦方向の高い電圧に耐えるための空乏層が形成される。例えば縦型 MOSFET ではエピタキシャル層側にソース電極が形成される一方、ウェハの裏面にドレイン電極が形成されている。n 型エピタキシャルウェハ部には、アクセプタとなる Al イオンの打ち込みと活性化アニール処理によって p 型のウェル領域が形成され、ウェル上にゲート構造と MOS チャネルが形成される。

従来の縦型 MOSFET では、MOS チャネルを (0001) ウェハの表面に水平方向に形成した構造をしていたが、近年はトレンチ型 MOSFET と呼ばれる、(0001) ウェハ表面を加工してトレンチを周期的に形成し、その側面を縦方向のチャネルとする構造 (図 2 b) の利用が開始されている。トレンチ型とすることで単位面積当たりの縦方向の多数のチャネルに沿って電流が駆動され、電流密度を増大できるため、ウェハ表面加工工程が要求されるものの、特に大電流を必要とする用途で採用されている。しかも、ドリフト層内のチャネルの配置上の都合で生じる JFET 抵抗を削減できる構造であり、またトレンチ側面の (11-20) 面または (1-100) 面に作られる MOS チャネルでは、ウェハ表面に水平方向のチャネルよりも反転層移動度が高いという長所もある。

将来の低抵抗化技術としてスーパージャンクション (SJ) 構造 (図 2 c) の開発も進められている [4]。SJ 構造は既に Si 製パワーデバイスで豊富な実績のある技術であり、n 型エピタキシャル層の領域と p 型エピタキシャル層の領域を隣り合うように作り分けて成長させた構造である。従来の構造ではオフ状態には低ドーパ濃度 (= 高抵抗) の n 型ドリフト層とその上部の p ウェル層の間で空乏層を形成して電流を遮断していたが、SJ 構造では隣り合う p 型、n 型エピタキシャル層の間に空乏層が形成されてオフ状態を作り出すため、比較的高いドーパ濃度 (= 低抵抗) のエピタキシャル層を用いたまま優れた耐圧を実現できる構造である。今後のエピタキシャル成長技術、エッチング技術、イオン注入技術などに基づく発展が期待される。

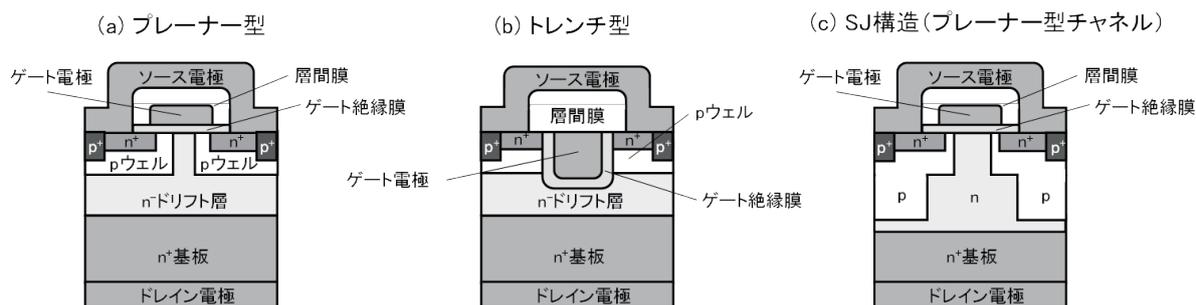


図2 SiCの縦型MOSFETの構造を単純化した模式図

(a) プレーナー型チャンネル (b) トレンチ型チャンネル (c) スーパージャンクション構造  
 (チャンネルはプレーナー型として描いた)

## 2. SiC 半導体デバイスの用途と市場

### 2.1 はじめに

SiC 半導体デバイスは、特にパワーデバイスとしての応用が期待されていて、近年は 1kW から 600kW くらいまでの製品が市販されている [5]。

パワーデバイスの定義は必ずしも明確ではないが、ここでは電力制御用デバイスとする。具体的な素子としてはダイオードとして SBD (Schottky Barrier Diode)、トランジスタとして MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor)、IGBT (Insulating Gate Bipolar Transistor) などである。機能としては直流交流変換、電圧変換、スイッチングなどである。具体的なデバイスとしては交直変換や直流電圧変換のためのコンバータ、直交変換のためのインバータがその大部分を占め、トランジスタとダイオードの組み合わせで作られる [6]。

コンバータとは交流から直流への変換、および直流の電圧変換を行うデバイスのことで、通常はシリコンデバイスが使用されている。電流をパルス的にオンオフして、コンデンサとの組み合わせで電圧を変換する。

パワーデバイスは民生機器を中心に幅広く利用されているが、SiC デバイスの主な市場としては、価格の面などから民生機器用途は少なく、自動車、エネルギー、情報通信、産業用途の、主として 300V 以上の高電圧用が中心でとみられる [7]。それぞれの現在および 2030 年までの市場を株式会社富士経済の調査資料 [8] を元に、パワーデバイス全体市場と対比させて表 2～表 3 にまとめた。なお、パワーデバイス市場全体としては、民生機器用途が最大であるため、この表のパワーデバイス合計市場よりも 1.5 倍ほど大きい。SiC デバイスは 2030 年において数量的には全体の 1% 程度だが、金額的には 10% 程度を占めると予想されている。すなわち用途として高コストをカバーするような大容量用途が多いと考えられるので、電力変換容量としては金額換算に対応した 10% 程度を占めると推定する。

表2 SiCパワーデバイス市場（金額：[8]を元にLCS計算）

		2019	2020	2025	2030
用途	パワーデバイス	10億円	10億円	10億円	10億円
自動車	SiC	17	19	55	85
	全体市場	410	388	584	753
エネルギー	SiC	5	6	16	26
	全体市場	56	58	77	98
情報通信	SiC	11	12	25	35
	全体市場	137	139	169	194
産業（含鉄道）	SiC	12	12	25	39
	全体市場	316	303	364	422
合計	SiC	44	48	119	184
	全体市場	919	888	1,194	1,467

表3 SiCパワーデバイス市場（数量：[8]を元にLCS計算）

		2019	2020	2025	2030
用途	パワーデバイス	百万個	百万個	百万個	百万個
自動車	SiC	31	35	124	242
	全体市場	32,740	30,480	41,020	49,030
エネルギー	SiC	11	13	52	115
	全体市場	3,620	3,670	4,590	5,530
情報通信	SiC	1	58	179	324
	全体市場	9,170	9,340	11,400	12,990
産業（含鉄道）	SiC	31	32	80	146
	全体市場	16,200	15,360	18,250	20,590
合計	SiC	74	138	435	827
	全体市場	61,730	58,850	75,260	88,140

## 2.2 自動車

現代の自動車は多くの自動システムを導入しているため、大量の半導体を使用する。特にパワーデバイスとしてはボディ統合制御システム（加速、減速など）、ステアリング制御システムなどがある（表4）。

更に近年急速に発展している自動運転システムはカメラやLiDAR（Light Detection And Ranging）、超音波センサなどによる対物認識とそのデータ処理システム、運転判断システム、通信システムなどにも膨大に半導体が必要とされる。これらの論理ICや通信機を駆動するための電源回路にはパワーデバイスが必要となる[9]。

それに加えて地球温暖化問題と関連した近年の自動車の電動化へのシフトに伴い、電気自動車（EV：BEV、HEV、PHV）が増加している。EVはモーターで駆動され、例えばテスラ Model Sではモーター最大出力が451 kWであり、4輪駆動であるから、1モーター当たり100 kWの最大出力が与えられる[10]。電圧としては300-400 V程度なので電流としては100-300 Aとなる。また充電時間などの関係からさらなる高電圧化も検討されている[11]。

この制御にはコンバータとインバータが用いられ、現在は価格との関係でシリコンデバイス（IGBT）が主に用いられている。効率はIGBTで92%程度のため、大電力での使用では発熱量が大きく、半導体の保護が必要で、通常水冷などの液体冷却システムが採用されている [12-14]。

ここでは電気自動車の航続距離を延ばす必要から電力変換システムの高効率化と軽量化の要求が大きい。

SiC コンバータ、インバータには Si 系素子に比べて次の三つの特徴がある。

- (1) 高耐熱性のために高温駆動で冷却システムが簡素化できる。
- (2) 電力変換高効率のための電力ロス低減によるバッテリー負荷の軽減。
- (3) 高周波で作動するために素子を小さくできる。

実際アプライドマテリアルズ社によると、駆動用インバータで SiC は IGBT に比較して 4% システム効率が高かったとし、さらに高電圧では 6% の差にもなり得るとしている [15]。このため高効率、軽量、コンパクトが求められるニーズが注目されていて、テスラの電気自動車など高級車では SiC デバイスが採用されているという。また国内各社でも昇圧コンバータへの SiC の採用が始まっている。

自動車向けの世界の SiC デバイス市場およびパワーデバイス市場を 2025 年までは富士経済の資料で、また 2030 年については、それを元に LCS が計算して表 2 に示している [8]。今のところ全体の 5% 程度のシェアであるが、上述の特徴を生かして 2030 年頃には 10% 以上のシェアが見込まれている。また、コストダウンが進めば更にシェアが拡大される可能性もある。

### 2.3 エネルギー

発電、送電、系統制御などは高耐圧大容量の素子が必要となる。太陽電池は直流発電のため、系統接続時および家電製品使用時には交流に変換する必要がある。このためにインバータが使われる。インバータはトランジスタとダイオード、キャパシタなどを組み合わせた回路よりなる。また太陽電池の変動吸収や家庭用夜間電力用に蓄電池を利用するときには、使用電圧の違いから、直流の変圧が必要になり、コンバータが使われる。これもトランジスタとダイオードとキャパシタからなる電力変換回路である。

風力発電は交流発電で、誘導発電機と同期発電機使用の 2 方式がある。同期発電機の場合、風力変動に伴い回転速度が変動し、発電電力の周波数が変動する。このため系統につなぐ場合には一旦直流に変換したのちに再度交流に変換して周波数を安定化させる。これにより風車の回転速度と送電周波数を無関係に制御できることになる。このため、コンバータとインバータが必要になる [9]。

SiC インバータは低抵抗、高周波駆動、高耐圧の特徴により、98% 程度の変換効率となる。すなわち損失は Si インバータの 7～5% から 2% に低減される。大電力に用いられるため変換効率の差は大きい [16, 17]。

電力系統への応用としては、電力貯蔵システム、周波数変換システム、電力安定化システムなどが考えられている。電力系統も大電力のため、電力変換における数% はかなり大きな節電効果が生じるため、今後信頼性が認められ、コストが低下すれば SiC デバイスの利用も広まる可能性

表 4 自動車用半導体の用途別数量（2020） [7]

		2020
EV: 駆動用インバータ	千個	4,537
EV: 駆動用 DC コンバータ	千個	4,537
ステアリング制御システム	千システム	52,770
自動運転システム	千システム	36,940
ボディ統合制御システム	千システム	73,760
車載用充電器	千個	2,255
急速充電スタンド	千台	220
充電スタンド	千基	5,536
ワイヤレス給電システム	千台	6

がある。表2のように、パワーデバイスの20%程度を占めると予想されている。

## 2.4 情報通信

特にデータセンターにおける需要があるといわれている [8]。そのなかでサーバでは小容量であるが、ラックに設置されると単位面積当たりの発熱量が増大し、冷却が重要な課題となっている。また、UPSには蓄電池が使用されるために交直変換かつ中容量の電力変換が必要となる。これらの用途に対して SiC 素子は Si 素子に比べて電力変換損失が小さく素子自体の発熱量が抑えられること、動作周波数が高いために周辺部品も含めて小型化が可能のため狭いラックにも設置しやすいこと、またバンドギャップが大きく耐熱性が高いため冷却の負荷が下がるなどの特徴のため注目されている。

表2のように2025-2030年には、この分野のパワーデバイスのうち SiC は20%弱のシェアを占めると予想されている [8]。

## 2.5 産業用

パワーデバイスは特にモーターの回転制御のためのインバータが多く用いられる。インバータは交流を一旦直流に変換し、次にその直流をパルスに変えて負荷に応じた交流に変換する。モーターを ON-OFF で駆動するのと比べて必要回転数で制御すると消費電力は50%削減できるといわれている。日本国内での電力消費の50%がモーターといわれているため、省電力の効果は極めて大きい。

SiC 素子では電力変換時の高周波化によりモーターの電流を正弦波に近づけることによって高調波損失の抑制につなげることができるとされている。特に MOSFET はバイポーラデバイスと異なりテール電流が低減するために損失を低減できるとされている。Si 素子では耐圧と ON 抵抗の関係で中容量以上ではバイポーラデバイスを使用するが、SiC 素子は耐圧が大きく、ON 抵抗が低くできるので MOSFET 素子による大容量電力変換が可能になる [18]。

鉄道用もモーター駆動にパワーデバイスが用いられる。鉄道のように限られたスペースに設置する必要があり、かつ車両の軽量化も求められている場所では、SiC デバイスの特徴が生かせるため、Si と比較して高価であっても採用されている。

# 3. SiC 半導体デバイスの製造方法

## 3.1 SiC 単結晶基板の製造方法

SiC は1気圧下で調和融点を持たず分解する。このために通常の融液を用いた単結晶育成をすることができない。SiC 単結晶を合成する方法としては、大規模工業生産に用いられている気相法のほかに液相法が知られている。既に述べたとおり、SiC 結晶には種々の結晶多形があり、それらが構造的にも近似し、エネルギー的にも差が少ないため、混晶が生じやすく、また結晶欠陥も生じやすい点に注意が必要である。また単結晶育成に高温が用いられるため、炉材などからの混入不純物の問題もある。これら技術の詳細は次報以降で検討する予定である。

### 3.1.1 気相法

#### (1) 昇華法 [19]

気相法として工業化されている方法は改良レーリー法と呼ばれる昇華再結晶法である。この方法は、高温炉中で原料 SiC 粉末を 2,500°C 程度の高温で昇華させ、その生成 Si と C を少し低温の 2,200°C などに保持した種結晶上に再結晶させる方法である。これが現在実用化されている唯一の方法である。

原料中の不純物が単結晶中に取り込まれるため、高純度原料が必要である。また種結晶の結晶

性、欠陥密度は成長単結晶に引き継がれるため、特に重要である。課題としては結晶成長速度が低い (0.3 mm/h) ことが挙げられている [19]。

## (2) ガス法

CVD 法あるいは化学輸送法とも呼ばれ、Si を含むガス (例えば  $\text{SiCl}_4$ ) と C を含むガス (例えば  $\text{CH}_4$ ) の反応により、単結晶基板上に  $1,600^\circ\text{C}$  近辺で SiC を析出反応させる方法である。成長速度が 3 mm/h 程度と高速であることが特徴で、大型化と低コスト化が課題とされている [19, 20]。

### 3.1.2 液相法

SiC 単独では融解しないので、適当な溶媒中に原料の Si と C を溶解させ、SiC 結晶を析出させる方法が研究開発されている [21]。

液相法は、気相からの成長手法に比べて、過飽和度の小さい平衡状態により近い条件下で固化させるために、原理的に欠陥構造を生じにくい手法である点が長所である。溶媒としては Ti-Si、Si-Cr などが提案されていて良好な結晶品質が得られるが、多核生成や溶媒から結晶中への不純物元素の取り込みが課題とされている。また従来は結晶成長速度が低いことが課題であったが、近年 2 mm/h 程度の高速成長も報告されている [22, 23]。

## 3.2 SiC 半導体デバイスの製造方法

SiC 基板が用いられる。現在、主に 6 インチの単結晶基板が用いられている。デバイス製造プロセスの回路パターンの露光は通常の Si プロセスの方法が適用できる。

### 3.2.1 エピタキシャル膜形成

SiC のエピタキシャル膜については、基板から引き継いだり、成長途中に発生したりする、多形やマイクロパイブなどの欠陥が存在することが古くから問題となっていた。この対策のために基板の欠陥低減、結晶面の選定などが種々検討されていて、現在でも完全に解決されたわけではない。

エピタキシャル成長法としては、通常  $1,400\text{-}1,600^\circ\text{C}$  で  $\text{H}_2$  をキャリアガスとして  $\text{SiH}_4$  と  $\text{C}_3\text{H}_8$  などを用いる CVD 法が採用されているが、LPE 法も検討されている。

エピ層形成において SiC は共有結合性が強いイオンの拡散速度が遅く、ドーピングに拡散法が使えないので通常はエピタキシャル成長中にドーパントを添加する方法が採用される。このキャリア濃度の均一性も課題とされている [23]。

### 3.2.2 電導度制御

イオン注入法による p 型、n 型の電導度制御技術が確立している。ドナーとしては N、アクセプタとしては Al が用いられる。活性化のためのアニール温度としては  $1,600\text{-}1,800^\circ\text{C}$  程度の高温アニールが必要であり、SiC の昇華を防ぐための C 保護膜を形成する必要がある [6]。

### 3.2.3 電極形成

ショットキーバリアが大きいためにオーミックコンタクトの形成が難しい。N 型では Ni、P 型では Al-Si など、さまざまな電極構成が検討されているが、低温での形成では接触抵抗が大きい。電極形成時に高温アニールを行うことにより接触抵抗は著しく小さくできるが、高温によるデバイスの劣化が指摘されている [6]。

### 3.2.4 ゲート形成技術

ゲート酸化膜は SiC の熱酸化または CVD 法による  $\text{SiO}_2$  膜が用いられるが、SiC/ $\text{SiO}_2$  界面に欠

陥準位によって反転層チャネル中の表面電子密度が下がり、かつ移動度が低下することによってチャネル抵抗が大きくなることが問題点として指摘されている。これを抑制する技術として、高温でのNOガス処理によって界面欠陥の原因となるSiC表面の炭素を窒素で置き換えた構造を形成する手法が適用されている [9, 24, 25]。

トレンチゲート構造の形成にはSiC表面加工技術が必要となる。エッチングはSiCが化学的に安定なためSiよりも難しい。ドライエッチングには $\text{Cl}_2 + \text{O}_2$ 、 $\text{CF}_4$ 、 $\text{NF}_3$ 、 $\text{SiF}_4$ 、 $\text{HF}$ などが用いられる [9, 24, 25]。

## 4. SiC半導体デバイスの課題

### 4.1 単結晶基板製造技術の課題

#### 4.1.1 基板コストの低減のための新技術

今後は基板製造の低コスト化と基板高品質化の両立が求められる。まず低コスト化のためには、現行の6インチを、結晶品質を下げることなく8インチへとスケールアップする大口径化技術の確立が期待される。またスループットについては、従来の昇華法のままでは成長速度の向上は見込めず、一方容器内に仕込んだ一定量の原料を使い切るバッチ処理であることによって制約がある。そこで新規製造手法として、 $2,500^\circ\text{C}$ 前後を用いた高温ガス法（高温CVD法）のように、高い成長速度であり、かつ原料ガスを連続的に供給して長尺な結晶成長を実現できる手法が期待される。 $2,500^\circ\text{C}$ という高温での転位の挙動の理解を深め、転位密度を低減する条件の確立が望まれる。また、液相法は原理的に高速でも高品質化できる余地があると考えられ、特に広い面積でのステップフロー成長を安定化させる技術に目途がつけば高速・大口径化が可能な技術として期待できる。これらの新規基板製造技術の8インチ化によって低コスト化の進展が期待される。

#### 4.1.2 単結晶基板高品質化の課題

高品質化という観点では、低転位密度化のさらなる進展が期待される。既にマイクロパイプと呼ばれる巨大な転位が発生する問題 [26] は、密度 $0.1 \text{ cm}^{-2}$ 以下が達成されてほぼ解決しているが、主として貫通らせん転位（threading screw dislocation; TSD）、基底面転位（basal plane dislocation; BPD）の密度のさらなる低減が期待されている。昇華法では、a面成長とm面成長を交互に行うRAF（Repeated A-Face）法と呼ぶ成長手法の採用 [27] によって6インチ基板の転位密度は $100 \text{ cm}^{-2}$ 程度まで大幅に低減されてきた。高密度のTSDは、結晶中の耐圧の劣化原因の一つとなるために低減が不可欠であり、特に液相法では、TSDがFrank型積層欠陥（stacking fault; SF）へ高効率に転換されてTSD低減に効果的であることから適用が期待される。

BPDは主として成長中や成長後の冷却過程での熱応力によって導入される。バイポーラデバイスで少数キャリアが高濃度に注入されると、電子と正孔の再結合時のエネルギーによってShockley型の積層欠陥となって拡張し、オン抵抗を増大させる原因となる問題がある [28]。これはMOSFET素子上のpn接合部分においても問題となる。基板中からBPDが除去できなくても後述のエピタキシャル膜の形成において効率よく貫通刃状転位（threading edge dislocation; TED）へと変換することが可能となってきたものの、これと共に、基板中のBPD密度の低減が不可欠である。

また、LSIほどの水準ではないが、SiC基板にも微細化に対応するための平坦性が求められる。SiCは硬い材料であるだけに、切断や研磨が難しく、技術向上が期待される。現在はワイヤーソーを用いた切断が行われているが、より切り代を小さくしつつ、平行度が高く、生産性にも優れた切断方法の開発が待たれる。研磨においてはSiと同様のケモメカニカルエッチングだけでは品質と研磨速度の両立が難しく、金属板触媒を用いながら高品質なまま平坦化を目指す、触媒基準エッチング法（catalyst referred etching; CARE）のように、表面にダメージを与えずに平坦化可能な

手法 [29] も期待される。

## 4.2 エピタキシャル成長技術の課題

### 4.2.1 エピタキシャル膜の高品質化の課題

単結晶基板の大口径化が進展するのに合わせ、大面積で膜質を均一とした成膜技術が必要となる。CVDによるエピタキシャル膜の成長時に、基板中の転位が膜内へと引き継がれるが、TSDの一部は Frank 型の SF へと変換され、BPD は TED へと変換される性質がある。特に、前述の通りバイポーラデバイスの順方向劣化現象の原因として危惧される BPD については、エピタキシャル成長の初期に、99%以上の効率で TED へ変換を行える [30]。この技術によって順方向劣化の問題は大幅に緩和されてきたが、今後は基板内の BPD をさらに抑制することが求められる。また、TSD についてはエピタキシャル成長時の Frank 形 SF への変換の効率は十分ではないことから、エピタキシャル成長中の grown-in 欠陥を減らすのと同時に、ウェハ中の密度を予め十分に低下させておくことが重要となる。さらに、エピタキシャル膜に特徴的な欠陥として知られる、3C 結晶の発生に伴う三角欠陥や、TSD を起点として生じるキャロット欠陥等を抑制する技術の向上も求められる。

超高耐压用途の IGBT 向けには、n 型、p 型の厚いエピタキシャル膜が必要となる。IGBT の性能に直結する少数キャリアの長寿命化のためには、ライフタイムキラーとなる点欠陥の低減技術が必須である。n 型部は炭素単空孔欠陥の重要性が指摘されているものの [31]、p 型部のライフタイムキラーは十分に解明されていない。これらの解明とその低減が期待される。

### 4.2.2 エピタキシャル膜表面に現れる欠陥低減の課題

これらの転位がエピタキシャル膜を貫通する場合、表面の終端位置に成長ピットと呼ばれる表面欠陥が現れる。転位の存在そのものが必ずしもデバイス特性の劣化に直結するわけではないが、転位に起因した表面欠陥が凹凸を生むことで、素子内の電界が不均一となることによるデバイスの信頼性の劣化の問題がある。例えばダイオードのリーク電流や、MOSFET のゲート絶縁膜の寿命等への悪影響が懸念されており、そのため TED や TSD の発生密度を十分に低下させることが必要となる。また、SiC 基板の成長では転位発生の低減のために上述の RAF 法が必須であり、成長時に c 軸に対して 4° 傾けたオフ角があるが、この傾斜に合わせてエピタキシャル膜表面にはステップバンチングと呼ばれる高さ数 Å の凹凸が発生する。この緩和や、成長後の平坦化技術の向上によってデバイスの長期動作信頼性の改善が期待される。

## 4.3 SiC パワーデバイスプロセスの課題

### 4.3.1 MOSFET チャネル抵抗の向上

前述の通り SiC は、結晶成長だけでなく、デバイス形成に必要な要素技術が揃っていることが他のワイドギャップ半導体にはない利点である。ところが、個々の要素技術についてみると、まだ改善の余地が大きなものが多く残っている。例えば、素子構造の設計にも依るものの、車載用の主力である 1.2 kV 程度の耐压の MOSFET では MOS チャネル部分の抵抗が、素子抵抗の約半分を占めることが多い。チャネル抵抗が低下しない原因は、反転層中のキャリア伝導が阻害されているからである。この原因は主に、ゲート電圧によって表面に誘起された電子の多くが界面近傍の欠陥準位に捕獲されてしまうことにある。この低減のために、これまでは SiC 表面の窒化反応によって最表面の炭素のサイトの一部を窒素で置換して Si-N 結合によって安定化する手法が採用されてきたが [32]、もっと効果的に欠陥準位を末端できる手法が期待される。最近、SiC 上にゲート絶縁膜を形成する前に水素中でのアニールを十分に行うことで抵抗が大幅に低下する現象が発見されて注目を集めている [33]。これらの反転層チャネル抵抗を低減する技術が、動作効率の向上へ向けて不可欠である。また、素子設計のためのデバイスシミュレーション技術が十分ではな

い点も大きな課題である。最適な素子設計および回路設計のためにデバイス特性の数値モデル化が欠かせない。そのための各デバイスの電圧、温度変化等への応答の定量的な把握と数式化が望まれる。

#### 4.3.2 MOSFET 閾値の制御の重要性

インバータ回路の動作においては、誤動作を抑制するためにトランジスタの閾値は十分に大きいことが必要である。現状では、閾値を大きくするために p 型ウェル領域のドーピング濃度を高く設計することが必要となっているが、ドーピング濃度を高めるほど反転層チャネル中の電子伝導がより強く阻害されることが明らかになっている [34]。これが“閾値とチャネル抵抗のトレードオフ”と呼ばれる関係である。このトレードオフを打破して大きい閾値を得る技術の開発が期待される。また、デバイスの動作中に閾値が変動してしまうことも大きな問題となる。現行の、表面窒化技術を適用した MOSFET では特にゲートに負方向のバイアスを印加した場合に正孔の捕獲によって閾値が負方向へシフトする問題が解決できていない。

#### 4.3.3 新構造デバイスの実用化

前述の通り、縦型 MOSFET の性能向上のためにはデバイス構造の工夫（図 2）が有効である。既にプレーナー型チャネルからトレンチ型チャネルへの変更によって劇的にオン抵抗を低下させたデバイスが実用化されている。将来は SJ 構造の実用化による低抵抗化が期待されるが、そのためにはエピタキシャル層の形成とイオン注入を繰り返して、ドーパントの 3 次元プロファイルを制御する複雑なプロセス技術の開発が不可欠である。また、超高耐圧用途のためには SiC 製の IGBT 構造の開発も必須となる。これには、p 型、n 型の厚膜のエピタキシャル層の品質の確保と、各層のキャリア寿命のチューニングのための、ライフタイムキラー欠陥の解明とその制御が不可欠となる。

## 5. まとめ

電力変換の役割を担うパワーデバイスの材料として、SiC が大きく注目されている。その理由は優れた物性だけでなく、数あるワイドギャップ半導体の中でも特に結晶製造技術、デバイスプロセス技術が充実しているからである。本提案書では、SiC のパワーデバイス材料としての特徴とともに、将来の SiC 市場の予測と、現時点での自動車、エネルギー変換、情報通信分野、産業用などの分野への展開の状況をまとめた。また、SiC パワーデバイスの製造技術を支える技術は近年、急速に発展してきたものの、SiC 単結晶基板製造技術、エピタキシャル膜成長技術、デバイスプロセス技術、それぞれに多くの改善すべき課題が残されていることを述べた。

## 6. 政策立案のための提言

カーボンニュートラルに向かって、再生可能エネルギーの導入と化石エネルギー利用の抑制が始まっている。電力は制御が容易で使いやすいこと、拡大を続ける ICT 機器は電力で稼働すること、さらに再生可能エネルギーの多くは電力で供給されることなどから、エネルギー需要は電力にシフトしている。しかし技術進歩がそれに伴わず、供給電力が必ずしも十分ではない事態も想定される。この対策として、太陽光や風力発電の送電用および配電用の電圧変換などの電力変換効率を上げる必要がある。電気自動車の電力効率の向上も航続距離の観点から重要である。

このようなニーズに応えられるデバイスとして SiC デバイスがあるが、現状は特性では優れているものの、Si デバイスと比べて高コストである。したがって SiC パワーデバイスのさらなる普及拡大のためには、低コスト、高効率、高信頼性のデバイス製造技術の開発が必要である。この

ためには、大口径で低欠陥密度の SiC 単結晶製造技術および低欠陥密度高効率エピタキシャル膜製造技術、デバイス特性に影響する欠陥構造の特定、その生成過程と挙動を解明し制御する欠陥制御技術が重要である。加えてデバイスプロセス技術においても MOSFET のチャネル形成技術の大幅な改善が必要である。

これらの課題を解決するための技術開発を支援することは、低コスト高品質な SiC デバイスの実用化を促し、低炭素社会の進展を促進し、新しい産業の形成にも貢献するもので、社会的必要性が高い。

## 参考文献

- [1] 松波他編著, “半導体 SiC 技術と応用 (第2版)”, 日刊工業新聞社, (2011).
- [2] K. Shenai, R. S. Scott, and B. J. Baliga, “Optimum semiconductors for high-power electronics”, IEEE Trans. Electron Dev. 36, 1811 (1989).
- [3] 岩室 監修, “次世代パワー半導体の開発動向と応用展開”, シーエムシー出版, (2021).
- [4] R. Kosugi, et al., “Breaking the Theoretical Limit of 6.5 kV-Class 4H-SiC Super-Junction (SJ) MOSFETs by Trench-Filling Epitaxial Growth”, 2019 31st International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), Shanghai, China, 2019, pp. 39-42.
- [5] Ty McNutt, “Introducing the New Wolfspeed WOLFPACK Power Modules”, (2021), <https://www.wolfspeed.com/knowledge-center/article/webinar-introducing-the-new-wolfspeed-wolfspeed-power-modules>, (アクセス日 2021 年 11 月 19 日).
- [6] 荒井他編, “SiC 素子の基礎と応用”, オーム社 (2003).
- [7] T. Kimoto, “Material science and device physics in SiC technology for high-voltage power devices”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.54, No.4, 040103 (2015).
- [8] “2021 年版次世代パワーデバイス & パワエレ関連機器市場の現状と将来展望”, 富士経済, (2021).
- [9] “SiC パワーデバイス —材料・実装技術と応用—”, 東レリサーチセンター, (2011).
- [10] EVmart, “テスラ Model S”, <https://evsmart.net/carMaker/Tesla/ModelS/>, (アクセス日 2021 年 11 月 19 日).
- [11] 清水, “車載電池のグローバル競争戦略 EV 時代を日本は生き残れるのか”, <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/04237/>, (アクセス日 2021 年 11 月 19 日).
- [12] 日達他, “車載用直接水冷 IGBT モジュール”, 富士時報, 84 (5), 308-12, (2011).
- [13] 難波他, “次世代高出力密度電動コンポーネント技術”, 第 29 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 16B1-2, (2016).
- [14] 木村他, “ハイブリッド電気自動車向け高電力密度インバータ”, 日立評論, 2013 年 11 月号, P42-7, (2013).
- [15] Liew Vaughan Edmunds, “silicon carbide is paving the way for wider adoption of electric vehicles”, Applied Materials.com, Semiconductors, (2021), <https://blog.appliedmaterials.com/silicon-carbide-paving-way-wider-adoption-electric-vehicles>, (アクセス日 2021 年 11 月 19 日).
- [16] 梅沢他, “風力発電用のパワーコンディショナおよびコンバータにおける回路・制御技術”, 富士電機技報, 86 (2), 124-8, (2013).
- [17] 今泉, 松岡, “省エネルギー・省資源化に貢献する SiC パワーデバイス”, 三菱電機技報, 94 (7), 428-31, (2020).
- [18] 岩室憲幸, “自動車の電動化に向けた SiC パワーデバイス・GaN パワーデバイス開発の最新状況ならびに今後の動向”, 工業材料, 68 (9), 14-9, (2020).
- [19] 土田, “高電圧パワー半導体に向けた SiC 結晶材料開発”, 電気評論, 105 (12), 13-7, (2020).

- [20] Y. Tokuda, et al., “Fast 4H-SiC Bulk Growth by High-Temperature Gas Source Method”, *Mater. Sci. Forum*, 1004, 5-13, (2020).
- [21] 楠, “溶液法による高品質 4H-SiC 単結晶ウェハの開発”, *新日鐵住金技報*, 407, 50-7, (2017).
- [22] M.Kado, et al., “High Speed Growth of 4H-SiC Single Crystal Using Si-Cr Based Melt”, *Mater. Sci. Forum*, Vol.740-742, 73-6, (2013).
- [23] 和田他, “低欠陥 6 インチ SiC エピタキシャル基板 EpiEra”, *SEI テクニカルレビュー*, 193, 53-7, (2018).
- [24] 浅原, “SiC パワーデバイスの研究開発の動向”, *電気評論*, 102 [4], 19-23, (2017).
- [25] 亀井, “21 世紀を切り開く機能性単結晶の基礎と応用 第 13 回 SiC 単結晶の溶液成長”, *オプトロニクス*, 27 (5), 157-62, (2008).
- [26] F. C. Frank, “Capillary equilibria of dislocated crystals”, *Acta Crystallogr.* 4, 497, (1951).
- [27] D. Nakamura, et al., “Ultrahigh-quality silicon carbide single crystals”, *Nature* 430, 1009-12, (2004).
- [28] T. Tawara, et al., “Short minority carrier lifetimes in highly nitrogen-doped 4H-SiC epilayers for suppression of the stacking fault formation in PiN diodes”, *J. Appl. Phys.* 120, 115101, (2016).
- [29] 山内和人他, “ウエットエッチングによる原子スケール平坦化”, “*応用物理*”, 82, 403-6, (2013).
- [30] S. Ha, et al, “Dislocation conversion in 4H silicon carbide epitaxy”, *J. Cryst. Growth* 244, 257-66, (2002).
- [31] K. Kawahara, et al., “Investigation on origin of  $Z_{1/2}$  center in SiC by deep level transient spectroscopy and electron paramagnetic resonance”, *Appl. Phys. Lett.* 102, 112106, (2013).
- [32] J. Rozen, et al., “Density of interface states, electron traps, and hole traps as a function of the nitrogen density in SiO<sub>2</sub> on SiC”, *J. Appl. Phys.* 105, 124506, (2009).
- [33] K. Tachiki, et al., “Formation of high-quality SiC(0001)/SiO<sub>2</sub> structures by excluding oxidation process with H<sub>2</sub> etching before SiO<sub>2</sub> deposition and high-temperature N<sub>2</sub> annealing”, *Appl. Phys. Express* Vol.13, (2020).
- [34] M. Noguchi, et al., “Carrier transport properties in inversion layer of Si-face 4H-SiC MOSFET with nitrated oxide”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 58, 031004, (2019).

---

---

低炭素社会の実現に向けた  
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく  
イノベーション政策立案のための提案書

次世代半導体デバイスの技術開発課題と展望  
－ SiC 半導体デバイス－

令和 4 年 5 月

Technological Issues and Future Prospects of the Next Generation  
Semiconductor Devices:  
SiC Semiconductor Devices

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action  
toward Low Carbon Societies,  
Center for Low Carbon Society Strategy,  
Japan Science and Technology Agency,  
2022.5

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

---

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 上席研究員 三枝 邦夫 (SAEGUSA Kunio)  
特任研究員 喜多 浩之 (KITA Koji)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ 8 階  
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273  
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2022 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。  
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。