

令和 6 年度 防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書

革新的SiCヘテロ接合技術を使った高周波デバイスの基礎研究

令和 7 年 5 月

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、国立研究開発法人 産業技術総合研究所が令和4年度から令和6年度にかけて実施した「革新的SiCヘテロ接合技術を使った高周波デバイスの基礎研究」の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的

次世代通信規格 6G の実現のため、従来よりも高周波、高出力で動作するトランジスタ材料開発への期待が高まっている。産業技術総合研究所（産総研）が新たに開発した高品位 3C/4H-SiC ヘテロ接合は、基礎評価において高いホール電子移動度と電子濃度を示した。このことは接合における二次元電子ガス（2DEG）の存在を強く示唆し、この接合が高周波トランジスタ材料として適用できる可能性を期待させるものである。そこでこの研究は、この 3C/4H ヘテロ接合材料が、次世代通信用高周波トランジスタ材料として、今後本格的な開発を展開する候補になりうるか、実験的に検証することを目的とする。この目的を達成するため、研究の最終目標として次の 1) から 3) に示す 3 つを挙げる。

- 1) 3C/4H ヘテロ接合における 2DEG の特性を支配する因子の原子レベルでの解明を目指す。
- 2) 3C/4H ヘテロ接合を使った HEMT が動作することを実証する。
- 3) 3C/4H ヘテロ接合を 4 インチウエハー全面に形成する。

1) を達成するために、次の①と②を要素課題として挙げる。この 2 つを達成することにより、3C/4H ヘテロ接合チャンネルの限界特性が推測でき、次世代高周波デバイス向けに開発が先行する接合技術、特に AlGaIn/GaN ヘテロ接合に対しどのような得失を有するのかが推測できる。

- ① 接合に存在する電子の散乱因子を特定し、移動度低下への寄与を明らかにする。
- ② 散乱因子と、接合の結晶性の相関を明らかにする。

2) を達成するために、次の③と④を要素課題として挙げる。当然ながら新規材料である 3C/4H ヘテロ接合への電極の形成技術は一切報告例がない。そのため要素となる電極形成技術を新たに開発する必要がある。

開発した電極形成技術をインテグレーションすることにより、3C/4H ヘテロ接合をチャンネルとした HEMT が作製できる。HEMT を評価することにより動作実証を行うことができる。

- ③ 要素デバイスプロセス技術を開発する。
- ④ プロセスインテグレーションにより SiC-HEMT を作製し、評価する。

3) を達成するために、次の⑤、⑥および⑦を要素課題として挙げる。基板ステップ制御成長法では、4H-SiC の基板面が結晶面（0001）から特定方位にわずかに傾斜していることが必要である。これまでの研究で使用した傾斜角度は 0.14 度であり、傾斜方位は [01-10] である。一般にウエハー加工では、傾斜角が小さいほど傾斜方位の制御が困難になる。0.14 度という小さな傾斜角を加工することは、これまでの研究で使用した 5 x 5mm² の小片基板であれば比較的容易であるが、4 インチウエハーは前例がない大きなチャレンジである。そのため、まず本研究では、3C-SiC の成長条件を検討することにより、より大きな傾斜角上に結晶性の良い 3C-SiC を成長できる CVD 条件の探索を行い、適用可能な傾斜角の拡大を目指す。ついでその傾斜角を 4 インチウエハー全面に加工、形成することを目指す。加工した 4 インチウエハー全面に 3C-SiC を成長することにより接合を形成し、接合の 2DEG の特性分布を評価する。

- ⑤ 基板ステップ制御成長法に適用できる基板傾斜角を拡大する。
- ⑥ 適用可能な傾斜角を 4 インチウエハー全面に形成する。
- ⑦ 4 インチウエハー上に接合を形成し、2DEG 特性の評価をおこなう。

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

- ① 電子の散乱因子の特定と移動度低下への寄与度合いの評価
達成した。
- ② 電子の散乱因子と結晶性の相関評価
散乱因子の特定と結晶性との相関を明らかにした。移動度は目標値を達成できなかった。
- ③ 要素デバイスプロセス技術の開発とインテグレーション
達成した。

- ④ HEMT 作製と評価
HEMT の作製および動作実証に成功した。ゲートリーク電流は目標を達成できなかった。
- ⑤ 傾斜角の拡大検討
達成した。
- ⑥ ウエハー加工技術の検討
達成した。
- ⑦ 4 インチウエハー上への接合の形成と評価
達成した。
- ⑧ プロジェクトの総合的推進
達成した。

3. 委託業務における研究の方法及び成果

① 電子の散乱因子の特定と移動度低下への寄与度合いの評価

(②にまとめて記述する)

② 電子の散乱因子と結晶性の相関評価

評価のために作製したサンプルを表 1 に示す。サンプルは C 面 4H-SiC 基板上に熱 CVD 法で 3C-SiC を成長し、3C/4H-SiC ヘテロ接合を形成した基板である。熱 CVD の条件は、温度 1370°、圧力 240mbar、C/Si 比 1 とした。図 1 に用いた熱 CVD 装置のチャンバーの外観写真、チャンバーの断面模式図、成長シーケンスを示す。4H-SiC 基板のオフ方位は、サンプル A と B は [1-100] とし、サンプル C と D は [11-20] とすることにより意図的に異なった結晶性になるように作製した。サンプル A と C が HEMT 構造、サンプル B と D が結晶性評価用のテスト構造である。A と B、および B と D は、3C-SiC の膜厚だけが異なり、基板条件、成長条件は同じである。サンプル A と C についてホール移動度の温度依存性測定を行った。移動度を決める散乱因子として、音響フォノン散乱、インターバレー散乱、光学フォノン散乱、クーロン散乱を想定し、各散乱因子の寄与度を変化させながら、得られた移動度曲線へのフィッティングを行った。図 2 に作製したサンプル B と D の光学顕微鏡像を示す。光学顕微鏡像を見ると、B は表面平滑であるが D はラフである。表 2 にサンプル B と D の XRD ロッキングカーブの半値幅を示す。半値幅は (111) と (113) 両方において D より B が小さく、B の結晶性が良好であることがわかる。

表1. 評価用サンプル一覧

サンプルNo	4H-SiC基板のステップ方位	3C-SiC 層厚 (nm)	目的
A	[1-100]	30	2DEG散乱解析、双晶評価
B		1000	結晶性評価
C	[11-20]	30	2DEG散乱解析、双晶評価
D		1000	結晶性評価

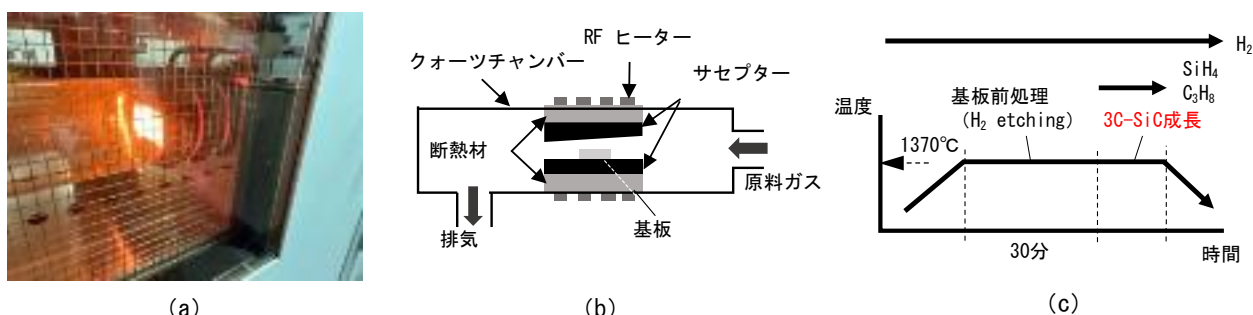


図1. 熱CVD装置および成長シーケンス：(a) 装置外観、(b) チャンバー部の断面模式図、(c) 成長シーケンス。

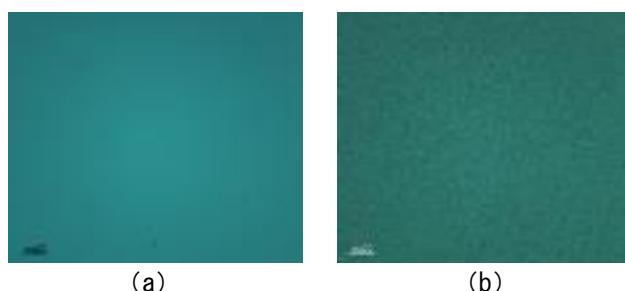


図2. 表面の光学顕微鏡写真：(a) サンプルB、(b) サンプルD。

表2. 評価用サンプル一覧

サンプルNo	ロッキングカーブ半値幅 (arcs)		双晶の発生
	(111)	(113)	
A	-	-	観察されず
B	18	98	-
C	-	-	発生
D	151	204	-

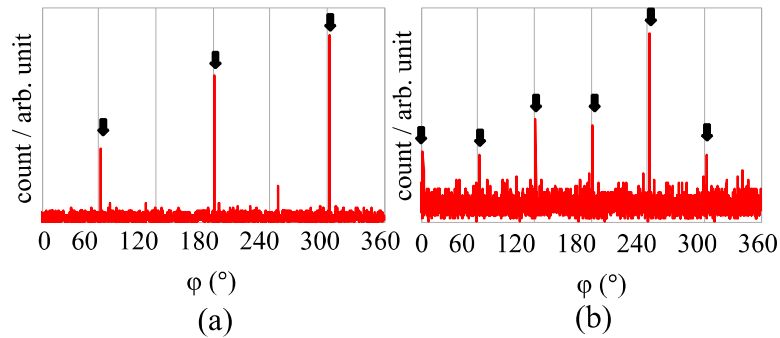


図3. XRD ϕ スキャングラフ：(a) サンプルA、(b) サンプルC。

図3にサンプルAとCのXRDファインスキャングラフを示す。サンプルAはピークが3本であることから双晶のない単ドメイン構造であることがわかる。その一方、サンプルCは6本のピークを示しており、双晶を含んだ複数ドメインの混合であることがわかる。以上の結果から、Bと同条件で作製したサンプルAは結晶性が良く、Dと同じ条件で作製したCは結晶性が悪いと見て良い。

図4にサンプルAとCのホール移動度とシートキャリア濃度の温度依存性、およびフィッティングの結果を示す。(a)に示す通り、両者における移動度の温度依存性には顕著な差があった。前述の散乱因子を仮定してフィッティングしたのが(b)と(c)である。サンプルA、Cともにフィッティングできた。両者を比較すると、2つのフォノン散乱とインターバレー散乱の寄与に大きな差はない。顕著に異なるのはクーロン散乱の寄与である。サンプルC(結晶性悪)ではこの散乱の寄与が特に大きいことがわかった。このことから、サンプルAにおいて移動度が大きく向上している理由は、結晶性の向上により電荷を伴った欠陥が減少したためと推測できる。図4(a)においてシートキャリア濃度(電子)を比較すると、サンプルCにおいてわずかながらサンプルCが高い値を示していることもこの推測を支持する。電荷を伴った欠陥としては、成長時にバックグラウンドから結晶中に取り込まれたイオンか不純物、ドメイン界

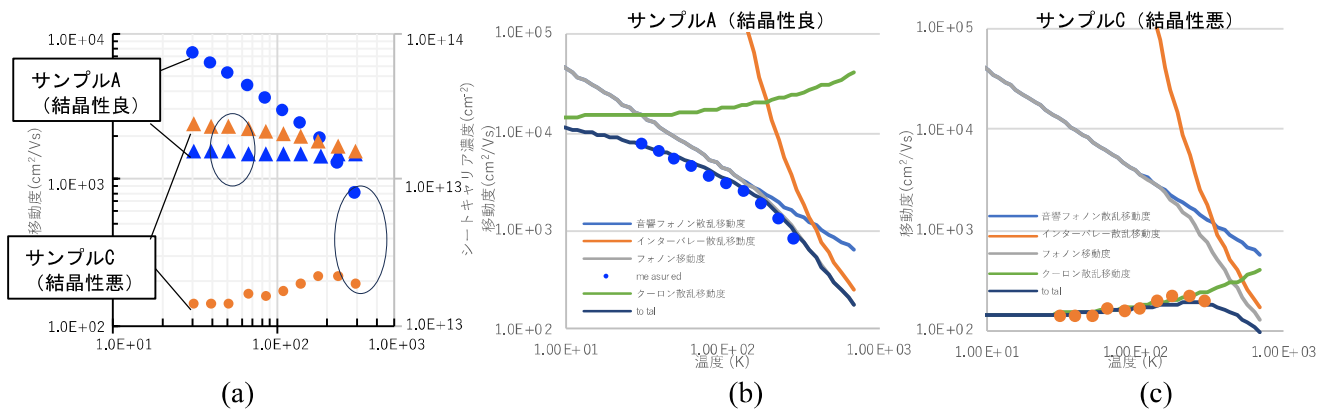


図4. 移動度の温度特性およびフィッティングの結果：(a) 移動度、(b) フィッティング結果：サンプルA、フィッティング：サンプルC。

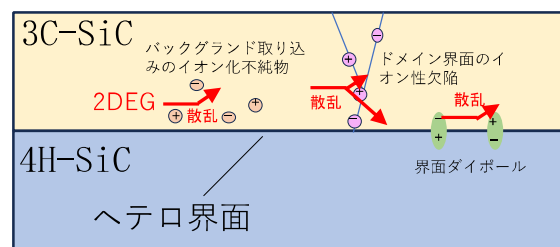


図5. 3C/4H-SiCヘテロ接合における2DEGの散乱モデル。

面のイオン性欠陥、4H-SiC 基板面の原子の乱れにより生成する界面ダイポールが考えられる。以上の考察から、本 SiC ヘテロ接合における電子移動度支配因子を説明するモデルとして図 5 に示したモデルを提示する。この電荷を伴った欠陥は、結晶性の改善よりさらに減少させることが物理的には可能である。今後の移動度改善の指針として、さらにこの欠陥密度を下げることを有効と考えられる。以上により、目標である「電子移動度支配因子のモデル提示」を達成した。

図 6 に移動度の向上を目的とし、成長圧力の影響を評価した結果を示す。標準的条件である 240mbar に加え、170mbar と 700mbar を追加して比較した。結果、700mbar 成長において移動度は $804\text{cm}^2/\text{Vs}$ を示し、標準条件における $780\text{cm}^2/\text{Vs}$ から向上した。170mbar では、移動度は $591\text{cm}^2/\text{Vs}$ と低下した。この 3 つのサンプルにおいて (111) の XRD ロッキングカーブ半値幅は 22-25arcs の間にあり、サンプル間で大きな差異はなく、いずれも良好と言って良いレベルである。成長圧力が移動度に影響を及ぼす理由は現時点では明らかになっていない。今後詳細な解析が必要である。700mbar において達成した移動度 $804\text{cm}^2/\text{Vs}$ は本検討における最も高い値である。したがって、目標である「ホール移動度 $850\text{cm}^2/\text{Vs}$ を達成」は達成できなかった。

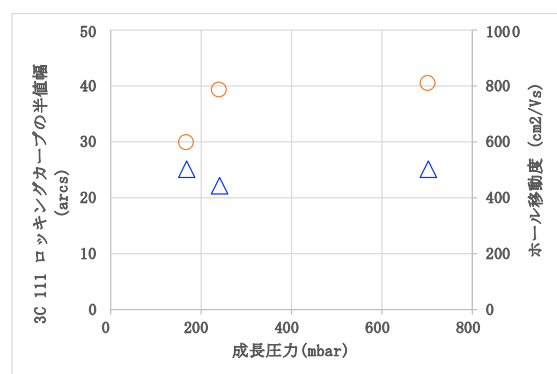


図6. 移動度に対する成長圧力の影響。

③ 要素デバイスプロセス技術の開発とインテグレーション

HEMT を作製するため、次の 3 つの要素技術を開発した。

- 素子分離のためのメサ構造作製技術
- オーミック電極形成技術
- ショットキー電極形成技術

表 3 にメサ構造形成のために開発した反応性ドライエッチングの条件を示す。装置はサムコ社製 RIE-200L を用いた。フォトレジストをマスクとし 3C-SiC と 4H-SiC をエッチングしたところ、どちらも $10.1\text{nm}/\text{min}$ のレートで加工できた。フォトレジストマスクの変形はなく、フォトレジストの開口形状通りのメサパターンが形成できた。

オーミック電極として、Ti (20nm) / Au (70nm) 積層構造をアレイ配置した TLM パターンをヘテロ接合基板上に作製し、接触抵抗を評価した。形成した TLM パターンの上面光学顕微鏡写真を図 7 に示す。SEM 観察により、電極幅は $100\mu\text{m}$ 、アレイ間隔は 39.6、24.0、13.0、6.5、 $2.4\mu\text{m}$ とわかった。急速昇温アニール

表3. 反応性ドライエッチングの条件

反応性ガス	圧力 (Pa)	RF 出力 (W)	エッチングレート (nm/min)
SF_6	5	60	10.1

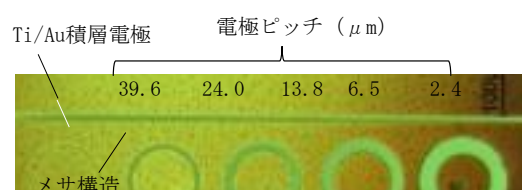


図7. TLM構造の上面光学顕微鏡写真。

(RTA) 条件はアルゴン雰囲気下で 990°C 、2分とした。図 8 に各電極間の I-V 特性を示す。I-V カーブは直線となり、オーミック性接触が形成できていることがわかった。図 9 に I-V 特性から得た抵抗値 R_{total} と電極間隔の関係を示す。この図から得られたパラメータを式 (1) に代入してえられた特性接触抵抗 ρ_c は $3.3 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$ だった。この結果により、目標値である「オーミック接合の特性接触抵抗 $5 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$ 以下」を達成した。

$$\rho_c = \frac{R_c}{2} \times \frac{L_t}{2} \times W \quad (1)$$

(R_c はコンタクト抵抗 (図 8 グラフの Y 切片/2)、 L_t は伝搬長 : X 切片/2、 W は電極幅)

ショットキー電極として、ヘテロ接合基板に Au (30nm) を形成し、評価した。ゲート長 4 μm 、ゲート幅 100 μm のゲート構造を形成した。リーク特性については次項④で述べる。

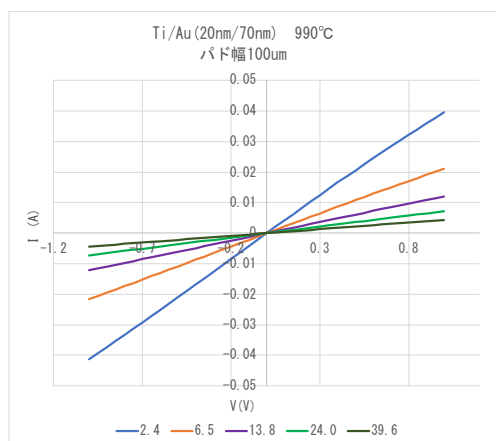


図8. TLM構造のI-V特性。

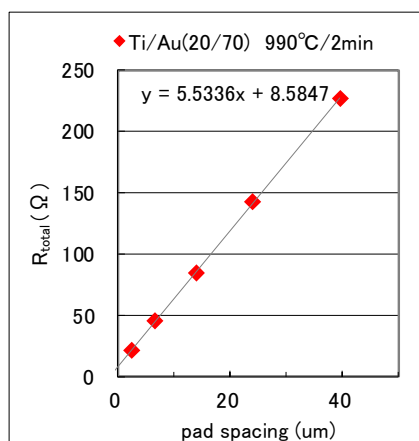


図9. 抵抗値と電極間隔の関係。

④ HEMT 作製と評価

HEMT を作成するための 3C/4H-SiC ヘテロ接合基板を、4H-SiC のステップ制御基板上に 3C-SiC を熱 CVD 法でエピタキシャル成長することにより作製した。3C-SiC の厚みは 24nm とした。成長条件は表 4 に示した。図 10 に作製したヘテロ接合の断面 TEM 像を示す。急峻なヘテロ界面が形成できていることが確認できた。このヘテロ構造に van der Pauw 構造を形成しホール特性を評価したところ、室温における 2DEG の移動度は $586\text{cm}^2/\text{Vs}$ 、濃度は $1.48 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ だった。この基板に③で開発した要素技術を集積して作製した HEMT の構造を図 11 に示す。デバイスの寸法は、 $W_g=115\mu\text{m}$ 、 $L_{sg}=15\mu\text{m}$ 、 $L_g=100\mu\text{m}$ 、 $L_{ds}=15\mu\text{m}$ とした。なお、③においてオーミック電極形成のための RTA 条件は 990°C としたが、本 HEMT 作製においては使用した装置の都合から 850°C とした。この条件においても作製した電極の I-V 特性は直線性を示したことからオーミック性接触が形成できることを確認した。特性接触抵

表4. 成長条件

成長圧力 (mbar)	C/S比	成長温度 ($^\circ\text{C}$)	成長レート ($\mu\text{m/hr}$)
240	1.0	1370	1

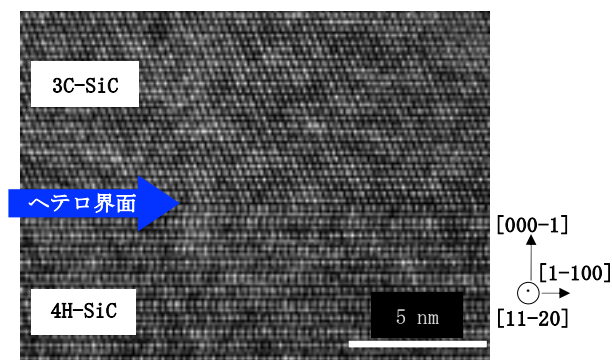


図10. ヘテロ接合基板の断面TEM像。

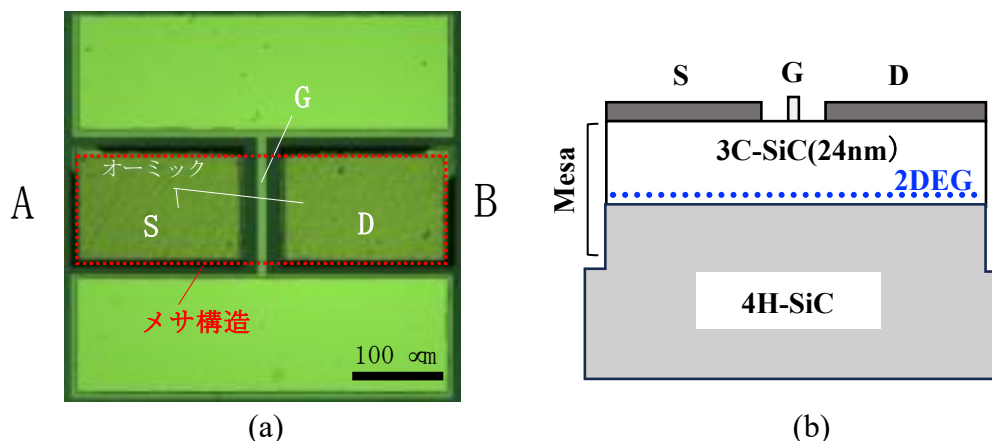


図11. HEMTの構造。(a) 上面光学顕微鏡写真、(b) A-B間の断面模式図。

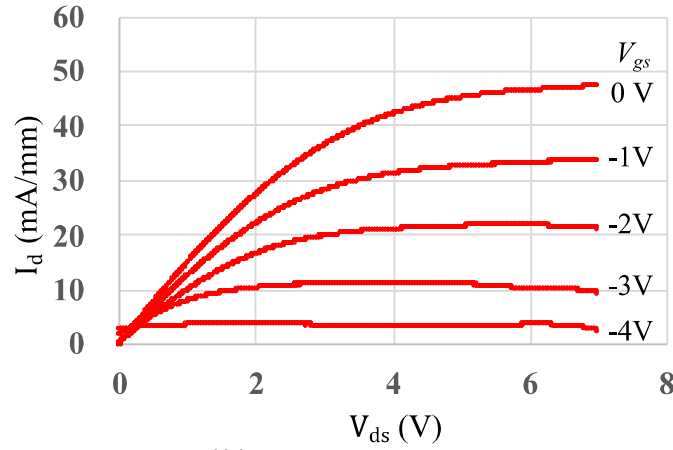


図12. HEMTのI-V特性。

抗値は $5.46 \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}^2$ だった。図 12 に作製した HEMT の I-V 特性を示す。印加したゲート電圧に対しドレイン電流が変調されることを確認した。

ドレイン電流値の妥当性について考察するため、この HEMT 構造で期待される飽和電流値を計算し実験値と比較した。HEMT の飽和電流 I_{sat} は次の式で計算できる。

$$I_{\text{sat}} = \frac{(V_g - V_{th})}{R_c + \frac{L_{gs}}{q\mu N_s} + \frac{2L_g}{\mu C_g(V_g - V_{th})}} \quad (2)$$

$$C_g = \frac{\epsilon_s \epsilon_0}{t} \quad (3)$$

ここで、 V_g はゲート電圧、 V_{th} は閾値電圧、 R_c はコンタクト抵抗、 L_{gs} ソースゲート間隔、 q は素電荷、 μ は 2DEG の移動度、 N_s は 2DEG の濃度、 C_g は単位面積あたりのゲート容量、 L_g はゲート長、 V_g はゲート電圧、 V_{th} は閾値電圧、 ϵ_0 は真空の誘電率、 ϵ_s は 3C-SiC 層の誘電率、 t は 3C-SiC 層の厚さである。式 (2) に $\mu : 586 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、濃度 : $1.48 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 、 $V_{th} : -3.8 \text{ V}$ (図 10 から)、 $R_c : 18.2 \Omega \text{ mm}$ ($\rho = 5.46 \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}^2$ から) および各定数を代入すると、飽和電流 I_{sat} は 69.1 mA/mm と計算された。この値は図 12 で観察された飽和電流値 47.5 mA/mm と近似しているため、観察された電流特性は、ヘテロ接合界面の 2DEG 特性を反映したものであると見て良い。すなわち、ゲート電圧印加に応じ変調したドレイン電流は、ヘテロ接合の 2DEG の濃度変化に応じたものであり、図 12 の I-V 特性は、本接合の HEMT としての動作を実証したものである。これは世界初の SiC-HEMT の実現例である。この結果により「HEMT の動作実証」という課題目標を達成した。

図12における直線領域 (V_{ds} が0Vから約2Vまでの領域) におけるI-V曲線の傾きは、 V_{gs} を0Vから-4Vに操引するに従い低下している。これはゲートから結晶中の中間準位に電子が充填されることによりチャネル抵抗が増加する、いわゆる電流コラプス現象である可能性がある。また、ゲート電圧を負にしても I_d がゼロになっていない。すなわちピンチオフしていない。これはゲートからのドレインへの電流成分があるためである。この電流成分は数nm/mmのオーダーである。したがって、課題目標である「ゲートリーク電流 $1 \times 10^{-3} \text{ A/mm}$ 以下達成」は達成できなかった。これら2つの特性はHEMTの動作にとって極めて重要な特性であり、改善のための方策と実験検討が必要である。

④ 傾斜角の拡大検討

これまでの研究において、4H-SiC基板は、 $[1-100]$ 方向に 0.14° に傾斜(オフ)したものを使用してきた。このオフ角度を拡大するのが本検討の目標である。 $[1-100]$ 方向に 0.14° 、 0.20° 、

0.30°、0.40°、0.50°の傾斜角を有する12mm角の4H-SiC基板を作製した。各基板上に3C-SiCを熱CVD法で200nmの厚みに成長しヘテロ接合を形成した。成長条件は、表3のとおりとした。成長した3C-SiC層をXRDにより評価した。図13に3C-SiC 113のXRD ϕ スキャングラフを示す。すべてのサンプルにおいて検出されたピークは $\phi=0^\circ$ 、 120° 、 240° の3つだけだった。これは成長した3C-SiC層が単ドメインであることを示す。これらの結果は単ドメインを成長できる下地の基板の傾斜角度を、これまでの0.14°から0.5°に拡大できたことを示す。この結果により、目標「傾斜角度0.14度より大きな傾斜角基板上への単ドメインヘテロ接合形成」を達成した。

その一方で問題点も明らかになった。図14は各サンプルにおける3C-SiC 111のXRDロックンカーブの半値幅（FWHM）を示す。オフ角度の増加とともに半値幅は増加した。0.14°から0.50°になると、FWHMは、12.2arcsから24.8arcsに悪化した。すなわち、0.5°の傾斜基板においても単ドメインの3C-SiCは成長できるが、結晶性は悪化することがわかった。現在、一連のオフ角基板上へ膜厚が30nmの3C-SiCを成長したHEMT構造を作製し、その2DEG特性の評価を進めており、HEMT特性を維持できる基板の最大オフ角の評価中である。

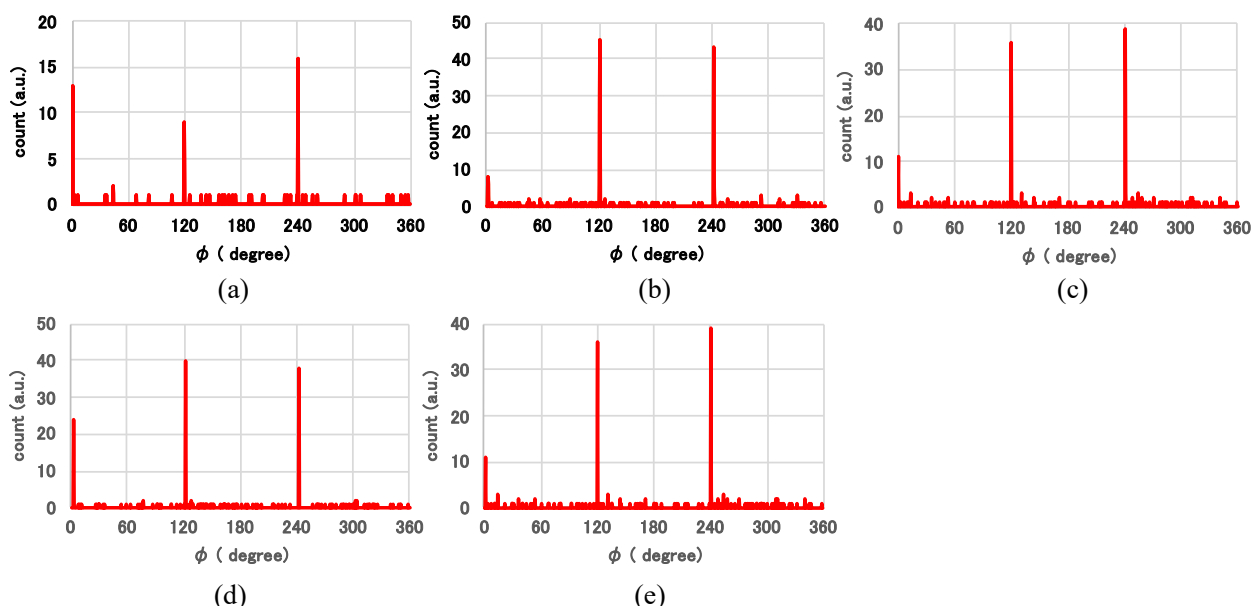


図13. 3C-SiC 113 のXRD ϕ スキャングラフ。オフ角：(a) 0.14°、(b) 0.20°、(c) 0.30°、(d) 0.40°、(e) 0.50°。

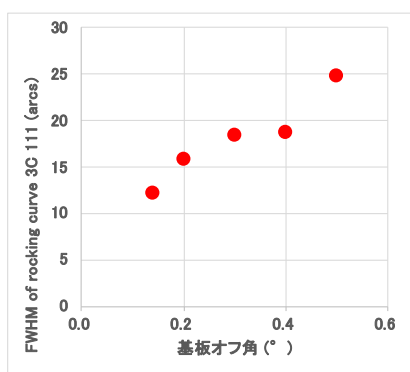


図14. 3C-SiC 111 のXRD ロックンカーブの半値幅。

⑤ ウエハー加工技術の検討

市販されている4H-SiCウエハの主面は(0001)面であり、法線方向から $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ に4°の傾斜角を有するのが一般的である。傾斜角の精度は、標準規格(SEMI)において $\pm 0.5^\circ$ と指定されている。一方、本研究で必要とするウエハーは、主面が反対面の(000 $\bar{1}$)であり、 $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ 方向に約0.14°の傾斜角を形成する必要がある。傾斜角の精度は $\pm 0.5^\circ$ よりも厳しいと推定され

る。このようなウェハは市販されていないため、インゴットからウェハーを加工する一連の工程を新たに開発する必要がある。本検討では、加工装置の開発とその装置を使った加工プロセスの検討を行った。インゴットの切断には、マルチワイヤーソー（遊離砥粒方式、型式U-600、（株）安永、**図15**）を改良して使用した。通常の仕様での切断では $\pm 0.1^\circ$ 程度の切断精度を有するが、 $[1-100]$ 方向に 0.14° の切断面を実現するのに必要な精度は 0.01° であり、改良により切断角度の制御を向上させる必要がある。そこでインゴットをワイヤーソー内に固定する台座に揺動ステージを新規で作製して追加した。本ステージは、モーター駆動によって、台座部分をワイヤーの運動方向に揺動させる機構を備えており、切断加工時のワイヤー直進精度を高める効果を狙ったものである。本装置を使い、市販の4インチSiCインゴットから4インチウェハーを切り出し加工した。切断前にX線回折装置によって面方位を正確に計測し、 $(000-1)$ SiCウェハーの切断面方位を $\langle 11-20 \rangle$ 方向に 0.0° かつ、 $[1-100]$ 方向に 0.14° となるようにセットした。切断後は研削加工を行った。ついでウェハー表面に存在する研削加工による変質層をCMP加工により除去し鏡面とした。作製したSiCウェハーのオフ角度とオフ方位（アジマス角）を**図16**に示す。これらの角度は基板表面の原子層ステップの方向と間隔から求めた。原子層ステップはAFMで観察した。狙い通り約 0.14° のオフ角を4インチ基板上に形成することに成功した。アジマス角も $[1-100]$ 方向から大きなずれがなく形成されていることがわかった。⑦で詳述するが、この基板上に成長した3C-SiCは単ドメインであることが示された。この結果により、課目標である「4インチ基板全面に単ドメイン成長可能な傾斜角を形成する」を達成した。ウェハー加工における目標を達成した。今後の課題は、切断精度と研削、研磨の各工程での方位ズレを詳細に把握することで、加工精度を更に改善することである。

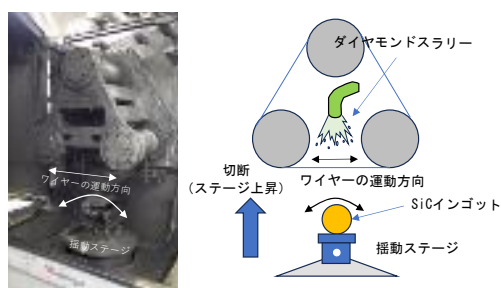


図15. マルチワイヤーソーの外観と切断原理を示した原理を模式図。

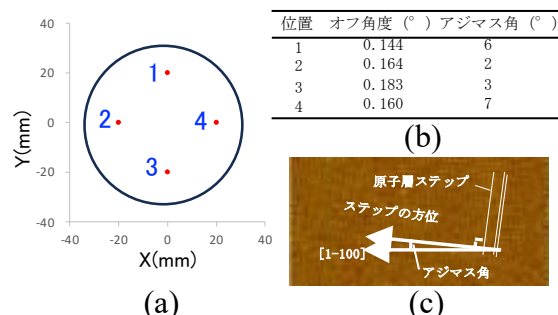


図16. SiCウェハーの傾斜角度とアジマス角。
(a)測定位置、(b)オフ角度とアジマス角、
(c)AFM像とアジマス角の定義を示す図。

⑥ 4インチウェハー上への接合の形成と評価

で作製した4インチウェハーに3C-SiCを成長し、ヘテロ接合基板を作製した。4インチウェハーの中心から $\phi 3$ インチウェハーをくり抜き使用した。当初、本課題における目標は、4インチウェハーを4分割して成長を実施する、としていたが、基板形状が扇形となることにより、基板のエッジ形状が原料ガスの流れを乱す懸念があるため、その形状を包含する3インチウェハーにより検討を行った。3C-SiCの厚みは200nmとした。成長条件は表4の通りとした。成長した3C-SiC XRD ω -2 θ スキャンおよびXRD- ϕ スキャンにより評価した。図17に3C-SiC 111のXRD ω -2 θ スキャングラフを示す。測定場所はウェハーのほぼ中央部である。基板由来の4H-SiCのピークから 0.25° 高角側に3C-SiC由来のピークが観測された。これにより3C-SiCが成長していることが確認できた。図18に3C-SiC 113のXRD ϕ スキャングラフを示す。測定した13点すべての点において、検出されたピ

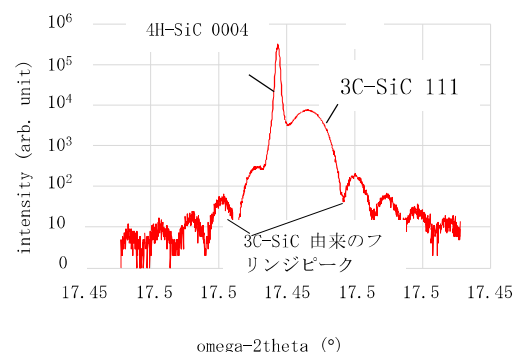


図17. 3C-SiC 111のXRD- ω -2 θ スキャングラフ。測定場所は3インチウェハーのほぼ中央部。

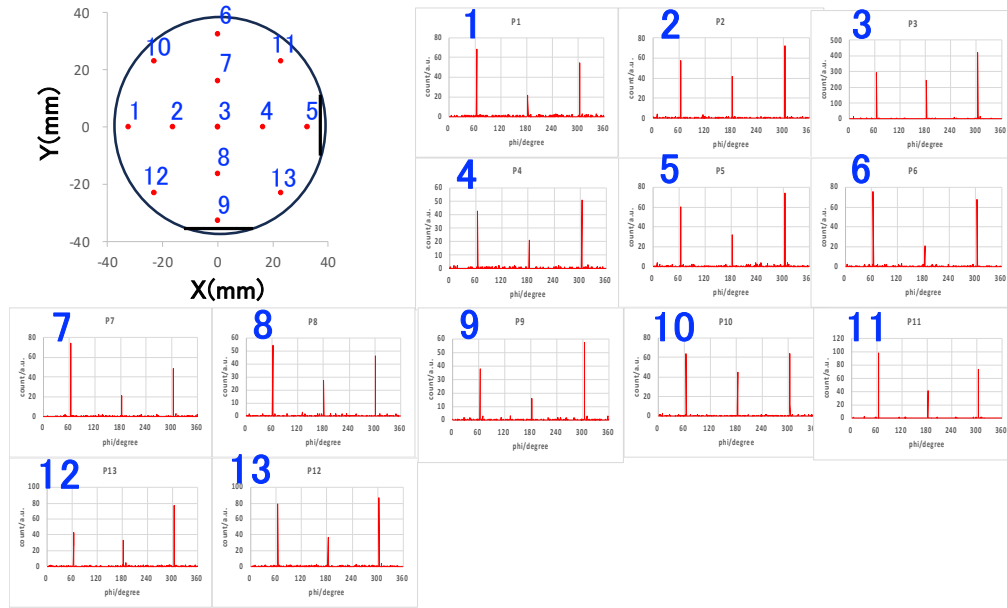


図18. 3C-SiC 113のXRD-φスキャングラフ。3インチウエハー。

ークは $\phi=0^\circ$ 、 120° 、 240° の3つだけだった。もし、3C-SiCが複数ドメインで構成される場合、ピークは $\phi=0^\circ$ 、 60° 、 120° 、 180° 、 240° 、 300° の合計6本が観察されるはずである。この結果から、成長した3C-SiCは3インチウエハー全面で単ドメインであることがわかった。前項⑤の検討において単ドメイン形成の要件であるオフ角度とオフ方位の制御が4インチ基板上で確認され、さらに本項の検討により3インチ基板上での単ドメイン成長が確認されたことから、目標である「4インチ基板上に3C/4H-SiCヘテロ接合を形成（成長は基板を4分割して実施）」を達成したと判断する。

次に2DEG発生を評価するため、渦電流法によるシート抵抗測定を行った。結果を図19に示す。測定点は(a)に示した基板の周辺部5mmを除く55点とした。55点の平均は $576 \Omega \text{cm}^2$ だった。図4に示した移動度とシートキャリア濃度の値を用い、式によりシート抵抗値 R_s を計算した。

$$R_s = \frac{1}{q \cdot \mu \cdot n_s} \quad (1)$$

ここでは素電荷、 μ は移動度、 n_s はシートキャリア濃度である。

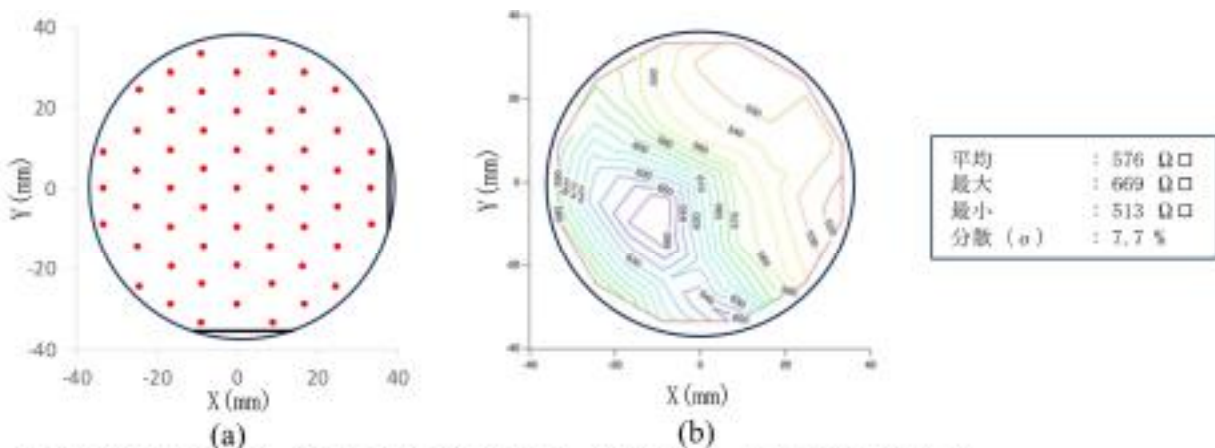
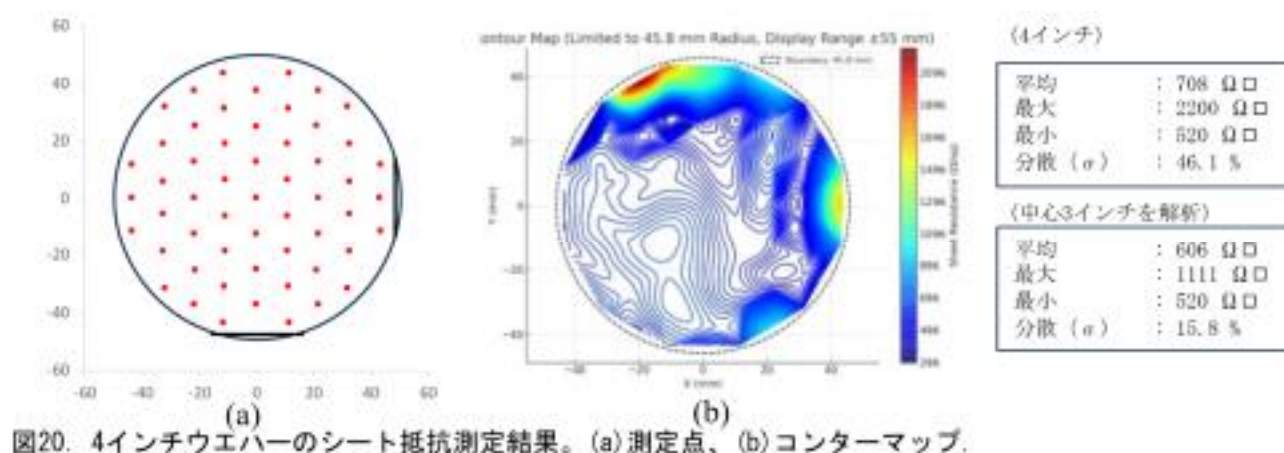


図19. 3インチウエハーのシート抵抗測定結果。(a)測定点、(b)コンターマップ。

シート抵抗値 R_s は $543 \Omega \text{cm}^2$ と計算された。この値は測定値 $576 \Omega \text{cm}^2$ を極めてよく近似しており、3 インチウエハー全面に 2DEG が生成されていると見て良い。観察されたシート抵抗値の面内分布は $\sigma=7.7 \%$ だった。この結果により、目標「接合のシート抵抗分布 $\sigma \pm 20\%$ 以下」を達成した。

加工された 4 インチウエハーを $\phi 3$ インチにくり抜いて成長に供した理由は、申請者らの所有する熱 CVD 炉が 3 インチ仕様だからである。参考として 4 インチウエハーのまま成長し作製した 3C/4H-SiC ヘテロ接合ウエハーのシート抵抗測定結果を図 20 に示す。シート抵抗値はウエハー外周部で特に高い結果となったが、中心部の $\phi 3$ インチ部だけを見ても、平均値は $606 \Omega \text{cm}^2$ と高く、また分散も 15.8% と大きかった。この図のマップにおいて原料ガスは右から左に流れる。上下方向にはチャンバー内壁があり、ウエハー端と内壁のクリアランスは 1mm 程度と狭い。また、3 インチウエハーはサセプターのザグリに収まることにより、ウエハー外周部によるガス流に乱れは最小化されるが、4 インチウエハーはザグリを利用できず、外周部の影響がある。これらの要因により、4 インチウエハーでは、最適成長条件からの逸脱が生じ、高いシート抵抗及び高い分散値となったと推定する。



⑦ プロジェクトの総合的推進

月一回の全体ミーティングを通じ、各要素課題に関する研究の進捗を管理し、目標の達成を目指した。研究成果の内容について、特許出願による権利化、国内外の学会発表等を通じた社会への発信を積極的に行なった。展示会での成果公表を通じ企業等へ開発技術の開示を行い、産業化への足がかりを模索した。

4. 委託業務全体の成果

4. 1 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果

本課題で研究対象とした3C/4H-SiCヘテロ接合は、3C-SiCのSi極性面と4H-SiCのC極性面を接合したものである（C面接合）。本接合における2Dキャリア発生メカニズム考察のため、これと反対の極性面どうしを接合したヘテロ接合基板（Si面接合）を作製・評価し、ヘテロ界面に2DEGと逆極性の2次元ホールガス（2DHG）が発生することを発見した。この2DHGをチャンネルとしたp型HEMTを作製し、その動作実証に成功した。これらは世界初のp型SiC-HEMTの実現例である。以下に詳細を述べる。

Si面接合は、3インチ4H-SiC基板のSi面に、C面ヘテロ接合同様に単位セル高さ（ $1c$ ）のステップを形成した基板（ステップ制御基板）を用いて作製した。3C-SiCの厚みは 36nm とした。図21はSi面3C/4H-SiCヘテロ接合のXRD ω - 2θ スキャングラフである。3C-SiCのピークが明瞭に認められ、3C/4H-SiCヘテロ接合が形成されていることがわかる。図22はヘテロ接合の断面TEM像である。C面ヘテロ接合同様に急峻なヘテロ接合界面が形成できていることがわかる。この接合上にvan der Pauw構造を作製しホール測定を行なったところ、ホール係数は正の値を示した。この結果から、Si面接合では、C面接合とは逆符号のキャリアである正孔（ホール）による伝導が起こることがわかった。図23にホール特性の温度依存性を示す。キャリア濃度は測定温度の範囲でほぼ一定だった。これは縮退キャリアに典型的な挙動である。このこと

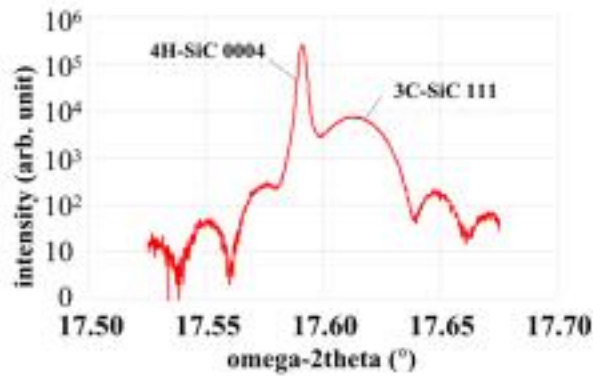


図21. Si面ヘテロ接合のXRD omega-2thetaスキャングラフ

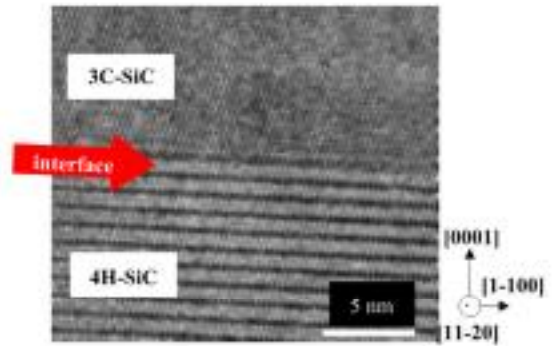


図22. Si面ヘテロ接合の断面TEM像。

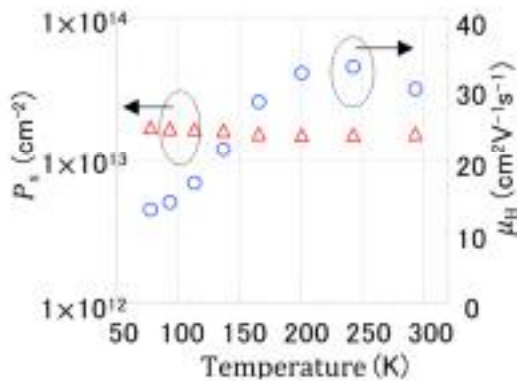


図23. Si面ヘテロ接合のホール特性の温度依存性。

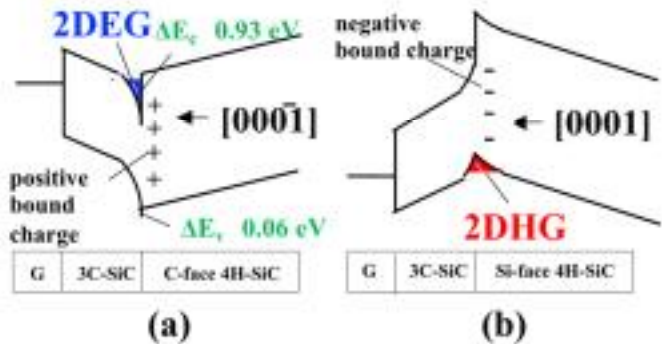


図24. バンド図比較。(a)C面接合, (b)Si面接合。

から観察された正孔は2次元ホールガス(2DHG)であると推測できる。シートキャリア濃度はおよそ $1.6 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ だった。この値は4H-SiCの自発分極により結晶表面にあらわれる電荷密度である $1.34 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ に極めて近い。C面接合における2DEG濃度は $1.48 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ であり、これも4H-SiCの自発分極による表面電荷密度に極めて近い値である。これらの事実を合わせると、3C/4H-SiCヘテロ接合に発生する2Dキャリアガスは、4H-SiC自発分極により4H-SiC表面に生成した電荷を中和するように、3C-SiCに発生した可動電荷であると考えられる。この様子をバンド図で表したものが図24である。C面接合では、3C-SiCと4H-SiCの伝導バンドのエネルギー差は1.0eVである。そのため3C-SiCに発生した電子は強力的に界面に閉じ込められると考えられる一方、Si面接合ではエネルギー差は-0.06eV(4H-SiC側が高い)とほとんど閉じ込めは期待できないにもかかわらず、2次元キャリアが生成している。この理由は、4H-SiCの固定電荷によるクーロン力による引き付けがあるためと考えられる。

このSi面接合上に横型トランジスタ構造を形成した。デバイスの寸法は、 $W_g=50 \mu\text{m}$, $L_{sg}=1.5 \mu\text{m}$, $L_g=3.5 \mu\text{m}$, $L_{ds}=9 \mu\text{m}$ とした。図25にこのトランジスタの構造を示す。(a)は上面光学顕微鏡写真、(b)は断面模式図である。図26はトランジスタのI-V特性である。ゲート電圧に変化に対しドレイン電流が変調し最終的にピンチオフした。(b)は伝達特性である。閾値は7.3V、相互コンダクタンスは9.1mS/mmだった。観察された飽和電流値66.2mA/mmは、2DHGの移動度および濃度から式(2)および(3)を使って計算される値44.0mA/mmに近い。したがって図25で観察された電流変調は、2DHGの濃度変調2より起こったと言える。これらの結果は、世界ではじめてp

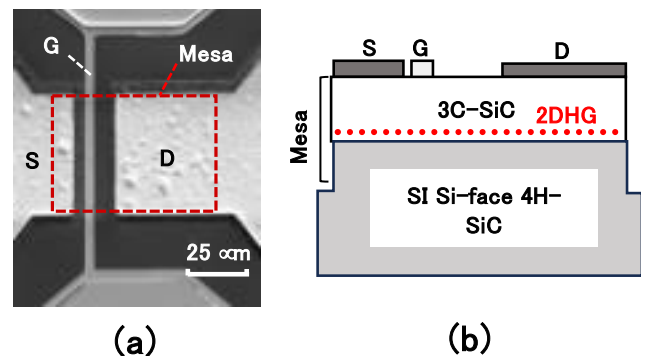


図24. トランジスタの構造。(a)上面光学顕微鏡写真, (b)断面模式図。

型SiC-HEMTの動作を実証したものであり、極めて画期的な研究成果である。ワイドバンドギャップ材料のヘテロ接合でp型HEMTを作製できた例は、GaN-HEMTにおいてわずか1例が報告されるのみである。その移動度は $15\text{cm}^2/\text{Vs}$ であり本接合の半分程度である。p型SiC-HEMTは、ワイドバンドギャップであり、かつ非酸化膜型のpチャネルとして、新たな用途を切り開く可能性がある。

(c)はドレイン電流とゲート電流をプロットしている。ゲート電圧 $V_{gs}=0$ で比べると、ゲート電流とドレイン電流の比は1000ほどあり、C面接合のn型SiC0-HEMTに比べて明らかにゲートリークが小さい。この理由は現時点で明らかになっていないが、この現象のメカニズムを追求することにより、本課題で達成できなかったC面接合における大きなゲートリーク電流を改善する指針を得ることができると考えられる。今後の課題である。

4. 2 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

今回の取り組みにおいてSiC-HEMTのトランジスタ動作を実証できたことは、このSiCヘテロ接合系の電子デバイス材料、特に高出力・高周波デバイス用材料としての高い可能性を示したと言える。SiC材料はすでに産業基盤となる装置インフラ、材料のサプライチェーンが構築されておりこの材料に関する新規技術は産業親和性が高い。そのため残された特性的な課題をクリアすれば産業貢献できる可能性が高い。この観点から、今回の検討で明らかになったn型HEMTのゲートリークは解決すべき課題であり、現在も解決の取り組みを進めている。また、今回の課題は基礎研究としての位置付けに従い、静特性での動作実証を目標としたが、応用的な高周波動作の評価も進めている。

またこれらに加えて、項4-1で述べたp型SiC-HEMTの動作実証に成功したことは、今後のワイドバンドギャップ（WBG）系電子デバイス開発に大きな展開可能性を与えるものである。WBG材料を用いた多くのデバイス群が報告されているが、それらは主にn型である。p型チャネルデバイスはMOS系であり、これらは高温での使用の際に酸化膜界面の順位が応答し閾値が変動するか、あるいは制御が難しくなるという問題を抱えている。本課題で見出したp型SiC-HEMTはWBG材料を使った非酸化膜系p型デバイスである。そのため高温における安定動作が期待できる。この技術を用いて、ゲートドライバー等の相補型アナログ回路を構成すれば、高温環境下で使えるallWBGデバイスの構築も可能である。

4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動

項3の④で述べた世界初のSiC-HEMTの動作実証例はApplied physics letters誌に投稿され、featured articleに選出された。また、この論文はSemiconductor Today 5月号のFeaturesに選出された。一連の成果について、一般社団法人ワイドギャップ半導体学会 (<https://site.widegap.org>) から招待講演を依頼された（令和7年7月25日公演予定）。

5. プロジェクトの総合的推進

5. 1 研究実施体制とマネジメント

代表者と分担者全員による会議を月1回開催した。課題の認識とその解決に向けた議論を通じ

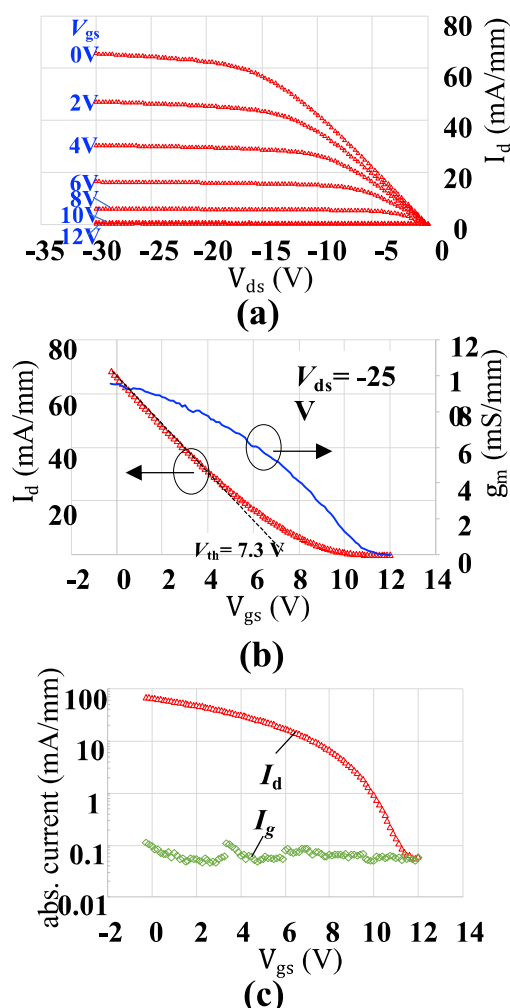


図23. トランジスタの特性。(a) I-V特性、(b) 伝達特性、(c) 伝達特性とゲートリーク。

研究成果の創出を促すと同時に進捗管理を行った。

5. 2 経費の効率的執行

特記事項なし。

6. まとめ、今後の予定

次の2つは本課題の特筆すべき成果である。

- n型SiC-HEMTおよびp型SiC-HEMTの動作実証に成功した。
- 4インチC面3C/4H-SiCヘテロ接合基板の作製に目処をつけた。

本課題は基礎研究的取り組みが主体であったが、今後は応用展開を視野に入れ、次の検討を行う。

- p型SiC-HEMT技術を軸に、n型HEMTとの組み合わせにより相補型駆動回路への展開を目指す。
n型HEMTは本課題で開発したn型SiC-HEMTとGaN-HEMTが候補となる。GaN-HEMTと組み合わせたハイブリッド型開発を令和7年度安全保障研究推進制度タイプAに申請予定である。
- n型SiC-HEMTの高周波特性評価を行う。

7. 研究発表、知的財産権等の状況

(1) 研究発表等の状況

種別	件数
雑誌論文	2件
学会発表	9件
展示	3件
図書	該当なし
プレス	該当なし
その他	該当なし

(2) 知的財産権等の状況

出願1件（報告時点で未公開）。

(3) その他特記事項

該当なし。