

# SiCパワーデバイスの 実用化に向けて

埼玉大学大学院理工学研究科  
数理電子情報部門  
電気電子システム領域

矢口 裕之

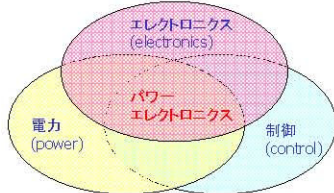
## 内容

1. パワーエレクトロニクス  
～SiCパワーデバイスの活躍が期待される分野～
2. パワーデバイス
3. ハードエレクトロニクス  
～ワイドバンドギャップ半導体による新たな展開～
4. 我々の研究についての紹介
  - In-situ分光エリプソメトリによるSiCの酸化プロセスの解明
  - 反射分光測定による電気的特性評価

## 1. パワーエレクトロニクス

～SiCパワーデバイスの活躍が期待される分野～

### ■ パワーエレクトロニクスとは



- エレクトロニクス
  - 電力(パワー)
  - 制御
- の融合した分野

## 電力分野

- 周波数変換 50 Hz ⇔ 60 Hz  
富士川を境に商用周波数が異なる。
- 直流送電 交直変換  
北海道・本州間の長距離送電で利用。
- 太陽光発電  
蓄えられた直流電力を交流に変換。

## 周波数変換

電力系統図

サイリスタバルブ

## 家電分野

- 蛍光灯回路(インバータ照明)  
点灯および効率の改善
- 白熱電球の調光  
明るさをコントロール
- 電磁調理器  
高周波加熱
- インバータエアコン  
コンプレッサの回転数制御

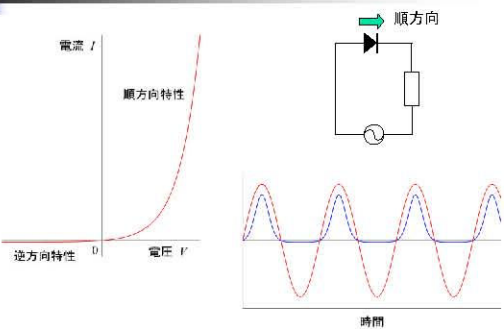
## 交通・輸送分野

- 電車
  - 直流 地下鉄など
  - 交流 新幹線など
- 自動車
  - パワーステアリング
  - パワーウィンドウ
  - サスペンション
  - ヘッドライトなど
  - ハイブリッドカー

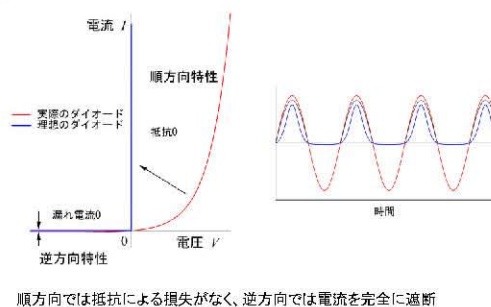
## 2. パワーデバイス

- バイポーラデバイス
  - ・pn接合ダイオード
  - ・バイポーラトランジスタ
  - ・サイリスタ
  - ・GTO
  - ・IGBT
- ユニポーラデバイス
  - ・ショットキーダイオード
  - ・電界効果トランジスタ
    - ・JFET
    - ・MOSFET
    - ・MESFET

## パワーデバイスに求められるもの ~ダイオードを簡単な例として~



## 理想的なダイオード特性

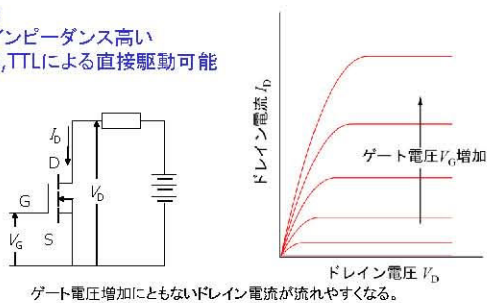


順方向では抵抗による損失がなく、逆方向では電流を完全に遮断

## MOSFET

Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor

電圧制御  
入カインピーダンス高い  
CMOS, TTLによる直接駆動可能



## パワーデバイスとして用いられる 縦型MOSFETの構造

(a) オフ状態 (b) オン状態

耐圧が大きくオン状態での抵抗(オン抵抗)が小さいことが理想

### 3. ハードエレクトロニクス

～ワイドバンドギャップ半導体による新たな展開～

	Si	GaAs	4H-SiC	GaN
バンドギャップエネルギー (eV)	1.1	1.4	3.0	3.4
熱伝導度 (W/mK)	1.51	0.54	4.9	1.3
飽和ドリフト速度 (cm/s)	$1 \times 10^7$	$2 \times 10^7$	$2.7 \times 10^7$	$2.7 \times 10^7$
絶縁破壊電界 (MV/cm)	0.3	0.65	3.5	2.6

Siの物性値によるデバイスの仕様限界  
 大きな絶縁破壊電界を有する  
 ワイドバンドギャップ半導体によって超えることが可能

### SiC

- ・バンドギャップ約3倍
- ・飽和ドリフト速度約2倍 (vs. Si)
- ・絶縁破壊電界約10倍

・オン抵抗約1/300倍

- ・p, n型伝導の制御容易
- ・熱酸化で酸化膜SiO<sub>2</sub>形成

高速動作化  
 小型化 etc...  
 低損失

デバイス化が  
 容易

Si-MOSFETを越える低損失パワーMOSFET

### スイッチングデバイスのオン抵抗

### パワーデバイスへの適用分野

### 高周波デバイスとしてのSiC, GaNデバイスの用途

### SiCパワーデバイス実用化に向けた研究課題

- ・バルク単結晶成長技術
- ・エピタキシャル成長技術  
 転位・欠陥の低減、ポリタイプ制御
- ・酸化膜形成  
 酸化膜/SiC界面における界面準位密度の低減

↓  
 チャンネル移動度が低い原因

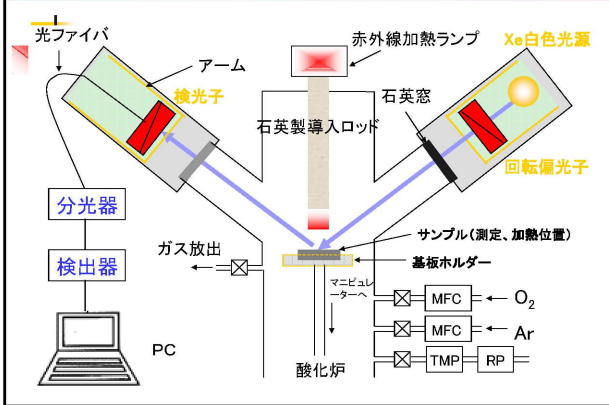
- ・伝導度制御  
 ドーパントの活性化 イオン注入後のアニール
- ・プロセス評価

## RAF成長法 (Repeated A-Face growth method) SiCのマイクロパイプ欠陥や転位・欠陥を除去

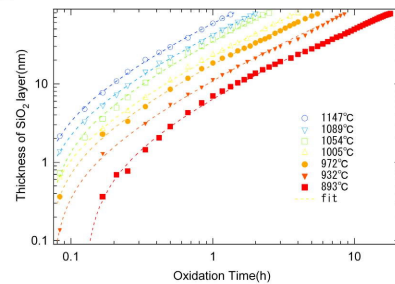
## 4. 我々の研究についての紹介

- In-situ分光エリプソメトリによるSiCの酸化プロセスの解明
- 反射分光測定による電気的特性評価

### In-situ分光エリプソメータの構成図



### SiCの酸化プロセスの 実時間測定結果の例



K. Kakubari, R. Kuboki, Y. Hijikata, H. Yaguchi, and S. Yoshida  
Materials Science Forum, **527-529**, 1031 (2006).

### SiCにおける初期酸化増速

精密な測定によって  
SiCにおいて初期酸化増速が起きていることを初めて見出した。

覚張光一、窪木亮一、山本健史、土方泰斗、矢口裕之、吉田貞史  
第53回応用物理学関係連合講演会 (24a-ZP-9) 2006.

### 反射分光測定による電気的特性評価

- ・キャリア濃度
- ・移動度

一般的に…  
Hall測定 or C-V測定

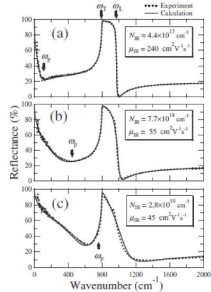
試料上への電極の接触  
や作製が必要

非破壊・非接触  
光学的測定

ラマン散乱分光測定  
可視域吸収率測定  
赤外分光エリプソメトリ測定

赤外反射分光測定

## キャリア濃度の異なるSiC基板の赤外反射スペクトル



低  
↑  
キャリア濃度  
↓  
高

K. Narita, Y. Hijikata, H. Yaguchi, S. Yoshida and S. Nakashima  
Jpn. J. Appl. Phys. **43**, 5151 (2004).

## SiCの電気的特性の定量評価

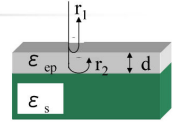
### 反射スペクトルからの $N, \mu, d$ の定量的評価

$$R = \left| \frac{r_1 + r_2 e^{-2i\delta}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta}} \right|^2$$

$r$ : フレネル係数

$$2\delta = \frac{4\pi}{\lambda} n d$$

膜厚



Modified classical Dielectric function (MDF) model

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty \left[ \frac{\omega_L^2 - \omega^2 - i\Gamma_L\omega}{\omega_T^2 - \omega^2 - i\Gamma_T\omega} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma_p)} \right]$$

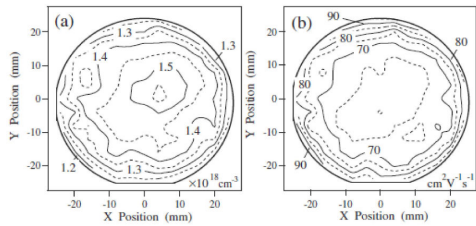
キャリア濃度

$$\omega_p = \sqrt{\frac{Nq^2}{m^* \epsilon_\infty}}$$

$$\gamma_p = \frac{q}{m^* \mu}$$

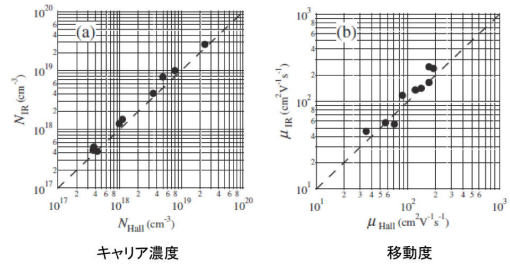
移動度

## 市販のSiC基板における電気的特性の面内分布

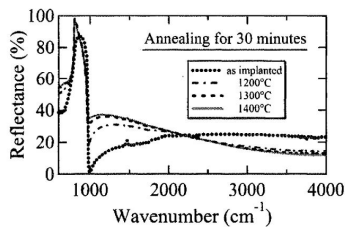


キャリア濃度と移動度が独立に求められる

## ホール測定との結果の比較



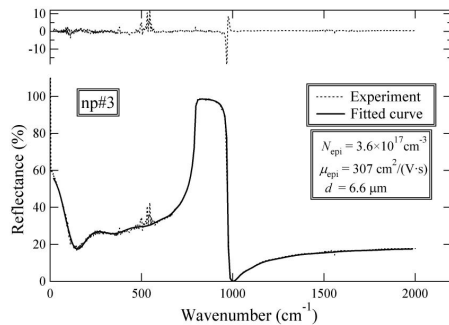
## イオン注入後アニール処理による反射スペクトルの変化



ドーパントの活性化と結晶性の回復とを同時に評価可能

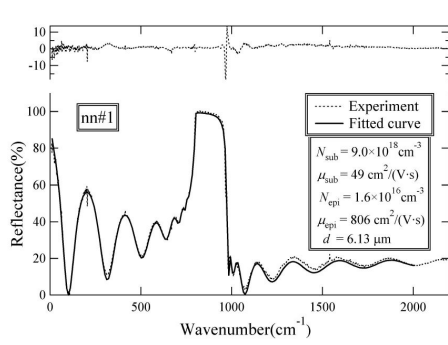
K. Narita, Y. Hijikata, H. Yaguchi, S. Yoshida, J. Senzaki, and S. Nakashima  
Materials Science Forum, **457-460** (II), 905 (2004).

## n型エピ膜付p型ウエハ



S. Oishi, Y. Hijikata, H. Yaguchi, and S. Yoshida  
Jpn. J. Appl. Phys., **45**, L1226 (2006).

### n型エピ膜付n型ウェハ



フィッティングされた赤外反射スペクトル

### まとめ

Siパワーデバイスの性能を超えるため  
ワイドバンドギャップ半導体による新たな展開の一つ  
としてSiCパワーデバイスの実現に向けた研究に  
ついて紹介

- In-situ分光エリプソメトリによるSiCの酸化プロセスの解明
- 反射分光測定による電気的特性評価