

# 「次世代パワーエレクトロニクスの課題と評価技術」目次

## 第1章 次世代パワーデバイスの動向と技術課題

### 第1節 シリコン, SiC パワーデバイス

- はじめに
- 1.1 パワーエレクトロニクス・パワーデバイス
- 1.2 パワーデバイスの役割
- 1.3 パワーデバイスの主役: パワー MOSFET と IGBT
2. SiC パワーデバイス
  - 2.1 パワー MOSFET
  - 2.2 IGBT
3. SiC パワーデバイス
  - 3.1 SiC の特徴
  - 3.2 SiC JBS ダイオード
  - 3.3 SiC MOSFET
  - 3.4 高耐熱ならびに高速スイッチング特性を実現するための実装技術
  - 3.5 次世代 SiC MOSFET
  - 3.6 より使いやすい SiC MOSFET 実現を目指して

### 第2節 GaN パワーデバイスの動向と技術課題

- はじめに
2. ここ 3~4 年での動向
3. 技術課題
  - 3.1 まだ課題として認識されていないような課題
  - 3.2 できたとしたら GaN パワーデバイスにとって役立つはずだが、まだ実現していない課題
    - 3.2.1 イオン注入 p 層
  - 3.3 できることはわかってきた(いるがコスト(費用や時間等)がかかりすぎることが課題となっているもの
    - 3.3.1 基板
    - 3.3.2 GaN 基板加工
  - 3.4 ある程度確立はされてきたが、課題があるのかどうかまだ十分には調べられていないこと
    - 3.4.1 MIS トランジスタ用ゲート絶縁膜
    - 3.4.2 ドリフト層エピタキシャル成長
    - 3.4.3 結晶欠陥の検出と評価
4. 今後の展望

### 第3節 Ga203 パワーデバイス

- はじめに
2. パワーデバイス用途に重要な Ga203 物性
3. Ga203 単結晶バルク融液成長技術
4. Ga203 薄膜エピタキシャル成長技術
5. Ga203 ダイオード
  - 5.1 Ga203 ショットキーバリアダイオード
  - 5.2 ヘテロ接合 p-n ダイオード
6. Ga203 トランジスタ
  - 6.1 横型 Ga203FET
  - 6.2 縦型 Ga203FET
7. Ga203 デバイスの実用化への課題
8. おわりに

### 第4節 ダイヤモンドエレクトロニクス

- はじめに
2. ダイヤモンド半導体の特徴
3. ダイヤモンドウェハ開発
4. ダイヤモンドデバイス開発

- 4.1 ダイオード
- 4.2 スwitchングデバイス
5. 課題と評価技術
6. まとめ

## 第2章 次世代パワーデバイス・基板・材料の評価・解析技術

### 第1節 大口径 SiC 単結晶基板の量産と結晶欠陥

- はじめに
2. 昇華再結晶法による SiC 単結晶成長
3. SiC 単結晶のその他の結晶成長方法
4. SiC 単結晶中に存在する結晶欠陥
5. SiC 単結晶成長中の基底面転位の発生メカニズム
6. おわりに

### 第2節 大口径・高純度 GaN 単結晶基板の量産法と結晶評価

- はじめに
2. アモノサーマル法による結晶成長
  - 2.1 アモノサーマル法について
  - 2.2 アモノサーマル法に用いるオートクレーブの課題
  - 2.3 低圧酸性アモノサーマル(LPAAT)法について
3. 結晶品質評価
  - 3.1 SCAAT GaN 結晶
  - 3.2 LPAAT(SCAAT-LP)GaN 結晶
4. 結言

### 第3節 次世代パワー半導体 Ga203 の結晶欠陥とデバイス特性に与える影響

- はじめに
2. 実験方法
  - 2.1 X線トポグラフィ (XRT)
  - 2.2 エミッション顕微鏡
3. エッチピットの分類
  - 3.1 EFG 結晶(010)面方位
  - 3.2 EFG(001)面方位
    4. 欠陥の SBD デバイス特性への影響
      - 4.1 転位と SBD リーク電流との関係—EFG(010)面上 SBD に関する初期の研究結果
      - 4.2 エミッション顕微鏡観察—最近の結果
        - 4.2.1 EFG(001)基板上 SBD
        - 4.2.2 HVPE(001)面上 SBD—多孔質粒子に由来する多結晶欠陥
        - 4.2.3 HVPE(001)SBD—マイクロ粒子(パウダー)に由来した積層欠陥
        - 4.2.4 HVPE(001)SBD—探針接触による
        - 4.2.5 HVPE(001)SBD—ライン状の表面欠陥—転位網表面欠陥
    5. まとめ

### 第4節 SiC パワーデバイス用イオン注入装置

- はじめに
2. SiC パワーデバイスプロセス
  - 2.1 イオン注入時のプロセス温度
  - 2.2 イオン注入後のアニールプロセス
  - 2.3 高エネルギー注入
3. 高スループットと搬送信頼性
4. 最後に

## 第5節 GaN 基板の超精密加工・洗浄と評価技術

1. はじめに
2. 難加工単結晶基板加工のポイント
3. GaN 基板製造の基礎プロセス
4. GaN 基板の洗浄プロセスにおける検討事項
5. GaN 基板加工に関わる評価技術
6. おわりに

## 第6節 次世代パワーデバイスの分析・評価技術

1. はじめに
2. 二次イオン質量分析法 (Secondary Ion Mass Spectrometry: SIMS)
  - 2.1 D-SIMS を用いた SiC 基板の深さ方向分布評価
  - 2.2 NanoSIMS を用いた SiC MOSFET の断面分布評価
3. カソードルミネッセンス法 (Cathodoluminescence: CL)
  - 3.1 Si IGBT のライフタイムキラー欠陥評価
  - 3.2 SiC MOSFET のイオン注入欠陥評価
  - 3.3 GaN HEMT のイオン注入欠陥評価
4. 透過電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope: TEM)
  - 4.1 GaN HEMT の AlGaIn/GaN 界面評価
  - 4.2 DPC-STEM 法を用いた接合界面評価
5. 走査型静電容量顕微鏡 (Scanning Capacitance Microscope: SCM)
  - 5.1 SiC MOSFET のキャリア分布評価
  - 5.2 GaN HEMT の AlGaIn/GaN のキャリア分布評価

## 第7節 SiC-MOS デバイスのしきい値電圧変動とその評価技術

1. はじめに
2. 正の DC 電圧ストレスによるしきい値電圧変動 (PBTI) 評価
3. 負の DC 電圧ストレスによるしきい値電圧変動 (NBTI) 評価
4. AC 電圧ストレスによるしきい値電圧変動評価
5. まとめと今後の展望

## 第8節 全方位フォトルミネッセンス (ODPL) 分光法を用いた GaN 自立結晶の評価

1. はじめに
2. 全方位フォトルミネッセンス (ODPL) 法
  - 2.1 ODPL 法概説
  - 2.2 吸収率 ( $\beta$ ) および外部量子効率 ( $\eta$ ) 測定
  - 2.3 双峰性スペクトルの解釈
  - 2.4 吸収領域 ( $E > E_{\text{abs}}$ ) を基準にした IQE の決定
3. 応用例: GaN 結晶中の炭素不純物濃度の推定
4. まとめ

## 第9節 テラヘルツエリプソメトリーによる SiC、GaN の電気特性評価

1. はじめに
2. THz 周波数帯を用いた電気特性測定
  - 2.1 Drude Model
  - 2.2 時間領域分光エリプソメトリー
3. THz-TDSE 技術の現状
4. THz-TDSE による電気特性測定の紹介
  - 4.1 GaN 単結晶の測定
  - 4.2 SiC 単結晶の測定
5. THz-TDSE を用いた新しい取り組み

- 5.1 SiC エピタキシャル膜バッファ層の厚さと電気特性測定
- 5.2 SiC のイオン注入層の電気特性測定
6. まとめ

## 第3章 次世代パワーモジュール・構成材料、パワエレ製品・周辺材料の高信頼化と評価・解析技術

### 第1節 次世代パワーデバイスの信頼性技術と故障解析技術

1. 次世代パワーデバイスの信頼性技術
  - 1.1 パワーデバイスについて
  - 1.2 パワーデバイスの一般的な信頼性試験について
    - 1.2.1 高温動作寿命試験 (高温逆バイアス試験)・高温高湿バイアス寿命試験
    - 1.2.2 温度サイクル試験・熱衝撃試験
    - 1.2.3 その他の信頼性試験
  - 1.3 パワーデバイス特有のパワーサイクル試験について
  - 1.4 正確なパワーサイクル評価のためには
    - 1.4.1 評価で考慮すべき事項
    - 1.4.2 システムによるサージノイズ: 試験通電オン時
    - 1.4.3 システムによるサージノイズ: 試験通電オフ時
    - 1.4.4 試験の制御方法
    - 1.4.5 T<sub>j</sub> 測定
    - 1.4.6 熱抵抗測定
    - 1.4.7 ダイボンド材や樹脂材料
    - 1.4.8 クラック以外の劣化現象
2. 次世代パワーデバイスの故障解析技術
  - 2.1 次世代パワーデバイスの評価解析について
  - 2.2 初動調査
  - 2.3 非破壊検査
    - 2.3.1 X線検査装置/X線CT検査装置
    - 2.3.2 走査超音波顕微鏡 (C-SAM)
  - 2.4 故障箇所推定
    - 2.4.1 ロックイン赤外線発熱解析 (LIT: Lock-In Thermal Emission)
    - 2.4.2 OBIRCH 解析
  - 2.5 物理解析
    - 2.5.1 断面研磨からの解析から結晶方位解析
    - 2.5.2 FIB を使用した断面試料作成
3. 根本原因の追及。今後懸念される劣化現象 (サーモマイグレーション)

### 第2節 次世代パワーデバイス実装材料の評価技術

1. はじめに
2. パワーデバイスモジュールの技術動向と実装材料
3. パワーモジュール実装材料評価用プラットフォーム
4. SiC パワーモジュール用実装材料の信頼性評価
5. 封止樹脂の開発
6. 各種実装材料に特化した評価
7. プラットフォームの高信頼化
8. 結果と今後の方針

### 第3節 電気・熱・応力連成モデルによる SiC パワーモジュールの評価・解析

1. まえがき
2. 温度・応力と電気抵抗の関係
  - 2.1 四点曲げ試験
  - 2.2 四点曲げ構造解析
  - 2.3 モジュール構造解析
3. 温度・応力と電気抵抗の関係

- 3.1 回路モデル
- 3.2 解析結果
- 4. むすび

#### 第4節 有限要素法を活用した高耐熱・長寿命 SiC パワーモジュールの信頼性向上技術

- 1. はじめに
- 2. 高耐熱・高信頼性化に向けた FEM の活用例と課題
  - 2.1 チップ下面でのほんだクラックの解析
  - 2.2 ワイヤ接合部でのリフトオフの解析
  - 2.3 高耐熱モジュールの解析時の課題
- 3. 高耐熱・長寿命 SiC モジュールの開発 ～ 産総研での FEM 活用例 ～
  - 3.1 チップ上面への CTE 緩衝板接合構造の開発
  - 3.2 有限要素法による CTE 緩衝板接合構造の最適化 ～ 接合部の応力解析への適用 ～
  - 3.3 材料評価手法の活用例
    - 3.3.1 Cu 焼結材を用いた CTE 緩衝板接合の機械的強度の評価
    - 3.3.2 CTE 緩衝板接合による過渡熱抵抗の低減効果
  - 4. パワーサイクル試験結果とその分析
    - 4.1 パワーサイクル試験結果
    - 4.2 故障発生部の分析
  - 5. まとめ

#### 第5節 次世代パワーデバイス開発における TCAD シミュレーションの活用

- 1. はじめに
- 2. TCAD について
  - 2.1 TCAD の目的
  - 2.2 TCAD の分類
    - 2.2.1 プロセス・シミュレーション
    - 2.2.2 デバイス・シミュレーション
  - 3. パワーデバイスでの TCAD シミュレーション活用事例
    - 3.1 GaN Super HFET の解析
    - 3.2 SiC デバイスのトレンチ形状による影響解析
    - 3.3 Si-IGBT 短絡耐量解析
  - 4. まとめ

#### 第6節 次世代パワーエレクトロニクスにおけるシミュレーション技術

- 1. はじめに
- 2. パワーデバイスの熱解析
- 3. 電源システムの熱設計と評価
- 4. 次世代パワーエレクトロニクス設計のための統合評価技術
  - 4.1 モデル縮約による複数領域の結合
  - 4.2 GPU を用いた高速計算技術
  - 4.3 汎用ツール連携の動向
- 5. まとめ

#### 第7節 次世代パワーデバイスの特性評価と高周波化したパワエレ回路シミュレーション

- 1. はじめに
- 2. 高精度デバイスモデルとモデルパラメータ用のデバイス特性評価
  - 2.1 IV 特性評価
  - 2.2 CV 特性評価
  - 2.3 S パラメータ評価

- 2.4 オン状態 CV 特性評価
- 2.5 高出力 IV
- 2.6 モデルパラメータ抽出用ソフト
- 3. 動特性評価
- 4. 正確な WBG デバイス回路シミュレーション
  - 4.1 正確な WBG デバイス回路シミュレーションを実現するソリューション例
- 5. おわりに

#### 第8節 EV モータ, インバータ開発のための電力測定

- 1. はじめに
- 2. xEV におけるパワートレイン構成
- 3. モータ, インバータ開発における課題
- 4. インバータ・モータの電力・効率・損失測定
  - 4.1 インバータ入力電力の高精度測定
  - 4.2 インバータ出力電力の高精度測定
    - 4.2.1 電流センサによる大電流の測定
    - 4.2.2 位相誤差の影響
    - 4.2.3 エイリアシングの影響
  - 4.3 モータ出力の高精度測定
- 5. まとめ

#### 第9節 パワエレ用コンデンサ技術と車載用コンデンサの解析

- 1. はじめに
- 2. 誘電体特性について
- 3. コンデンサのインピーダンス
  - 3.1 コンデンサ電極部の抵抗
  - 3.2 コンデンサ誘電体部のインピーダンス
  - 3.3 コンデンサの寄生インダクタンス
  - 3.4 コンデンサの等価回路
  - 3.5 コンデンサのインピーダンス実測値との比較
- 4. コンデンサの損失計算と内部温度推定
  - 4.1 フーリエ級数によるコンデンサ発熱量計算
  - 4.2 伝熱解析
  - 5. 駆動用インバータ平滑コンデンサについて
    - 5.1 メタライズドポリプロピレンフィルムコンデンサが使用される理由
    - 5.2 駆動用インバータ平滑コンデンサの解析
      - 5.2.1 モジュール外観と内部素子構造
      - 5.2.2 電気的特性
      - 5.2.3 コンデンサ素子の解体調査
      - 5.2.4 バスバー
      - 5.2.5 パッケージング

#### 第10節 IGBT 接合の課題と高耐振 IGBT 用コネクタの開発

- 1. はじめに
- 2. IGBT の組立(接続)課題
  - 2.1 従来技術
  - 2.2 従来技術の課題
  - 2.3 従来技術の課題に対する対応
    - 2.3.1 課題解決へのアプローチ
    - 2.3.2 フローティングコネクタとは
- 3. コネクタ接続における課題点
  - 3.1 課題の概要
  - 3.2 セットが抱える課題 基板共振
    - 3.2.1 課題
    - 3.2.2 原理・特徴
    - 3.2.3 課題対策・効果

- 3.3 コネクタが抱える課題① コネクタの固有周波数
  - 3.3.1 課題
  - 3.3.2 原理・特徴
  - 3.3.3 課題対策・効果
- 3.4 コネクタが抱える課題② 接点保持
  - 3.4.1 課題
  - 3.4.2 原理・特徴
  - 3.4.3 課題対策・効果
- 4. まとめ