SiC・GaNパワー半導体の最新技術・課題ならびにデバイス評価技術の重要性

2016年7月12日

筑波大学　数理物質系　物理工学域

教授　岩室　憲幸

内　容

1．パワーデバイスの基礎
　1）パワーデバイスの仕事
　2）次世代パワーデバイス開発の位置づけ

2．SiCパワーデバイスの最新技術と課題
　1)なぜSiCが注目されているのか
　2)高温動作ができると何がいいのか
　3)SiC-MOSFETの課題
　4)SiC トレンチMOSFET技術

内　容

３．GaNパワーデバイスの最新技術と課題

1)なぜGaNパワーデバイスなのか

2)SiCとGaNデバイスの構造の違い

3)GaN-HEMTの特徴と課題

４．パワーデバイス評価技術の重要性

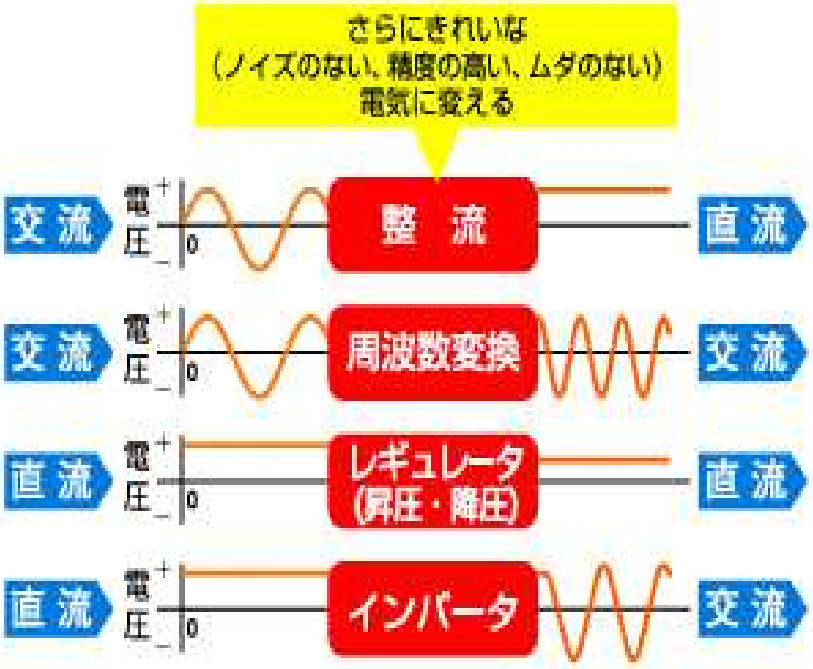
第１章

パワーデバイスの基礎

パワエレ＆パワーデバイスの仕事

交流や直流を各機器に使いやすいように変換する
⇒パワーエレクトロニクスは最適な形に電力変換する技術
⇒パワーデバイスはそのために使う半導体デバイス

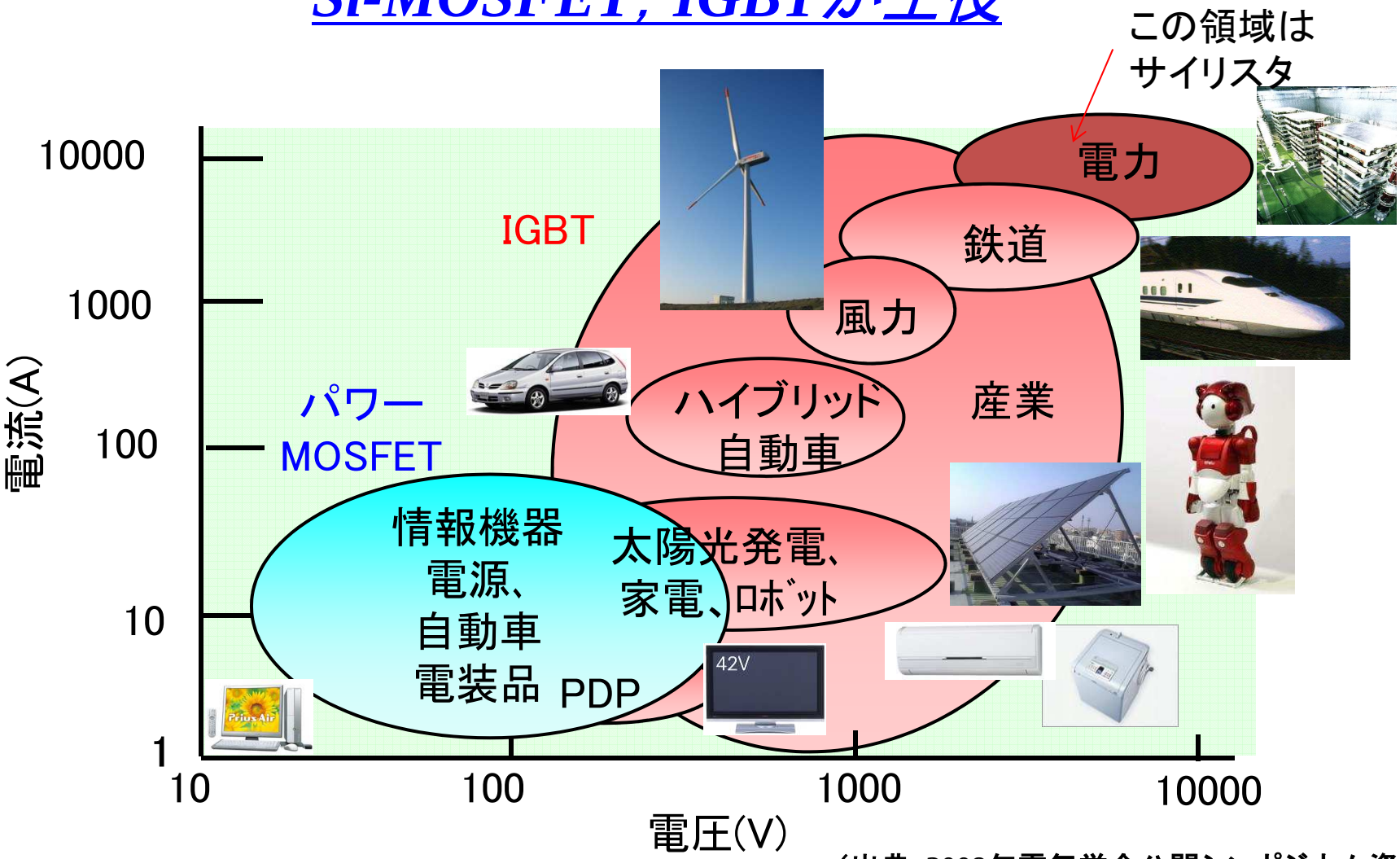
■パワー半導体の仕事



（Ref.サンケン電気㈱HP）

パワーデバイスの適用分野（現状）

Si-MOSFET, IGBTが主役

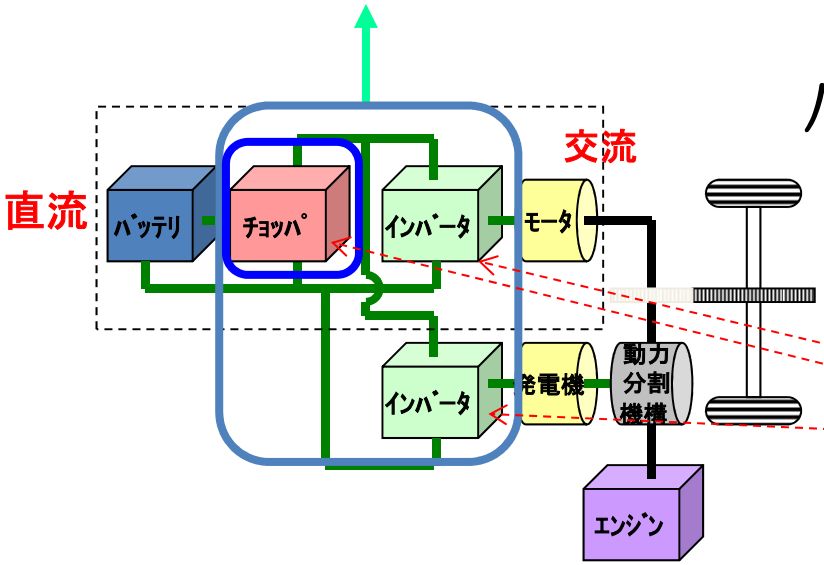


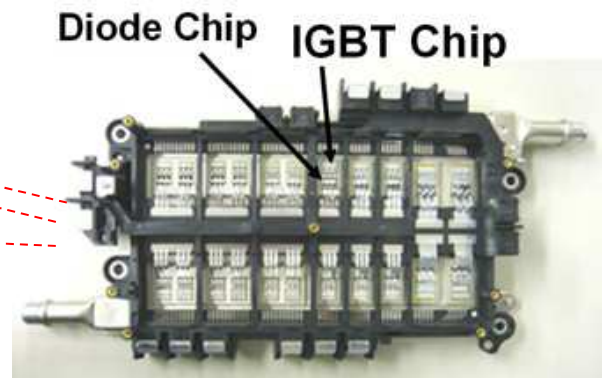
（出典：2008年電気学会公開シンポジウム資料）

トヨタプリウス内のパワエレ装置

PCU

パワー半導体（IGBTモジュール）





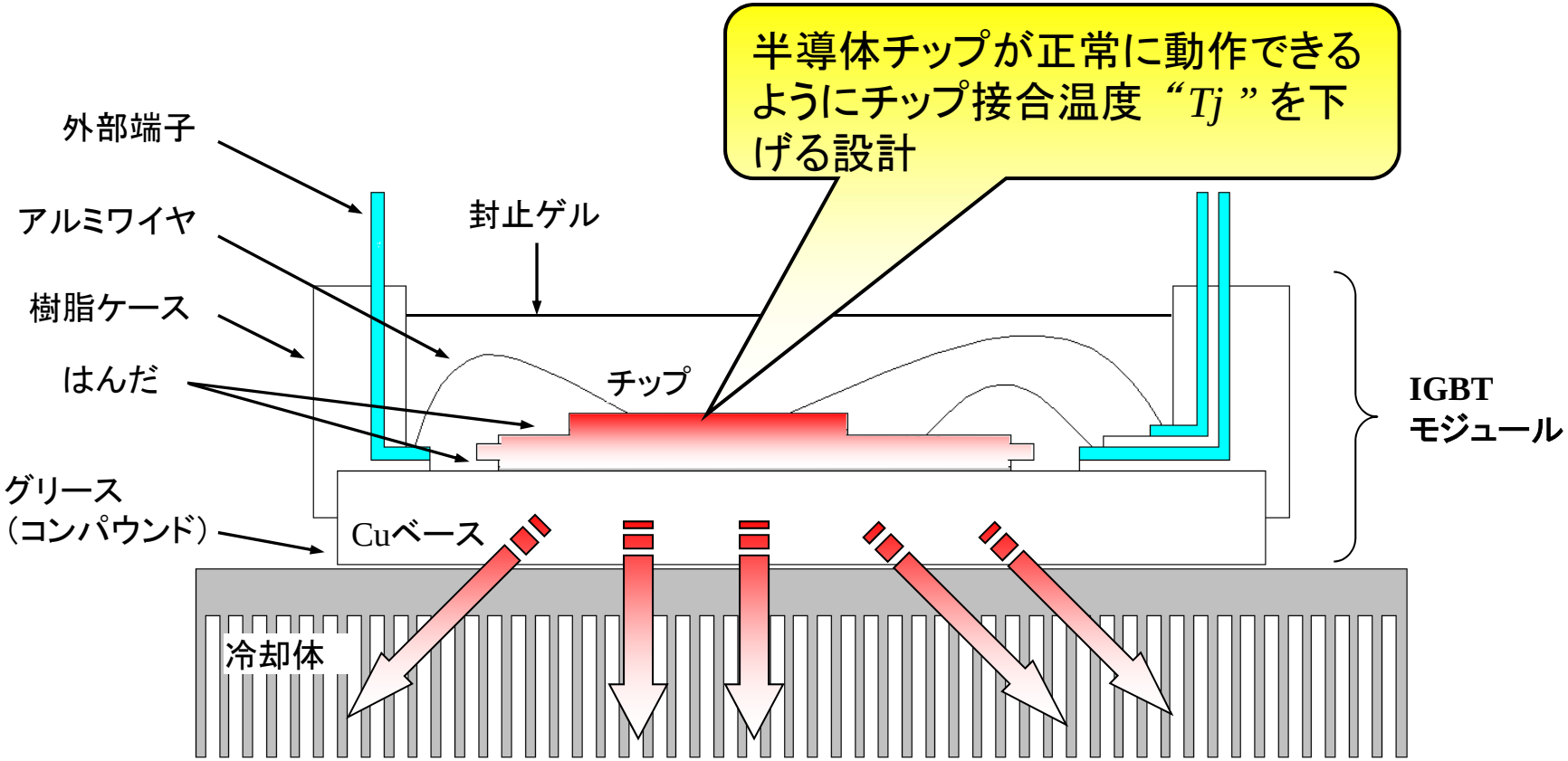
直流⇒交流

プリウス　PCU内部写真

意外と「空間」が多くを占めている

（Ref:http://micom.hamazo.tv/）

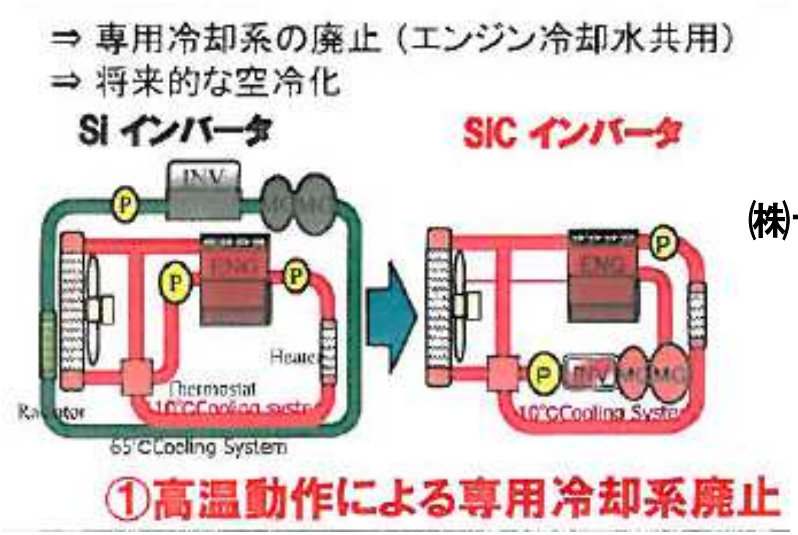
パワー半導体（IGBTモジュール）の縦構造



高温動作ができるとなにがいいのか？

ハイブリッドカー（Lexus　LS600h）

HVｲﾝﾊﾞｰﾀｼｽﾃﾑ



㈱デンソー様資料より

省スペース化⇒小型化

Si-MOSFET，IGBTの伸長

パワーMOSFET, IGBTは、パワーデバイスの主役として、長期間活躍している。なぜか？

市場からの要求

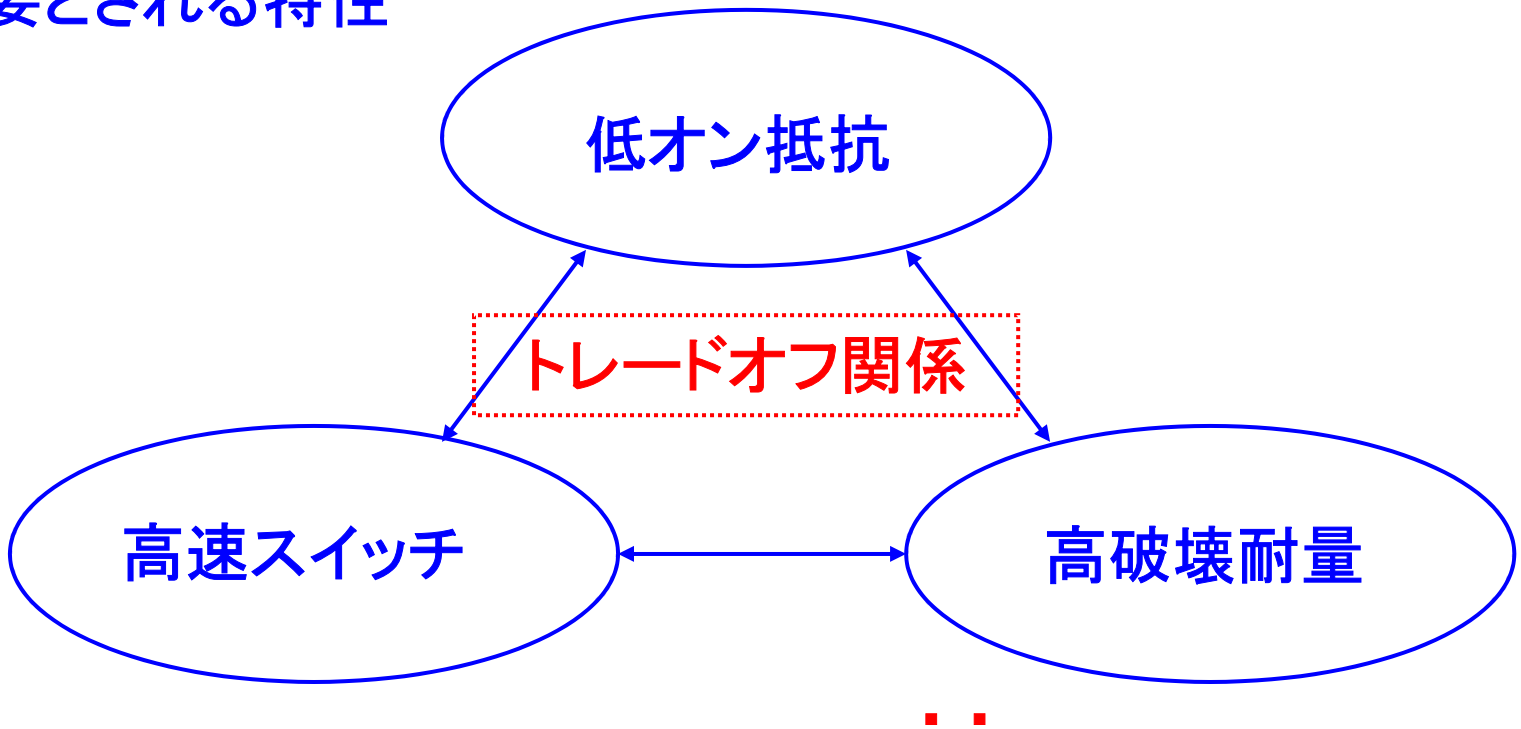
- コストパフォーマンス
- 機能、性能
- 使いやすさ（駆動回路が簡単、壊れにくい）

これにマッチしたから長寿命製品として君臨している

パワーデバイスに要求される特性

低損失特性と高破壊耐量特性の両立

必要とされる特性



ポイント：上記3特性を同時に向上

第２章

SiCパワーデバイスの最新技術と課題

半導体デバイス材料の変遷

Ge

- 初めての半導体デバイス
- μe＝3900　cm2/Vs
- μh＝1900　cm2/Vs
- Eg　＝　0．66eV　　最高動作温度　40℃

Si

- Eg　＝　1．12eV　最高動作温度　150℃
- ほとんどの分野で活躍
- 高速動作
- 高温動作

GaAs

- Eg　＝　1.42eV　　最高動作温度　350℃
- 発光動作　（LD，LEDなど）
- 高速動作　（HEMT，MESFETなど）
- 特殊プロセス
- バイポーラデバイスは困難
- 良質な酸化膜形成困難（MOSFET，保護膜）

GaN

SiC

酸化ガリウム

ダイアモンド

ワイドバンドギャップ半導体

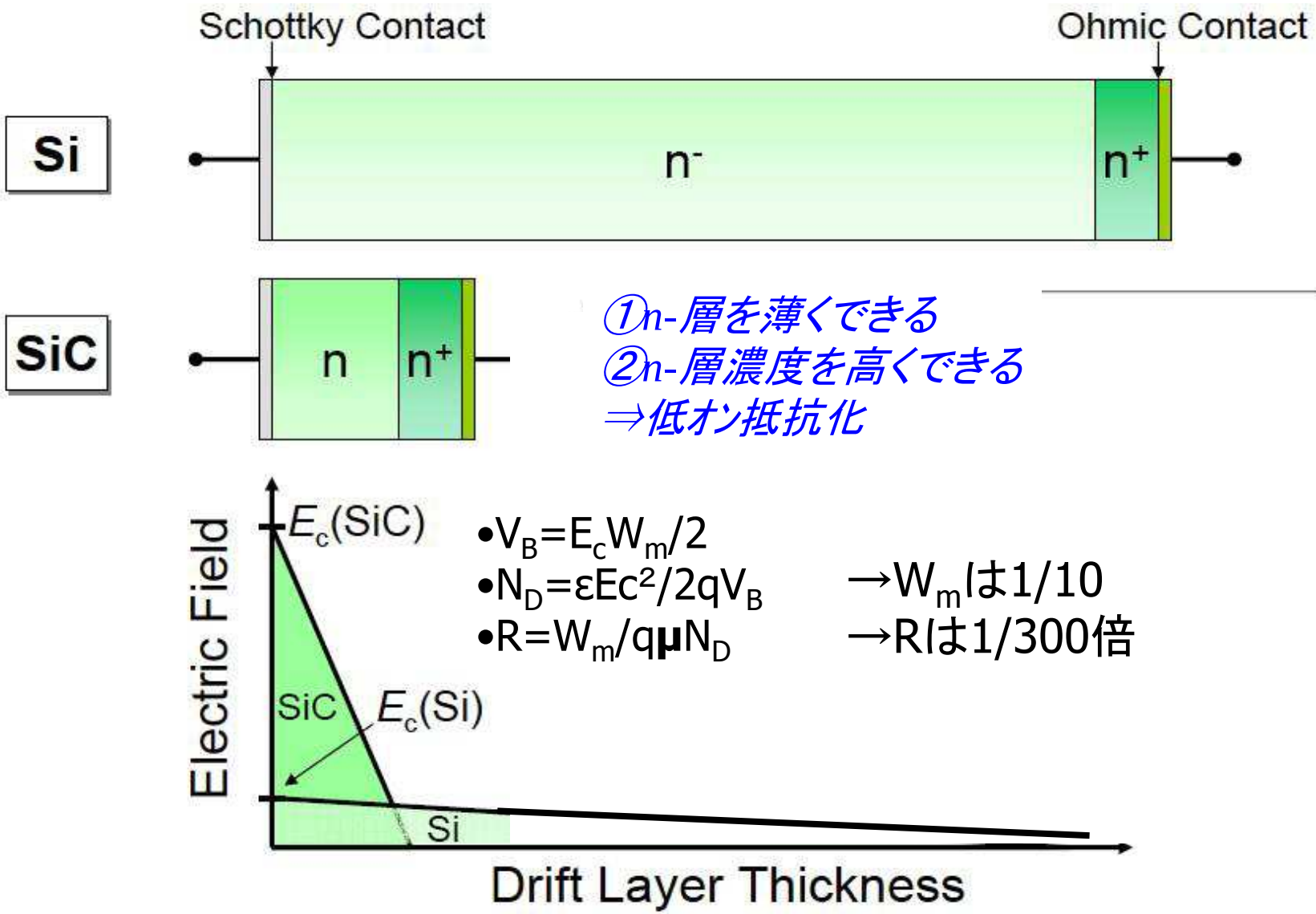
筑波大学 University of Tsukuba

各材料の主要物理定数比較

・ワイドバンドギャップ半導体材料は最大電界強度Emaxが高い
・酸化ガリウムは最大電界強度が高い

	Si	4H－SiC	GaN	ダイアモンド	酸化ガリウム Ga_2O_3
バンドギャップ(eV)	1.12	3.26	3.39	5.47	4.8-4.9
電子移動度(cm2／Vs)	1500	1000	900	2200	300(推定)
正孔移動度(cm2／Vs)	500	120	150	1600	
チャネル移動度(cm2／Vs)	500	140	1500	3800	
最大電界強度(MV／cm)	0.3	3.0	3.3	10.0	8.0
最大電界強度Si比	1	10	11	33	27
熱伝導率(W／cmK)	1.5	4.9	2.0	20.0	
熱伝導率Si比	1	3.3	1.3	13	
飽和速度(cm／s)	1.0E7	2.2E7	2.7E7	2.7E7	
誘電率	11.8	9.7	9.0	5.5	10

SiCのSiに対する利点（SBDの場合）



①n-層を薄くできる
②n-層濃度を高くできる
⇒低オン抵抗化

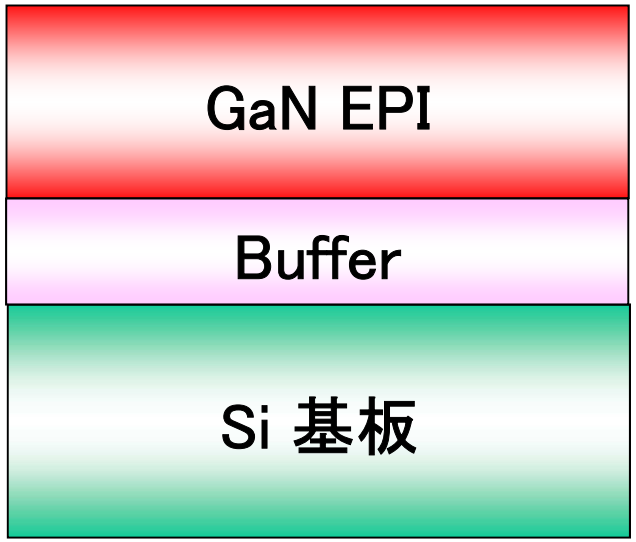
- $V_B = E_c W_m / 2$
- $N_D = \varepsilon Ec^2 / 2qV_B$ →W_mは1/10
- $R = W_m / q\mu N_D$ →Rは1/300倍

SiCならびにGaNデバイス構造

GaN基板はSiCの10倍以上の価格⇒GaN on Siが主流に

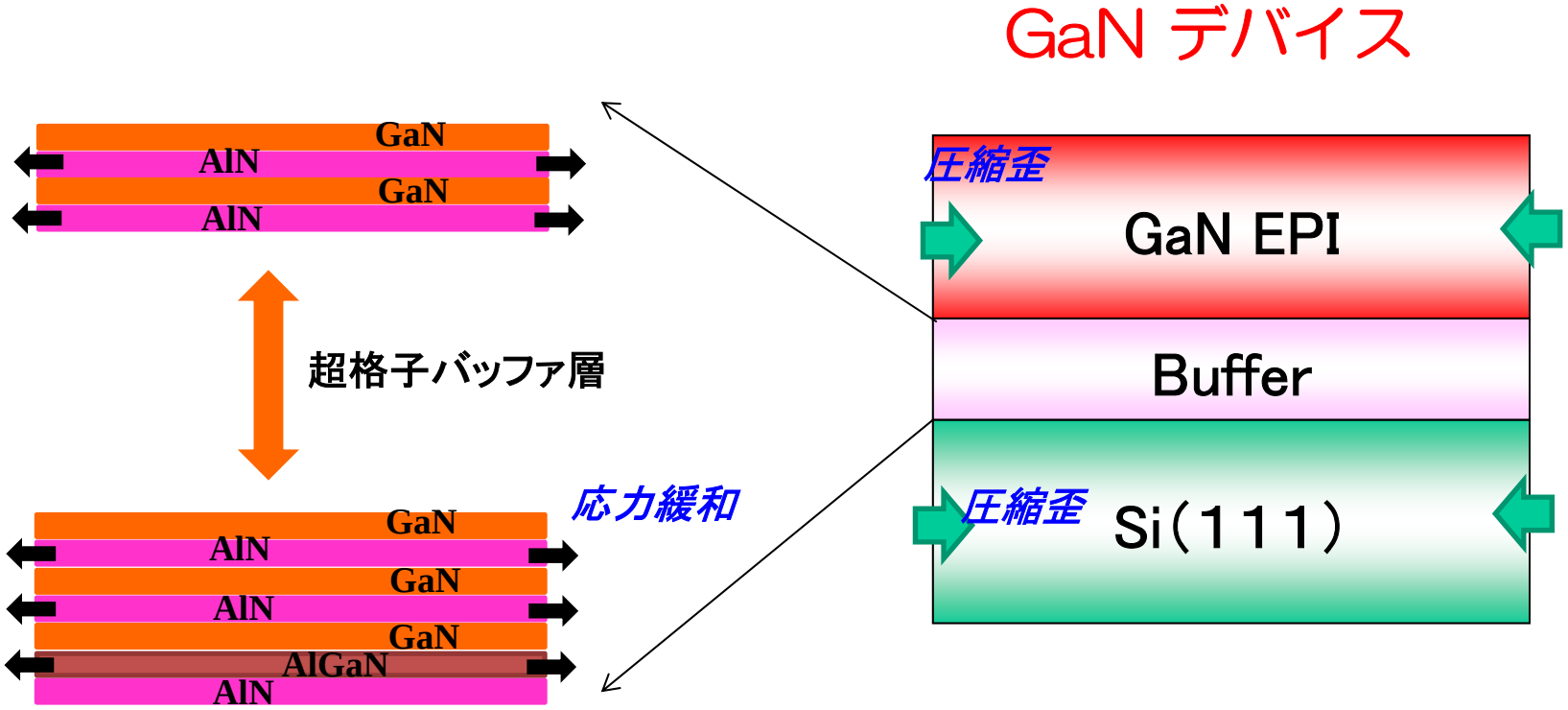
SiC デバイス

GaN デバイス



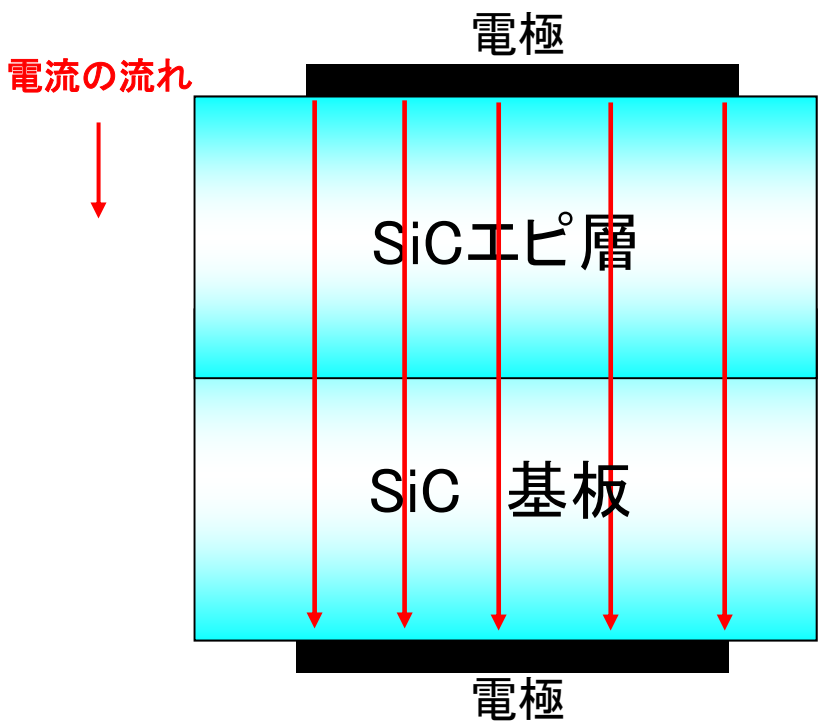
Si基板上へのMOCVDによるエピ膜成長

GaN/AlN多層膜による応力緩和
⇒抵抗が高い膜



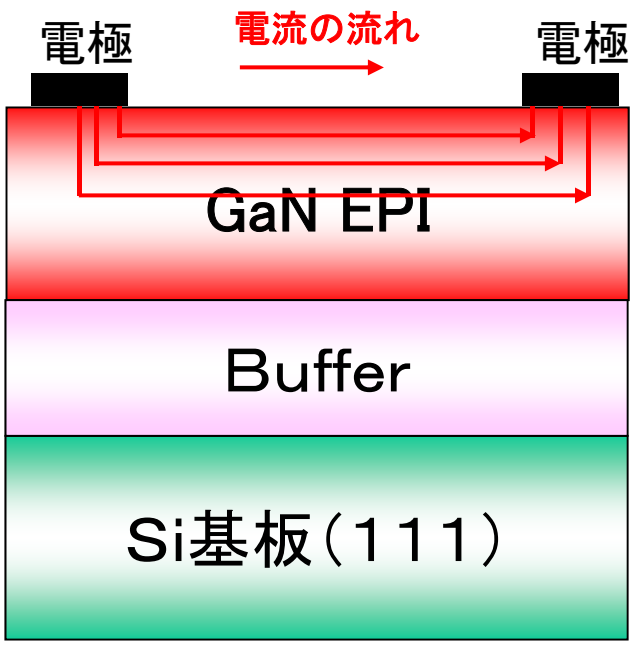
SiCならびにGaNデバイス構造

SiC



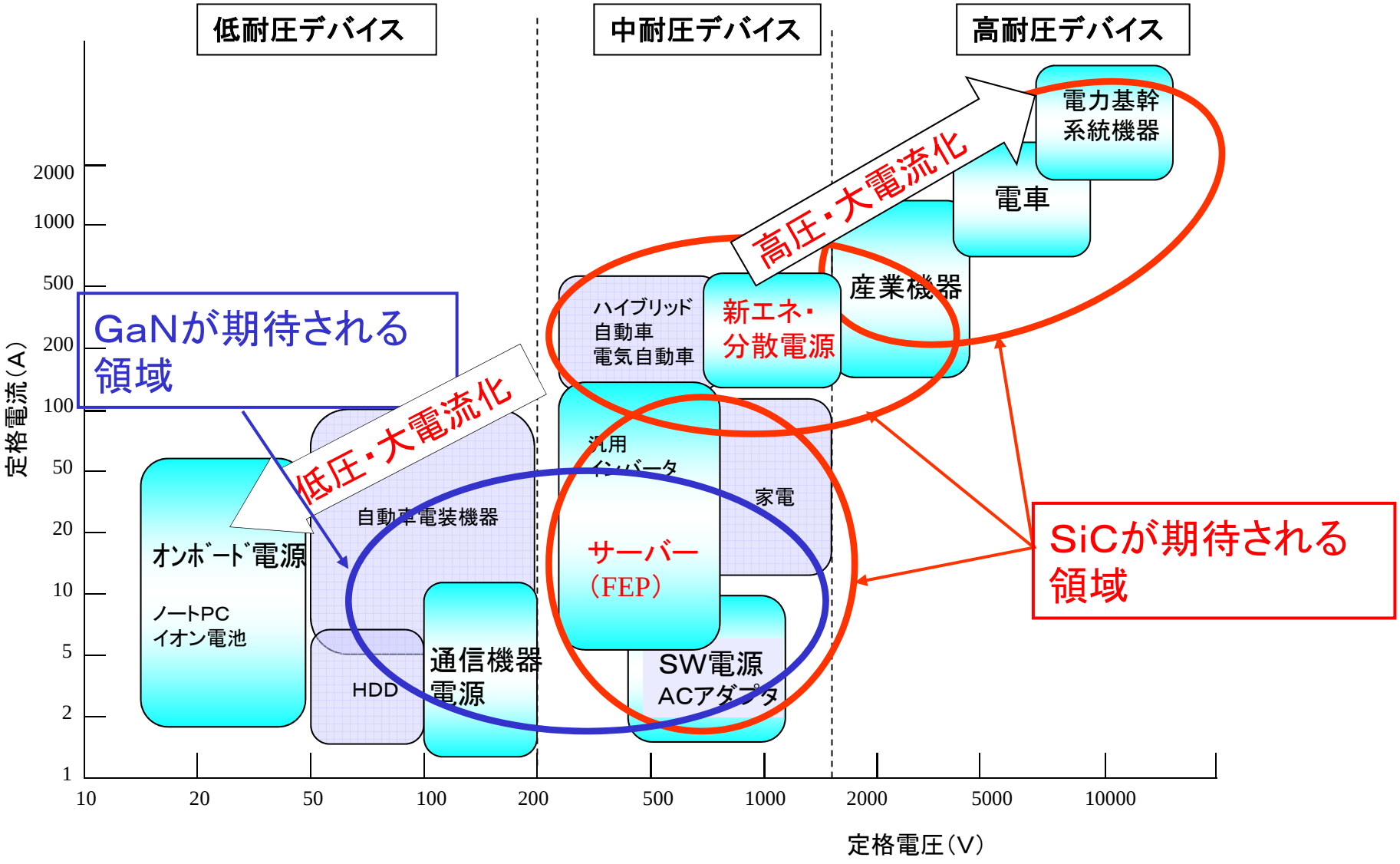
縦型素子
素子全体に均一に電流が流れる
→大電流用途向き

GaN



横型素子
素子表面のみに電流が集中して流れる
→大電流用途向きではない

SiC・GaNデバイスの対象領域



何故SiCパワーデバイスなのか？

1．‘優秀’な保護膜SiO_2がある

2．Siパワーデバイス特性限界説

3．新適用市場からの要求（Siでは物理的に困難な市場）

①高温動作

②耐厳環境動作

③小型軽量化

④高性能高効率化

4．ポストSiへの期待

①新材料への期待

②これまでの開発実績

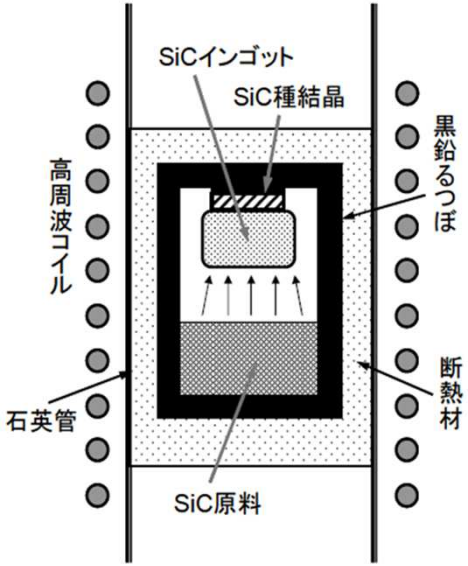
SiCウェハができるまで

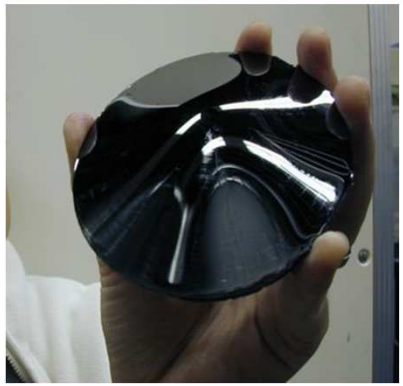
SiC粉末 → インゴット → バルクウェハ → エピタキシャルウェハ

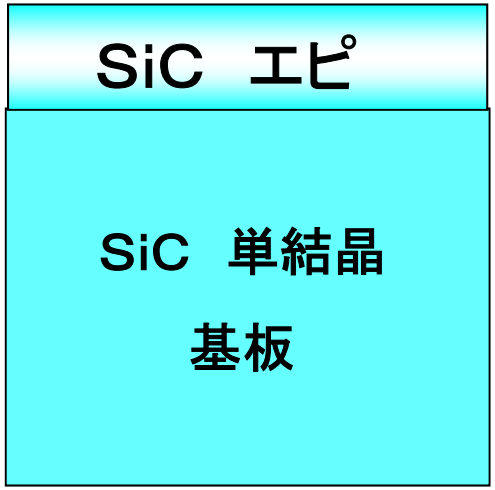
昇華法 (～2200˚C)

切断研磨 ダイヤモンド砥粒、放電加工

エピタキシャル薄膜成長 (1600～1800˚C)







エピ成膜
1）精密膜厚制御
2）低欠陥密度
3）均一性
4）広範囲の濃度制御

SiC結晶・ウェハができるまで

Siに比べコスト高

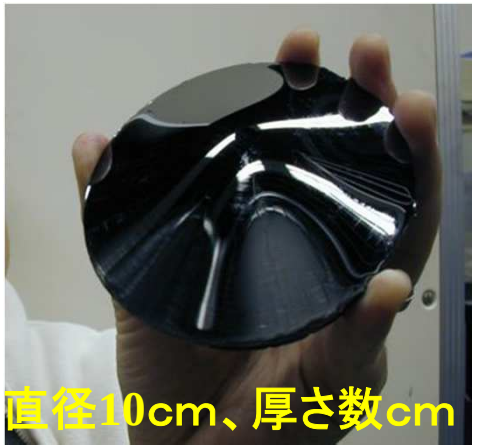
SiC粉末 → インゴット → バルクウェハ → エピタキシャルウェハ

昇華法 (～2200˚C)

切断研磨 ダイヤモンド砥粒、放電加工

エピタキシャル薄膜成長 (1600～1800˚C)

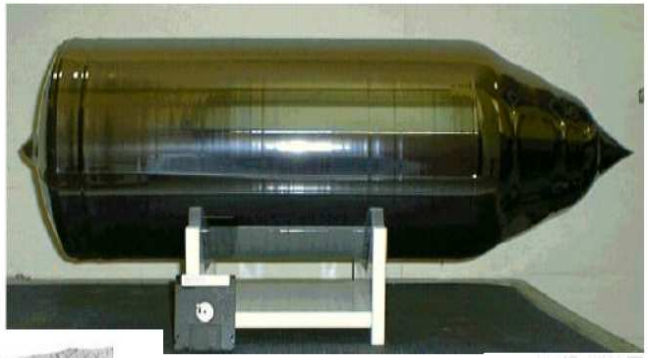
SiC



1枚：～10万円

CZ法による300mmシリコン単結晶（約140Kg）

Si



直径30cm、厚さ～1m

1枚：数千円

Φ6　SiCパワーデバイスの生産

SiCデバイス　6インチ生産ラインを構築（富士電機株式会社　2013年10月）

（長野県松本市）

筑波大学
University of Tsukuba

SiCパワー半導体の製品発表

富士電機がSiC MOSFETを実用化、まずはメガソーラー向けパワコンに適用

効率を98.8%に、体積を20%削減

根津 禎＝日経エレクトロニクス　2014/05/29 16:03

いいね！ 12　ツイート 3　ブックマーク　印刷

マキシム・ジャパン株式会社 無償サンプルはこちら maxim integrated.

[クリックすると拡大した画像が開きます]

富士電機は、SiC MOSFETの実用化に乗り出す。最初の適用先は、同社が2014年8月に量産する、入力電圧DC1000V、出力1000kWのメガソーラー向けパワーコンディショナー（パワコン）である（発表資料）。同社は既にSiCダイオードを製品化しており、同ダイオードと同社のSiC MOSFETを搭載したパワーモジュールをパワコンの昇圧回路に適用した。これにより、従来機種に比べて変換効率の向上と小型化を実現した。変換効率は98.8%で、「業界最高水準」（富士電機）である。同社従来品の効率は98.5%だった。

パワコンの大きさは、2980 mm×1900 mm×900 mmで、従来品に比べて20%小さいという。この小型化によって、分割せずに運搬できるようになった。従来は、1000kW級のパワコンが大きくて分割して運ぶのが一般的で、「1000kW級で一体型の屋内型は業界初」（富士電機）だという。

パワコンに搭載するSiCパワー素子は、富士電機の松本工場で生産する（関連記事）。利用するのは口径150mm（6インチ）のSiC基板である。

1200V All SiC-MOSFETモジュール搭載
太陽光PCS(富士電機㈱　２０１４年５月発表）

変換効率の向上と装置小型化
- 効率98.8%
- 体積▲20%

ただし、SiC-MOSFET 製品化加速にはもう少し時間がかかりそう

SiCパワー半導体の製品応用例

ホンダ新型FCVにSiCが搭載（2016年3月）

SiC、量産車に初搭載――ホンダの新型FCVが採用

EE Times Japan 3月11日(金)15時4分配信

（出典：EE Tiems Japan）

SiC-MOSFETの課題

1．信頼性が不十分。電気的な負荷をかけると、特性が変動しやすい

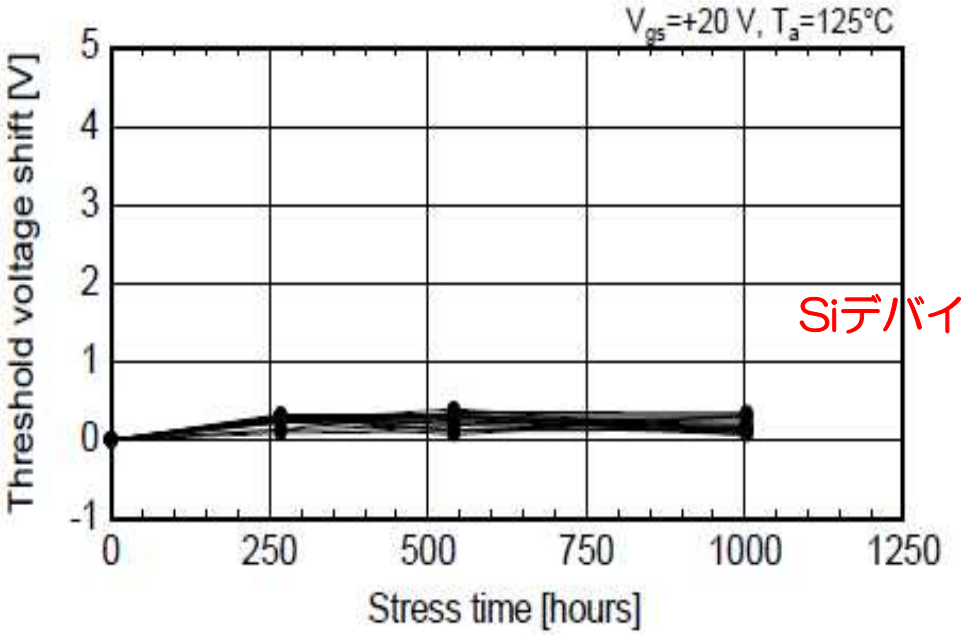
2．オン抵抗はSi-IGBTに比べ小さくて良好。しかしまだ材料特性を十分出し切るほど小さくない（不十分）

ゲート電圧印加後のしきい値変動

SiC-MOSFETはゲート印加後のしきい値変動に課題あり

Vg=+20V、125℃、1000時間経過後
のVth変動結果

(M.Furuhashi et al, ISPSD2013, pp.55)



Siデバイスではほぼ0V(変動なし)

ゲート酸化膜の形成方法

- 酸化膜成膜
  - 熱酸化
    - ドライ酸化
      - O_2酸化
      - 酸窒化
    - ウエット酸化（Si-MOSFETで使われている）

      特徴：膜が緻密、カーボンクラスターがSiO_2中に入る

      （$SiC + O_2 \rightarrow SiO_2 + C$）
  - SiO_2堆積膜
    - LTO, HTO
    - PECVD

    特徴：カーボンクラスターの発生がない、膜密度が小さい

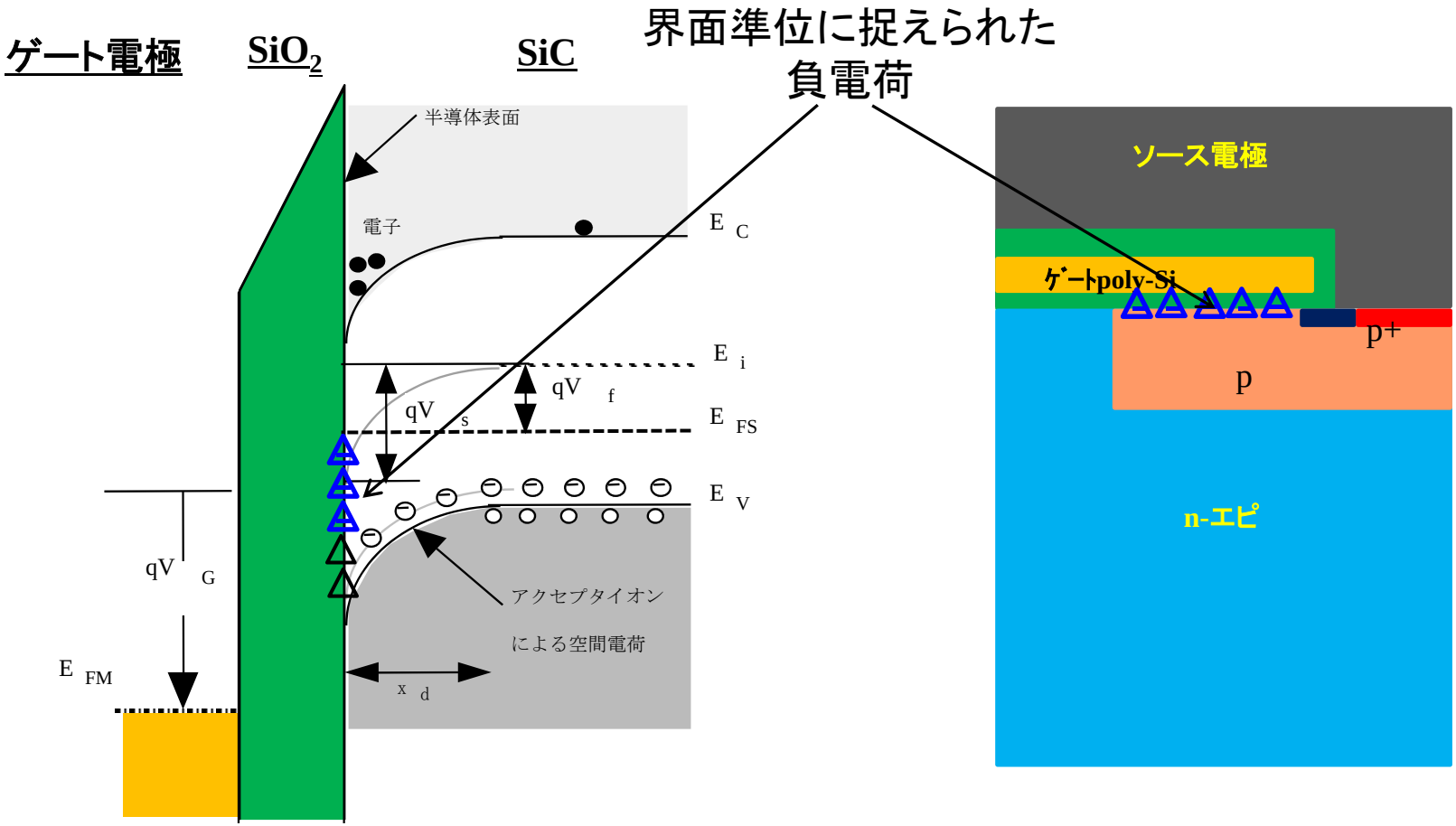
POA（Post Oxidation Anneal）：H_2、NH_3など
SiC/SiO_2界面欠陥をH終端したり、窒化することで移動度が向上する

⇩

Si-MOSFETで使われている熱酸化法を基に、SiC-MOSFETへの最適化が検討されている

界面準位のMOSFET特性への影響

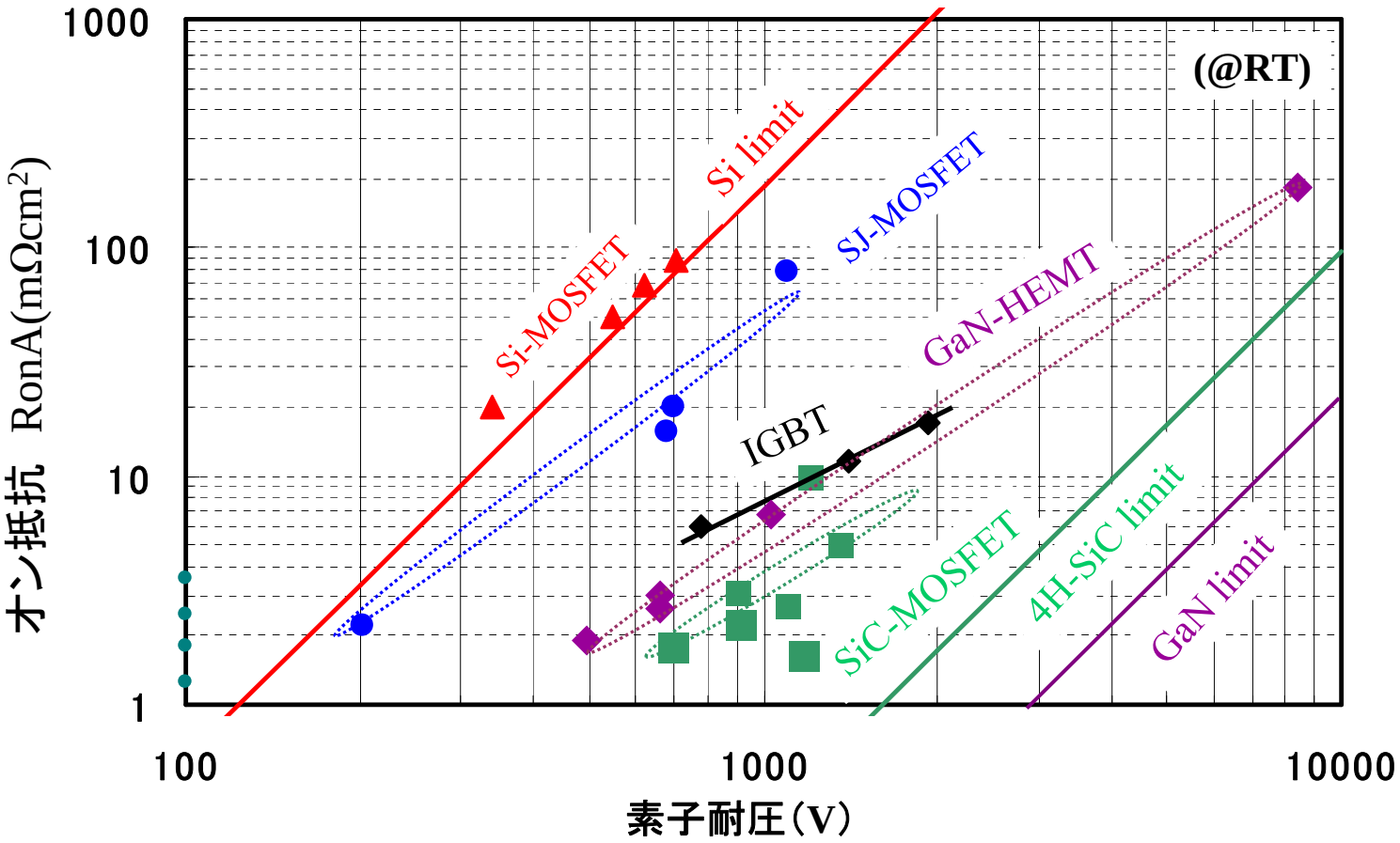
界面準位が電子を捕獲する
⇒電子が散乱⇒①移動度の低下②Vthの増大



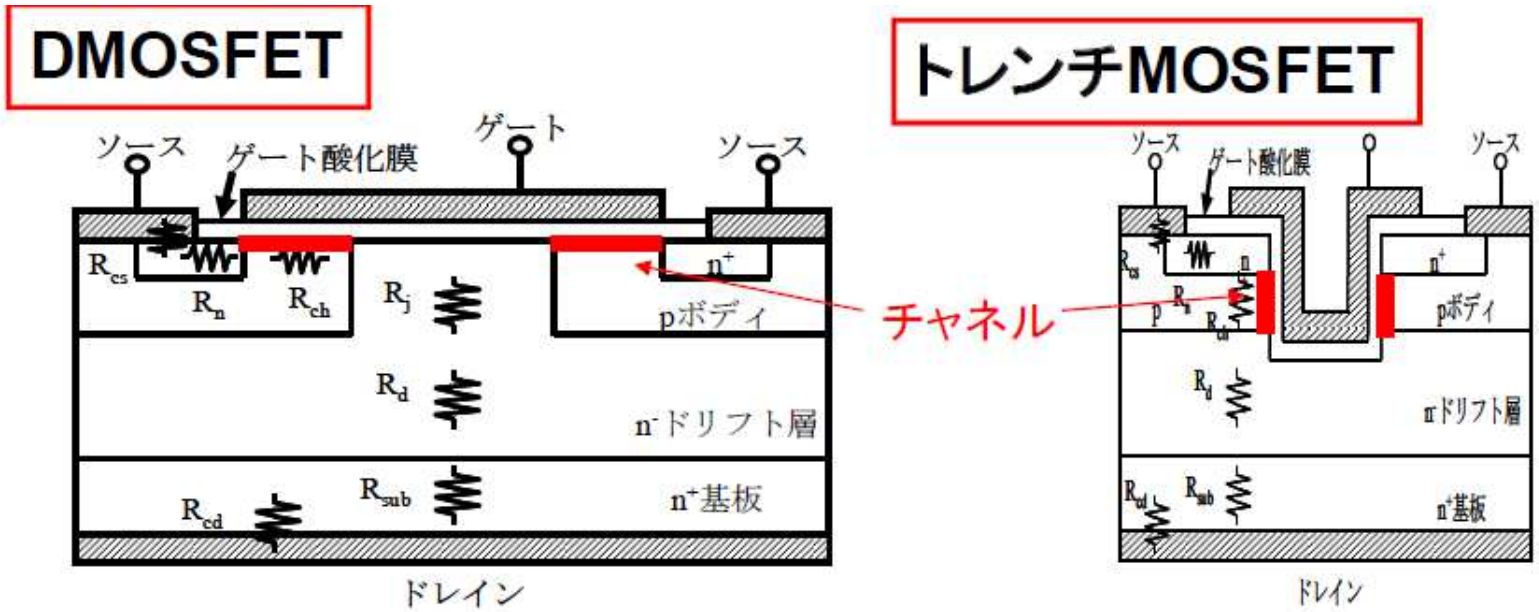
(a)エネルギーバンド図　　(b)MOSFET断面図

各種パワーデバイスの耐圧とRonA

SiC-MOSFETのRonAと実測値と理論線との「かい離」大
⇒低RonA化への余地大きい
⇒① μ_{mos}の向上と②トレンチMOSFET開発



トレンチMOSFETの利点



利点

- 高チャネル密度（総チャネル幅大）
- Jfet抵抗成分がない

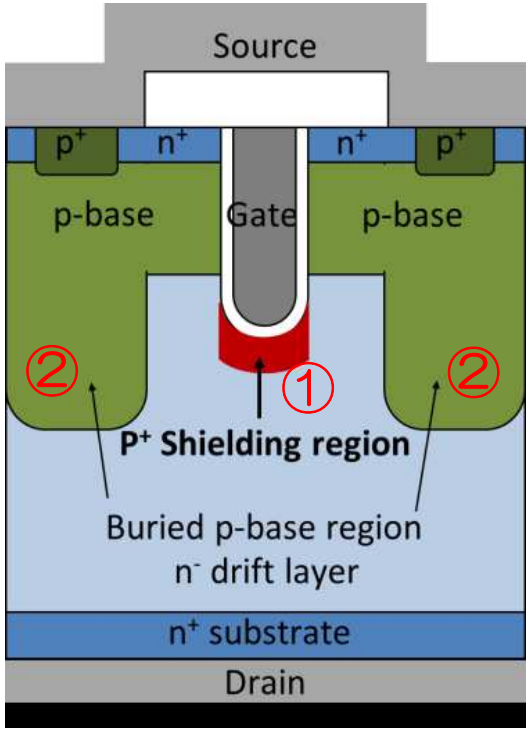
⇒低オン抵抗化に有利

SiCとSiのトレンチMOSFET構造の違い

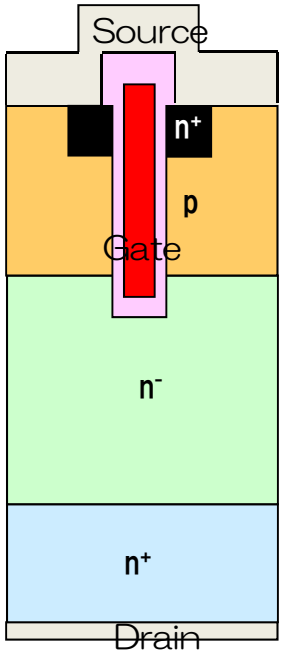
①トレンチゲート底部にP+層をイオン注入で形成
②深いp-base層形成

T.Kojima et al.（FUPET, SSDM2015）

SiC-MOSFET



Si-MOSFET



SiCの場合、ゲート酸化膜の電界強度緩和には特別の考慮が必要

第3章

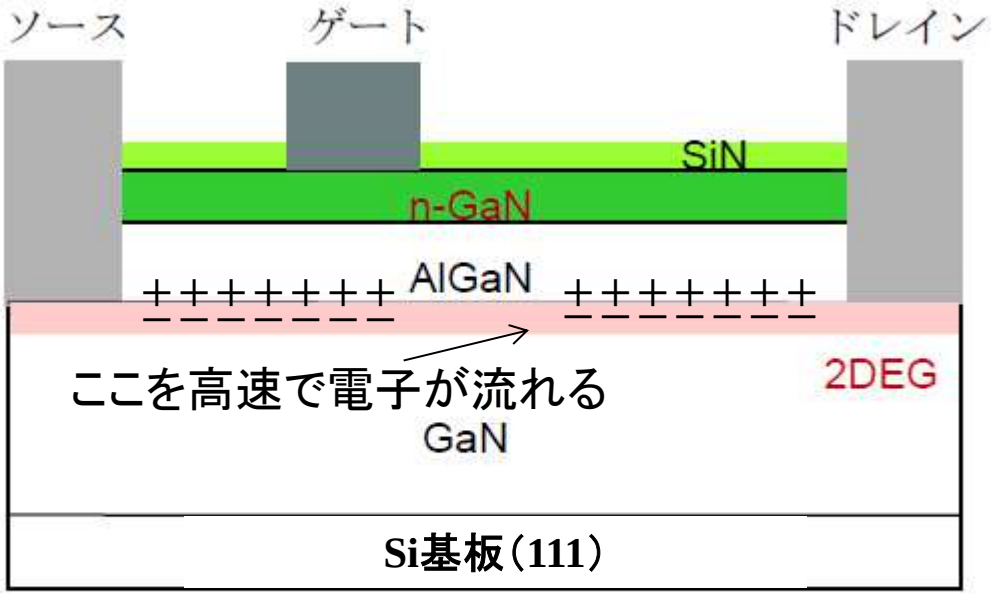
GaNパワーデバイスの現状と課題

何故GaNパワーデバイスなのか？

1. Siパワーデバイス特性限界説
2. SiC　結晶品質改善限界説
3. 新適用市場からの要求（Siでは物理的に困難な市場）
   - ①高温動作
   - ②耐厳環境動作
   - ③小型軽量化
   - ④高性能高効率化
4. 未開拓材料への期待
   - ①新材料への期待
   - ②これまでの開発実績（青色発光での）

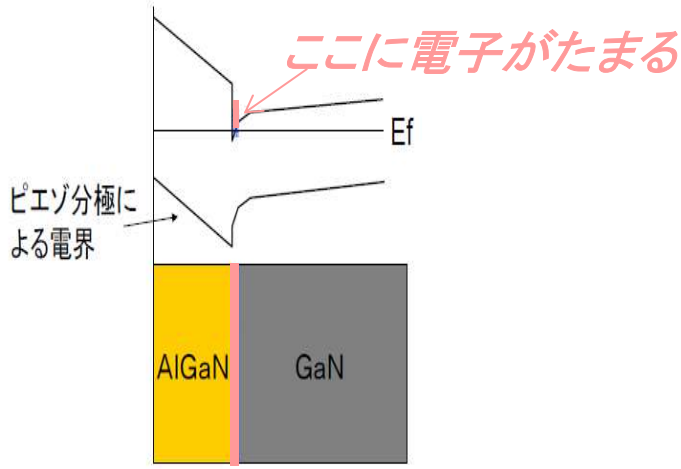
GaN-HEMTデバイスの特徴

HEMT:高電子移動度トランジスタHigh Electron Mobility Transistorの略



窒化ガリウムHEMTの断面構造

- AlGaNとGaNで良好なヘテロ接合：高い移動度
- ピエゾ効果で多量の電子が発生



バンド図

この特長を活かしてスイッチを作る
⇒パワーデバイス

GaNデバイス搭載太陽光PCS発売（安川電機）

世界初！GaN(窒化ガリウム)パワー半導体モジュール搭載の
太陽光発電用パワーコンディショナ「Enewell-SOL V1シリーズ4.5kW」を販売開始
－クラス世界最小サイズを実現、より快適な住環境へ貢献します－

株式会社安川電機(代表取締役会長兼社長 津田 純嗣)は、世界で初めてGaN(窒化ガリウム)パワー半導体モジュールを搭載し、このクラスでは世界最小を実現した住宅用屋内設置型パワーコンディショナ(200V 単相4.5kW)の販売を開始いたします。

Enewell-SOL V1 シリーズ 4.5kW

2014.12.11発表

主な特長

（1）世界最小のコンパクトサイズ
取付面積は従来モデルの約1/2を実現

（2）発電量の最大化
最大変換効率98%

（3）高い静粛性
可聴領域を超える高周波スイッチング

販売計画

（1）販売開始　：2015年1月
（2）販売計画　：34,000台／年

㈱安川電機HPより

Transphorm社の発表（IEDM2014）

600 V JEDEC-Qualified Highly Reliable GaN HEMTs on Si Substrates

Toshihide Kikkawa[1], Tsutomu Hosoda[1], Kenji Imanishi[1], Ken Shono[1], Kazuo Itabashi[1], Tsutomu Ogino[1], Yasumori Miyazaki[1], Akitoshi Mochizuki[1], Kenji Kiuchi[1], Masahito Kanamura[1], Masamichi Kamiyama[1], Shiniichi Akiyama[1], Susumu Kawasaki[1], Takeshi Maeda[1], Yoshimori Asai[1], YiFeng Wu[2], Kurt Smith[2], John Gritters[2], Peter Smith[2], Saurabh Chowdhury[2], Dixie Dunn[2], Martin Aguilera[2], Brian Swenson[2], Ron Birkhahn[2], Lee McCarthy[2], Likun Shen[2], Jim McKay[2], Heber Clement[2], Jim Honea[2], Sung Yea[2], Douglas Thor[2], Rakesh Lal[2], Umesh Mishra[2], and Primit Parikh[2]

[1]Transphorm Japan Inc., 3 Kogyodanchi, Monden-machi, Aizu-Wakamatsu, 965-8502, Japan
[2]Transphorm Inc., 75 Castilian Drive, Goleta, CA, 93117, U.S.A

（2014.12.15発表）

デバイス構造

GaN on Si HEMT+Si-MOS Cascode

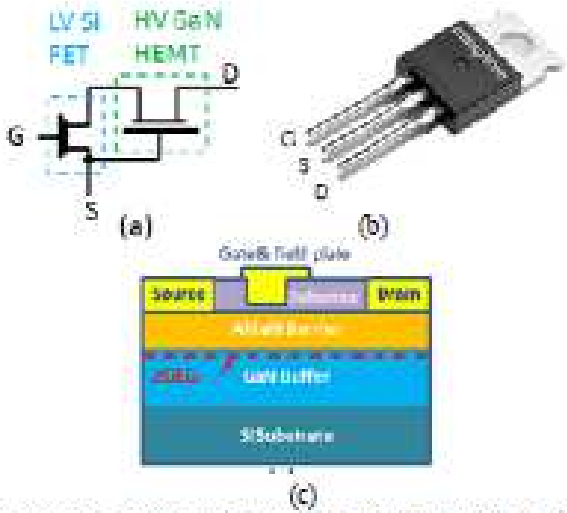


Fig. 2 (a) Cascode configuration using a 600V normally-on GaN HEMT and a low voltage Si-MOSFET. (b) TO-220 package consisting of cascode configuration inside. (c) 600 V normally-on GaN HEMT cross sectional view.

Wafer

Φ6GaN on Si HEMT（CMOS　Compatible process）

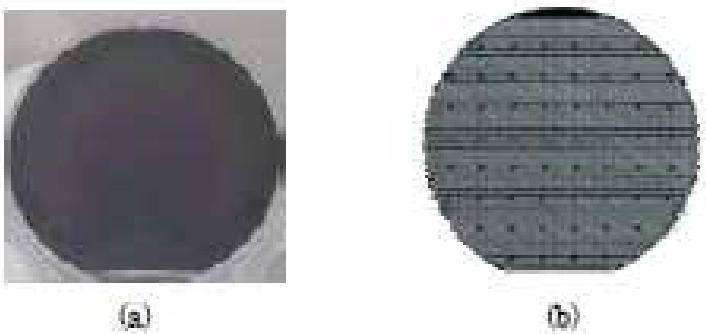


Fig. 3(a) 6-inch GaN on Si epitaxial wafer. (b) HEMT wafer which was processed at the Au-free 6 inch Si-CMOS compatible process line.

GaN on Siパワーデバイスの主な課題

1. 大口径Siウェハ (>Φ6)活用によるコストダウン

2. 電気特性

   1) Normally-off
   2) Current collapse

GaN on Si HEMT on Φ6 Si sub.

Panasonic will start to deliver 600V GaN on Si HEMT samples in April, 2013

ニュース

▸ニュース一覧へ

パナソニック、耐圧600VのGaNパワー・トランジスタをサンプル出荷開始

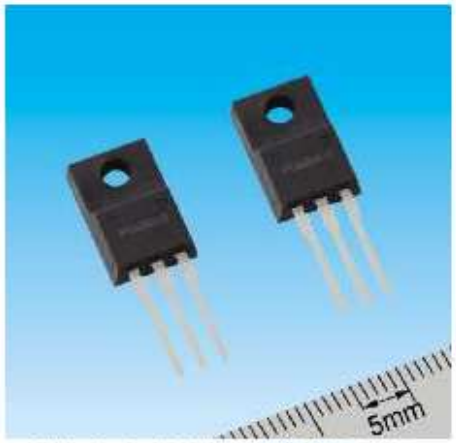
（Ref: Nikkei Tech-on HP, 2013.3.19）

根津 禎＝日経エレクトロニクス　　2013/03/19 20:23

ツイート 5　ブックマーク　　印刷

マキシム・ジャパン株式会社 無償サンプルはこちら　maxim integrated.

パナソニックは、耐圧600VのGaNパワー・トランジスタを開発した。2013年3月からサンプル出荷する。Si基板上に製造する、いわゆる「GaN on Si（ガン オン シリコン）」の素子である。Si基板の口径は6インチ（150mm）。シャープも同年4月に耐圧600VのGaNパワー・トランジスタのサンプル出荷を開始しており、同トランジスタの開発競争が加速している（関連記事）。



[クリックすると拡大した画像が開きます]

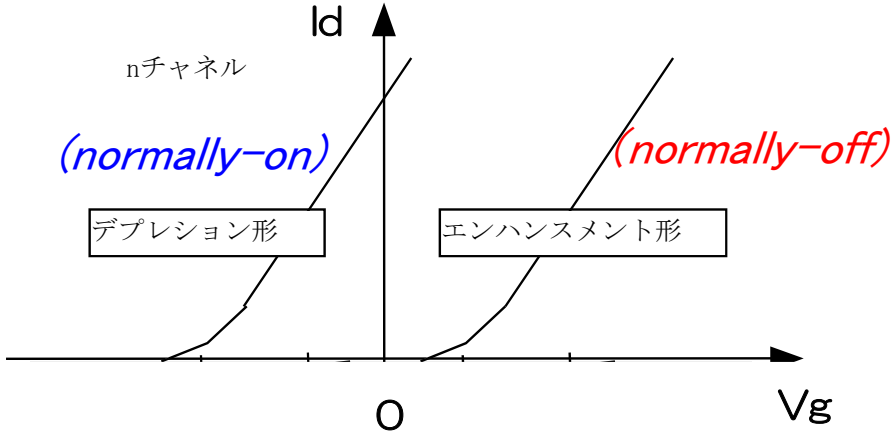
ノーマリーオフ特性

パワーデバイスではノーマリーオフ型が主流

不純物の注入によってチャネルを最初から形成しておくこともできる．この場合，ゲート電圧が0でもドレイン電圧が流れる．

<u>エンハンスメント形</u>
ゲート電圧の印加によりドレイン電流が流れ始める *(normally-off)*

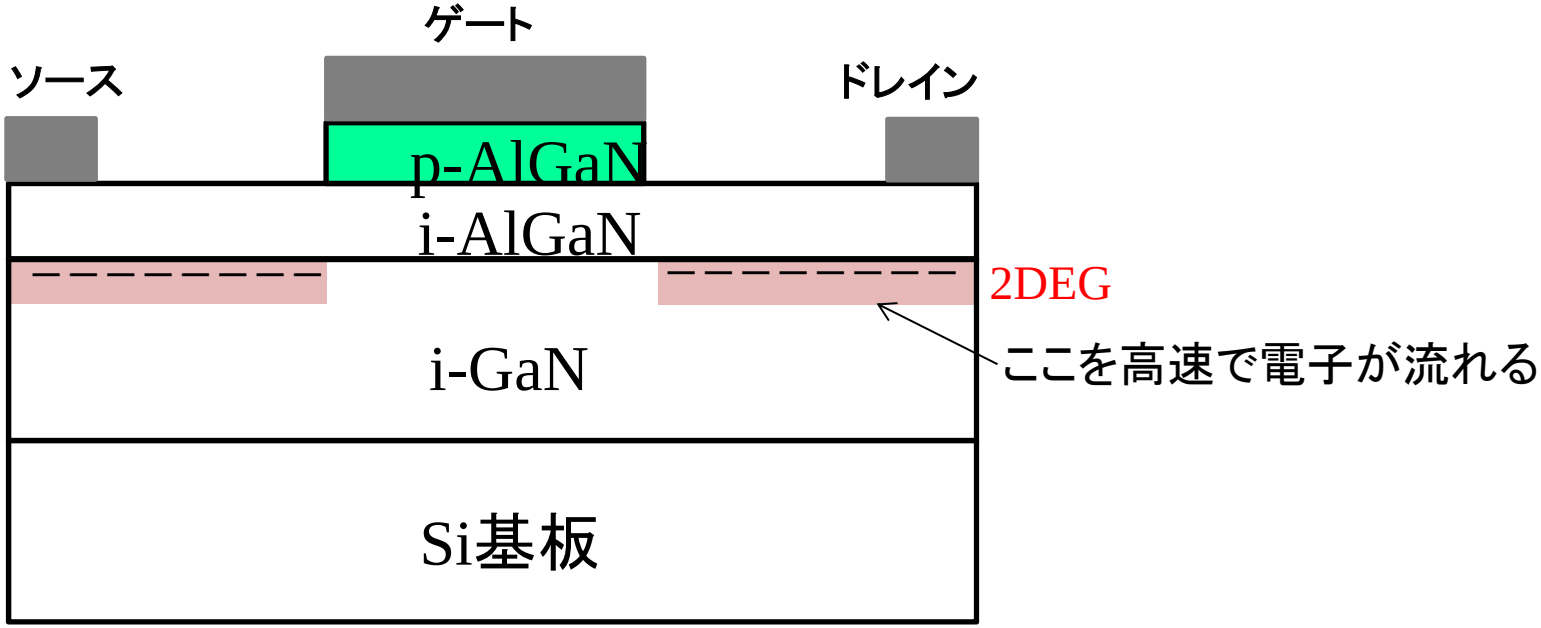
<u>デプレッション形</u>
ゲート電圧が0Vでもドレイン電流が流れる *(normally-on)*



Vg-Id特性

GaN-HEMTのノーマリーオフ化

・Si基板上GaN　GIT構造によるノーマリーオフ化（パナソニックテクニカルジャーナル2012年4月）



1）Vg=0Vでｹﾞｰﾄ下の電子を枯渇⇒ノーマリーオフ
2）Vg>0Vで、正孔が注入し伝導度変調⇒低オン抵抗

600V素子でRonA=2.6mΩcm^2(Vg=4V), Vth=1.0V
（高耐圧かつ低オン抵抗でノーマリ-オフ化を達成）

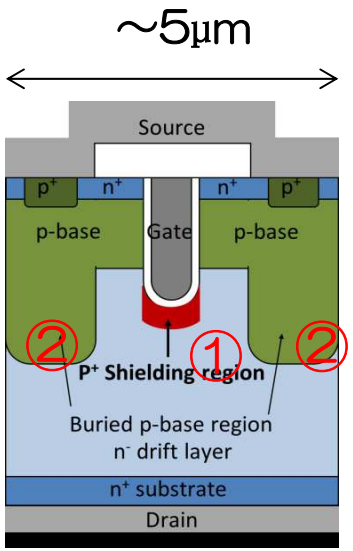
第4章

パワーデバイス評価技術の重要性

パワーデバイス評価は「ダイナミックレンジが広い」

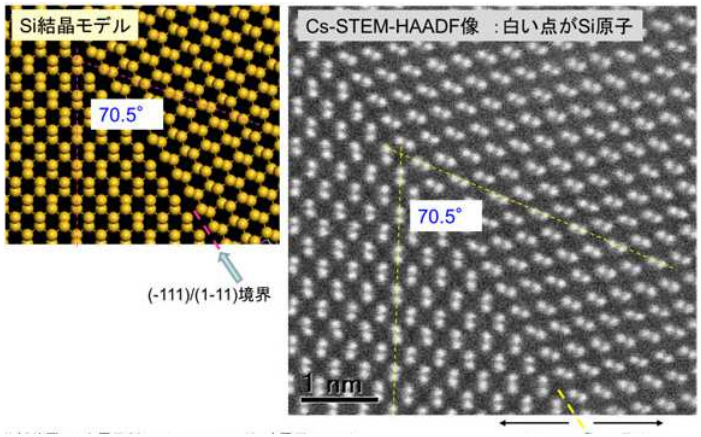
1．寸法

SiC-MOSFET設計



SiC-MOSFET

酸化膜界面解析（~5nm）



図はSiの例

パワーデバイス評価は「ダイナミックレンジが広い」

2．電圧・電流

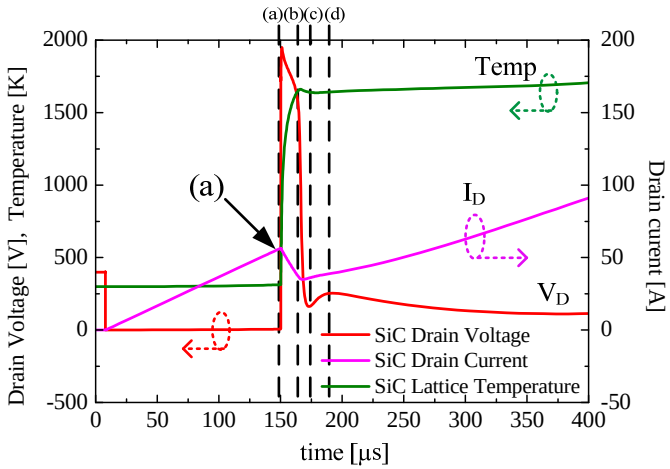
例１）素子耐圧　3300V、ゲートしきい値　3V

しきい値変動＜±0.1V

もれ電流　100nA、定格電流　1000A

3．温度

例１）Tj=-40℃～200℃



（出典：生井、他、電気学会全国大会　2016年3月）

図．SiC-MOSFET破壊時の電流・電圧、素子内温度計算結果

例２）素子内温度が1600K以上になると予想される

まとめ

1．パワーデバイスの現状
電流導通時、スイッチング時の損失を低減することが
パワエレ装置の省エネ実現のキーポイント

2. SiCパワーデバイス開発状況と今後を概説
1)MOSFETは本格量産にもう一歩
2) しきい値の変動、ボディーダイオードVf劣化に課題
3)低オン抵抗化へのアプローチ進む
i) トレンチMOSFETの開発が加速

3. GaNパワーデバイス開発状況と今後を概説
1)GaN-HEMTもパワエレ製品に搭載されてきた
2)1チップでの Normally-off化実現がポイント

まとめ

４. パワーデバイス評価はダイナミックレンジが広い

➡広いダイナミックレンジに対応できる正確な評価技術が
今後ますます重要となってくる

ご清聴ありがとうございました。