

SiCパワーデバイスの現状と、 今後デバイスを使用していく上での課題

～電動車インバータ搭載への障壁～

箸尾 勝 Alberto O. Adan

株式会社エルテック

〒664-0845 兵庫県伊丹市東有岡4丁目42-8

TEL(072) 787-7385

講演内容

1. エルテックご紹介
2. 電動車の動向
3. SiC-MOSFETについて
4. SiC-MOSFETのコスト
5. SiC-MOSFETの短絡耐量

1. エルテックご紹介

- ・リバーエンジニアリングとは
- ・解析サービスの流れ
- ・解析結果の活用について

半導体および 電子機器分野の 解析で 国内屈指の技術力を誇る 株式会社エルテック

製品調達から分解、搭載基板、搭載部品の回路、構造、
材料、コスト含めた他社比較、考察をワンストップで。

社名	株式会社エルテック
代表者	代表取締役会長 藤井 壮志
創立	昭和63年（1988年）6月15日
資本金	5,500万円
所在地	伊丹本社 兵庫県伊丹市東有岡 4-42-8 高知支社 高知県高知市菜園場町 1-21 四国総合ビル 松山支社 愛媛県松山市千舟町526 共栄興産千舟町 第3ビル4階東
業務内容	技術情報の提供サービス ◆ 製品入手、特許文献調査（非特許文献調査も対応） ◆ 製品解析（IC回路、基板回路、パワーデバイス構造・プロセス・熱、液晶・有機ELパネル、動作）
主要装置	前処理装置（ドライエッチング、ドラフト、研磨、スパッタ、レーザー除膜除去） 解析・評価装置（TEM、SEM、FIB、CP,EDX分析、X線、光学顕微鏡、マイクロスコープ）

本社および国内・海外拠点



サービスのご紹介

- ・対象製品をお預かりしてのカスタム解析、注目されている製品のトレンド、技術動向を追いかけて解析レポートとして販売も行っています。

自動車メーカー
ティア1
半導体メーカー
材料メーカー

調査対象製品

新車、新製品情報
自動車、関連製品の技術情報、動向
半導体技術動向、マーケット

対象製品の入手
製品/システムの評価解析

- ・製品分解
- ・搭載部品調査
- ・基板の除膜
- ・回路抽出&解析
- ・製造コスト試算

- ・インバータ、コンバータ
充電器、電池など
- ・搭載基板

- ・モジュール、パッケージ
- ・搭載半導体
(IC, パワーデバイスなど)
- ・受動部品

- ・電気特性評価
- ・構造/材料分析
(SEM, TEM, SCM, SR, SIMS
etc.)
- ・プロセスフロー推定
- ・IC回路解析

解析報告書、レポート

車載製品の解析が増えだした2014以降、我々は70台以上の、xEV搭載のインバータ、充電器、コンバータ、電池の解析を行っており、搭載デバイス、パワーデバイス、モジュールのベンチマーク解析を行ってきました。今回は、各社SiCデバイスの解析結果から、動向、課題についてまとめご紹介させていただきます。

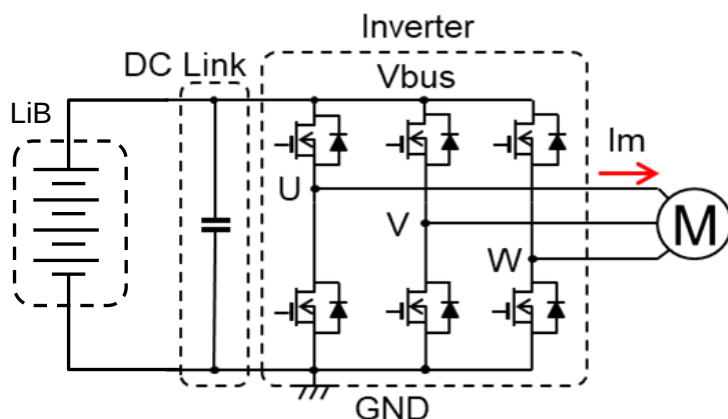
2. 電動車の課題

- ・電気自動車の課題と今後の方向性
- ・EVシステム高電圧化のメリット
- ・現行車両での動向

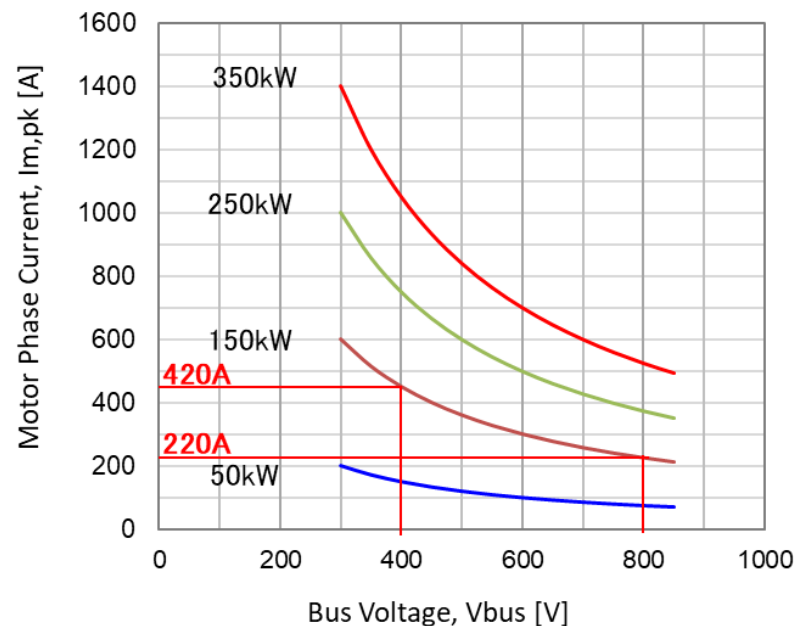
BEVシステムの方向性(高電圧化)

BEVへの要望	解決策	技術課題
電池切れへの不安 航続距離の拡大	電池容量UP	電池搭載スペースの拡大 →搭載ユニット(モーター・インバータ)の小型化
	急速充電への対応	短時間充電の為の高電圧化
	モーターの高出力化	駆動電圧の高電圧化による熱損失低減

インバータ駆動電圧を上げる。⇒発熱(損失)が小さく、同サイズのモーターで、出力を大きくできる。



インバータの基本構成



インバータ駆動電圧、ピーク電流と

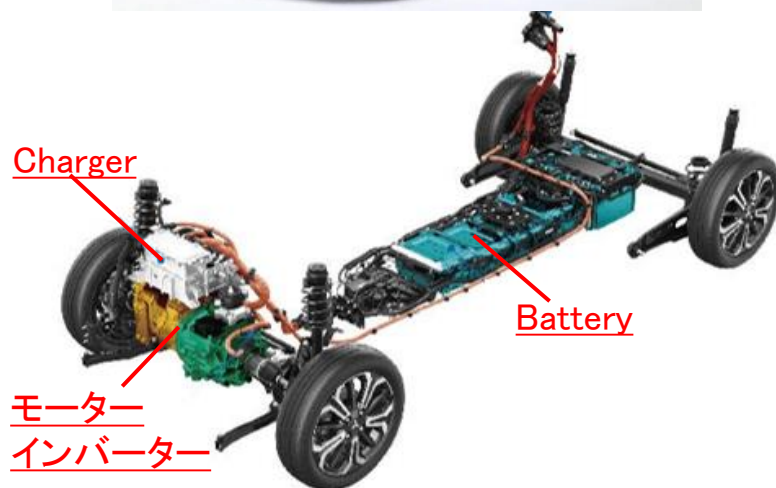
モーター出力の関係

最新の車載インバーター駆動電圧
インバーター駆動電圧が高い車両の出現。

2022 三菱自動車 EKクロス

※電池容量: 20kWh

(モーター出力: 47kW **インバーター駆動電圧: 403V**)

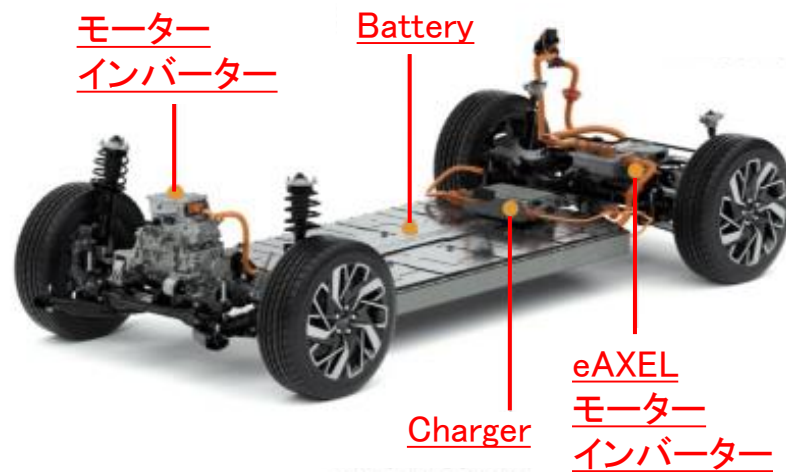


2021 現代自動車 IONIQ5

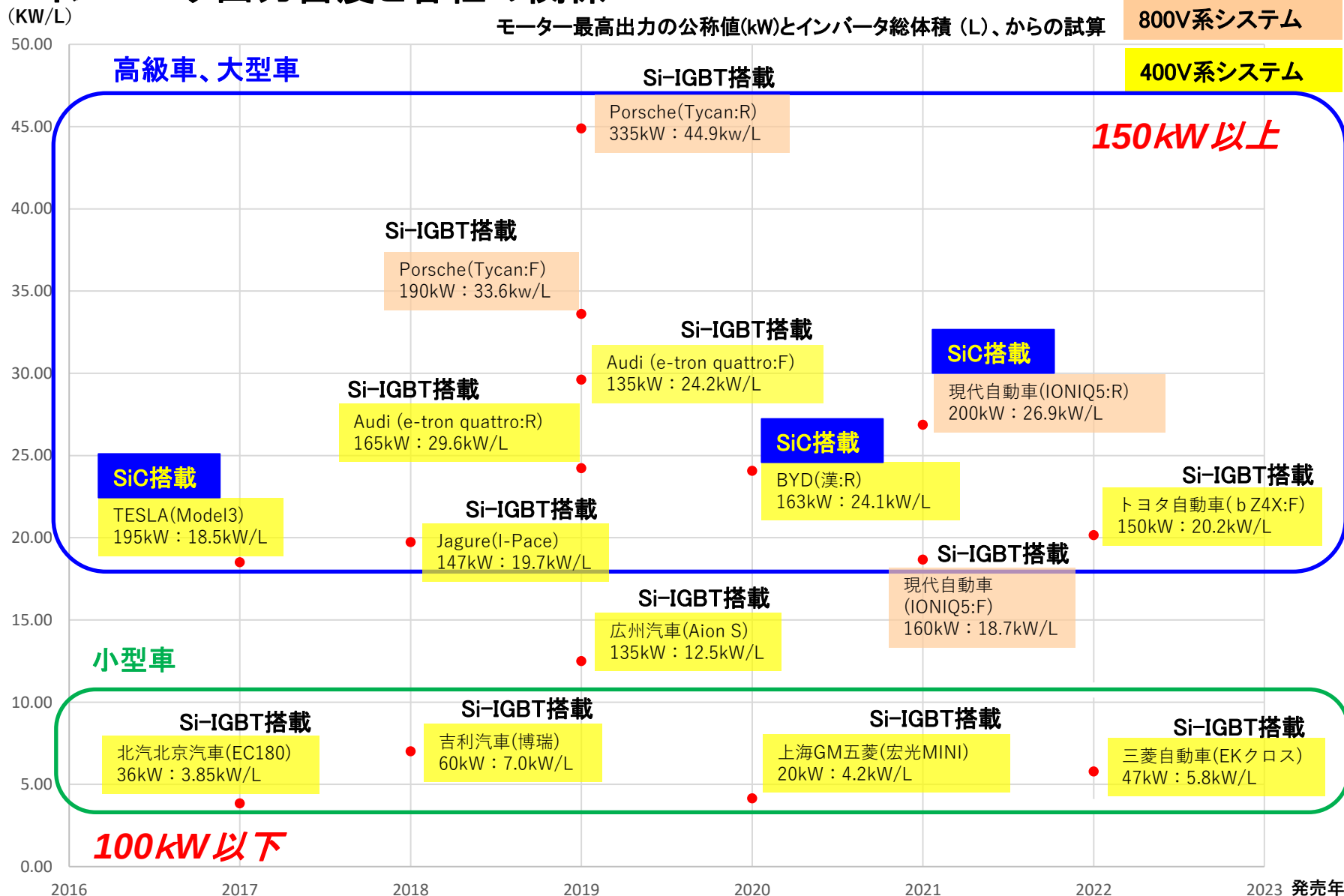
SiC搭載

※電池容量: 72.6kWh

(モーター出力: 160kW **インバーター駆動電圧: 702V**)



インバータ出力密度と各社の関係



・高級車/大型車(150kW)と小型車(100kW)に2分され、システム電圧の高い車両、SiC搭載車両も見られる。

2023/3/08 車載パワーエレクトロニクスの現状と課題

電動車の動向と方向性

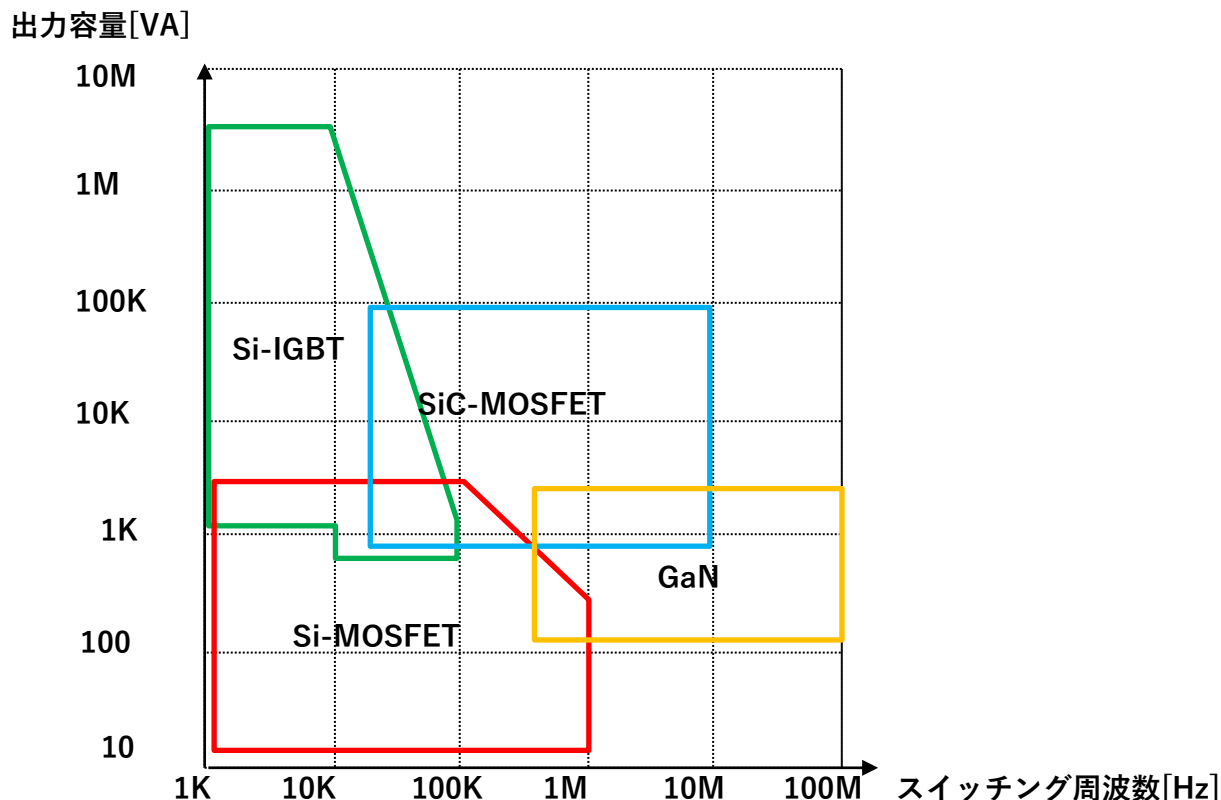
- ・走行距離の延長、充電時間短縮の要望に伴い、電池の大容量化、車両システム電圧の高圧化による熱損失低減、搭載ユニットの小型化が進む。
- ・インバータに使用されるパワーデバイスについては、高級車/大型車両から、既存のSi-IGBT→SiC-MOSFETへの置き換えが進む。

3. SiC-MOSFETについて

- ・SiC-MOSFETの適用領域
- ・特性の優位性
- ・デバイスコスト

パワーデバイスの適用領域

- ・高耐圧で低オン抵抗であり大容量に向くSi-IGBT
- ・高速スイッチングというMOSFETそれぞれの長を併せ持つのがSiC-MOS。
- ・小型・軽量、高効率化に期待



従来の Si トランジスタと比較した SiC-MOSFET の予想される応用分野の概略図

SiCデバイスの適用領域

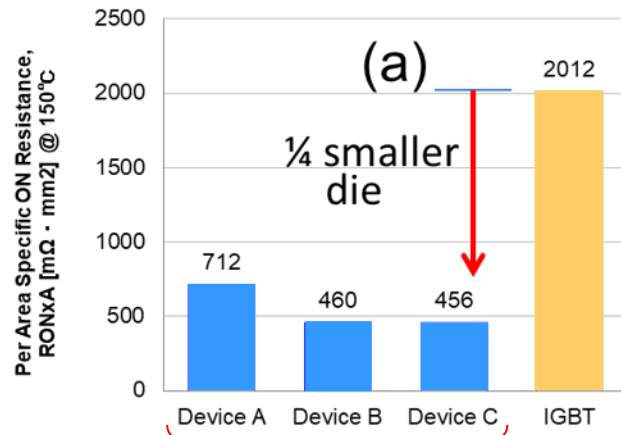
- ・SiC デバイスは、600V を超える範囲の車載アプリケーションで足場を拡大する。

SiC-MOSFET の適用領域 と 動作電圧

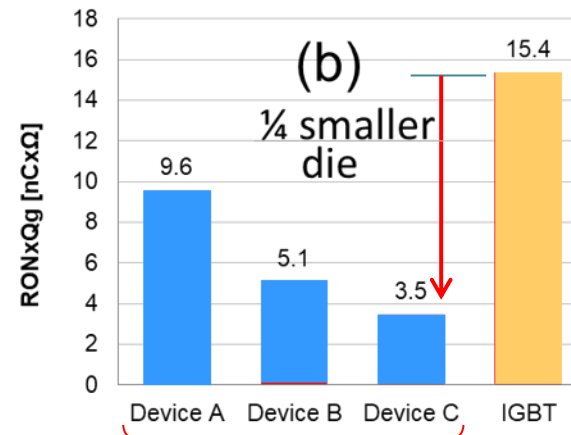
システム	動作電圧	トランジスタ定格電圧 Vdss
モーターインバータ	400V～800V	650V～1200V
OBC	200V～350V	500V～800V
昇圧コンバータ		500V～1200V
補助電源 (Flyback)	～800V	1200V～1700V

SiC-MOSFETs (実製品3社)、Si-IGBTの性能比較

- ・On抵抗が低い⇒Si-IGBTの1/4程度
- ・スイッチングエネルギーが低い⇒Si-IGBTの1/10～1/20
- ・周波数が高い⇒ Si-IGBTの20倍

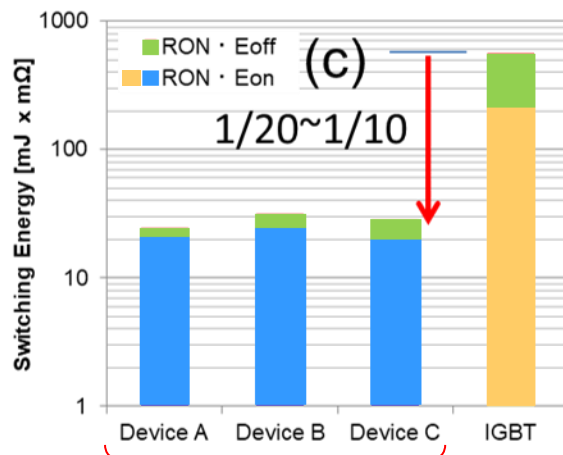


SiC-MOSFET

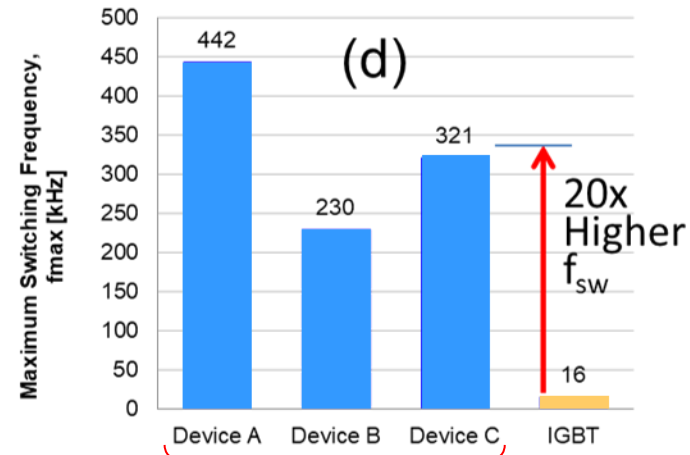


Q_g : ゲート充電に必要な電荷量

SiC-MOSFET



SiC-MOSFET



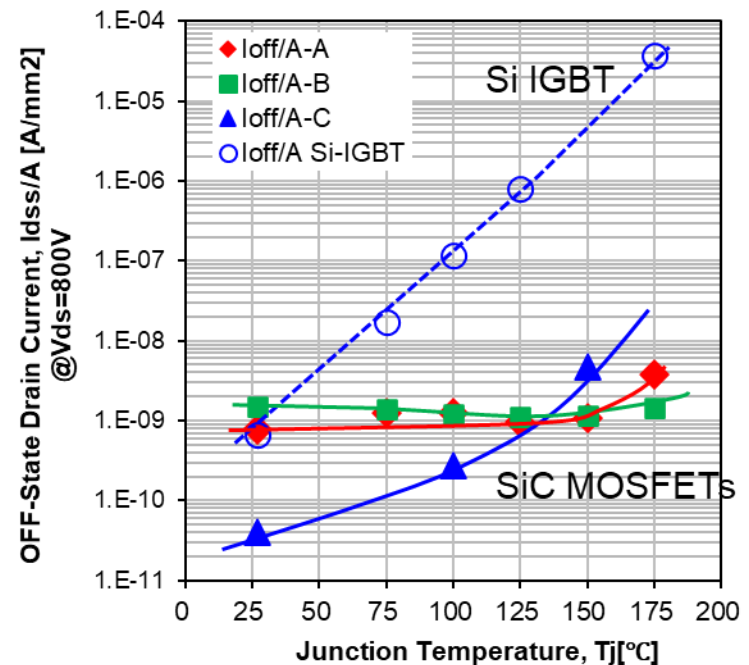
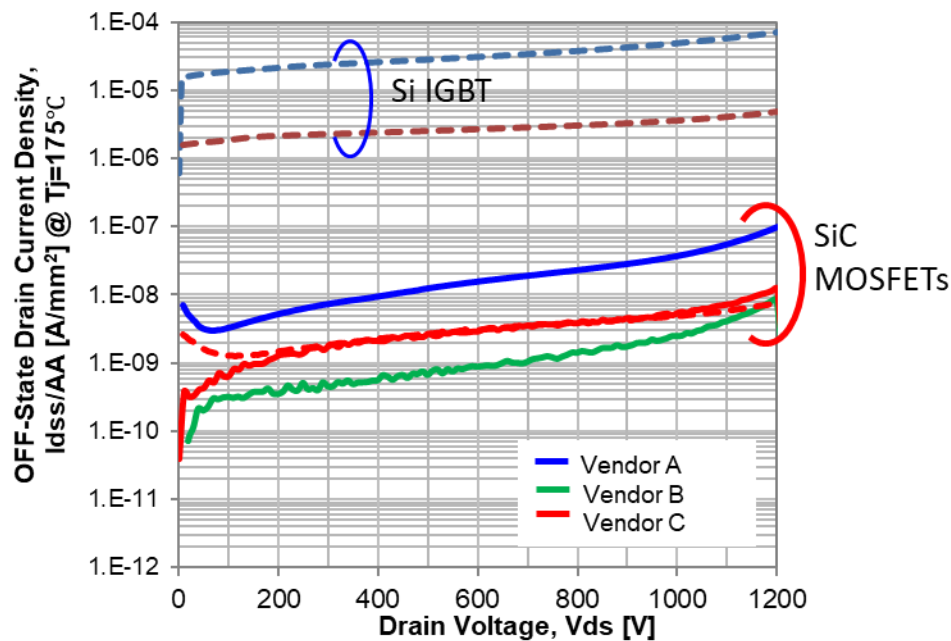
SiC-MOSFET

Si-IGBT vs SiC-MOSFET 性能比較

2023/3/08 車載パワーエレクトロニクスの現状と課題

SiC-MOSFETs（実製品3社）、Si-IGBTのリーク電流の温度依存性

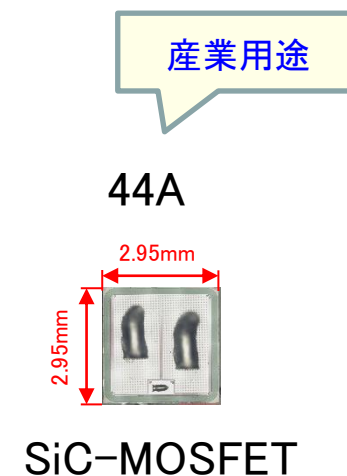
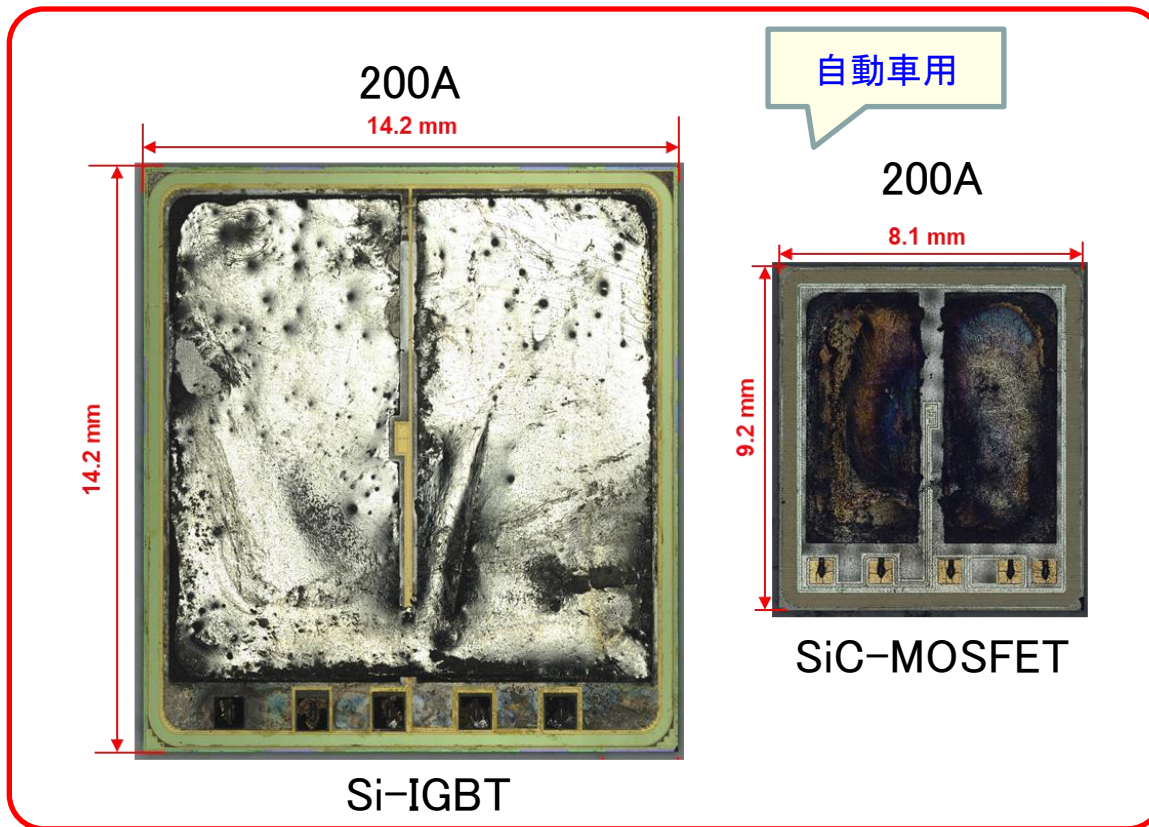
- ・ゲートOFF時のリーク電流がSi-IGBTと比較して2～3桁低い
- ・高温時（～175度）でのリーク電流が低い→200℃以上の高温動作、異常時（高温）時に優位



Si-IGBT vs SiC-MOSFET リーク電流(A)の温度依存性

車載用 Si-IGBTとSiC-MOSFET のサイズ比較

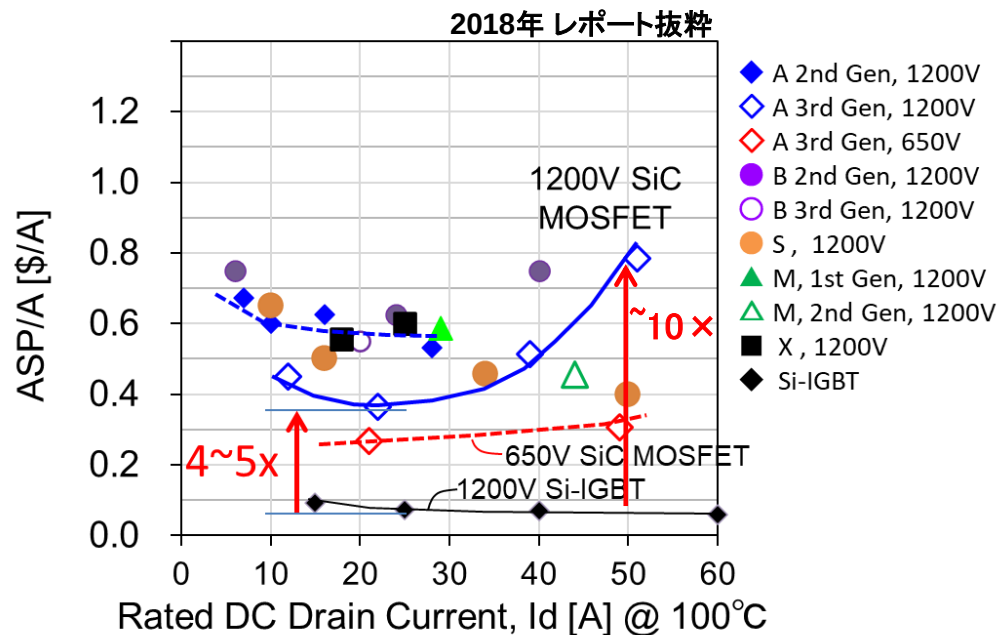
- ・SiCはOn抵抗が低く、同一電流で比較すると、SiC-MOSFETのチップサイズはSi-IGBTの約1/3の面積となる。



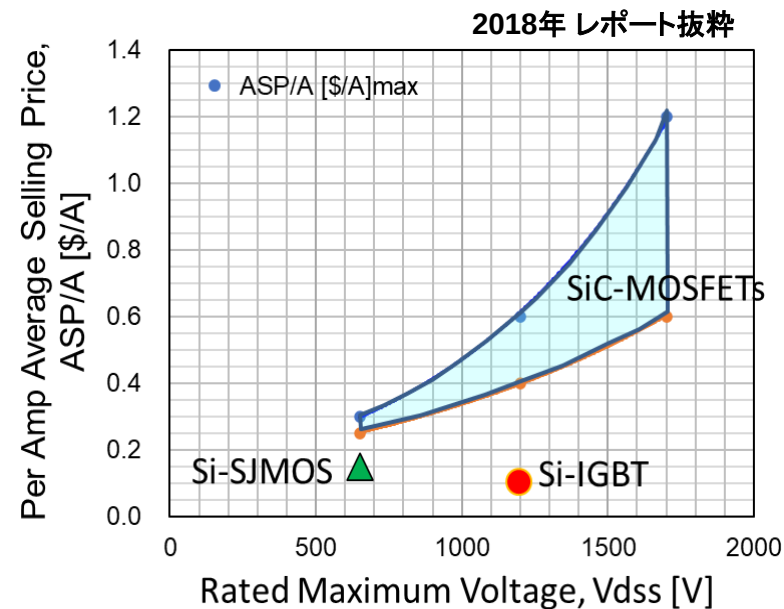
電流(A)単価 (ASP/A) vs ドレイン電流、vs 最大定格電圧 について

・Si-IGBTと比較して、SiC-MOSFETの価格は4～10倍

※電流量の大きい(大面積)のSiC-MOSFETは非常に高額 ⇒ 歩留まりの向上が望まれる。



電流(A)単価 (ASP/A) vs ドレイン電流



電流(A)単価 (ASP/A) vs 最大定格電圧

SiC-MOSFETへの置き換えメリット、デメリット

メリット

- ・SiC-MOSFET On抵抗が低い。高温でのリーク電流が小さい
→熱損失小さく、高温での使用も可能(200°Cでの使用想定)
- ・SiC-MOSFETは同一出力のSi-IGBTの1/3の面積
→実装面積小 ユニットの小型化に有利。

デメリット

- ・SiC-MOSFETの価格は Si-IGBT の 4～10倍
電流量の大きなチップ、耐圧の高いチップは高額となる。

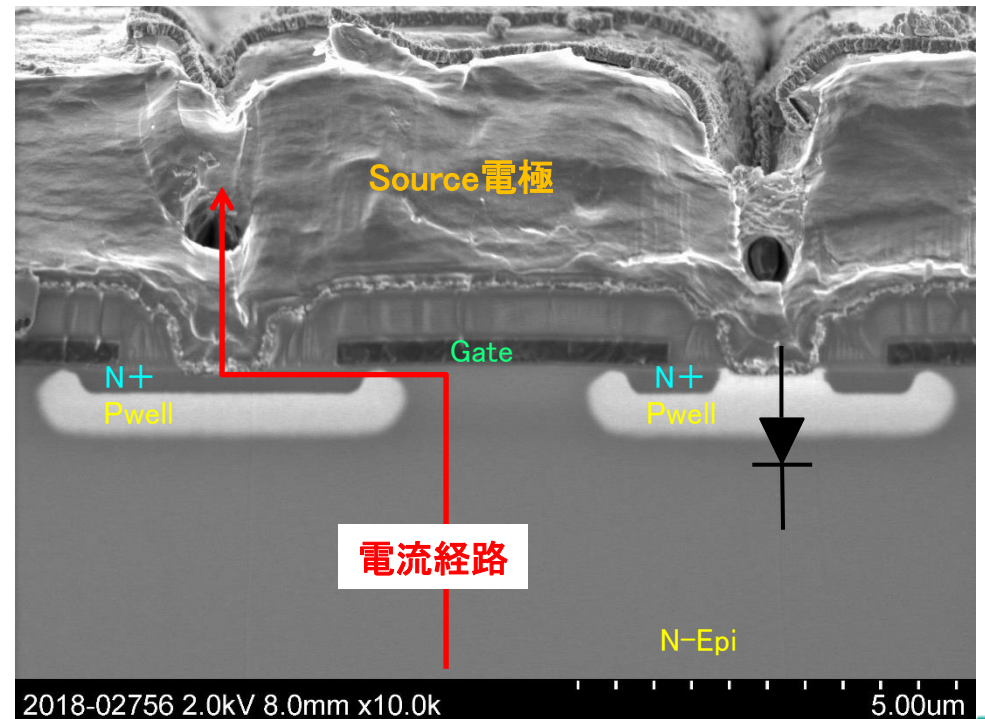
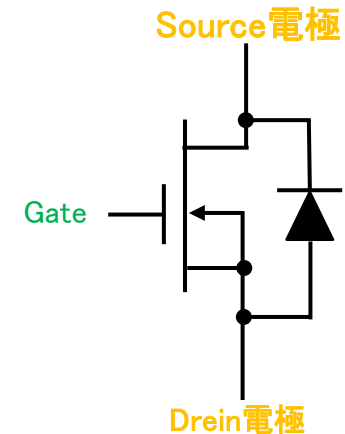
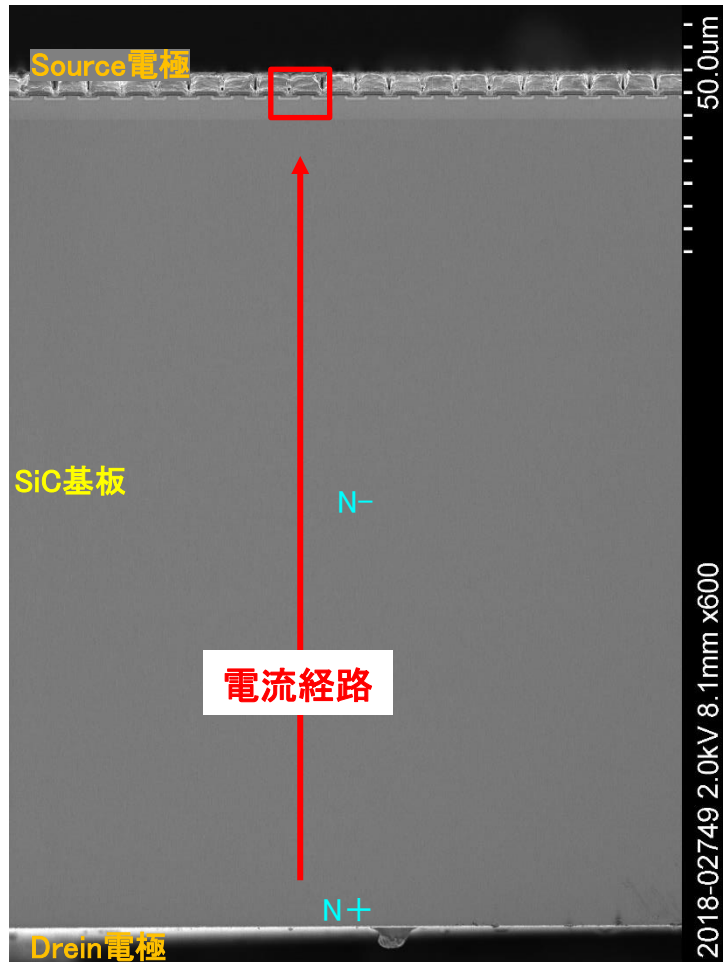
4. SiC-MOSFETのコスト

- ① SiCデバイスの構造と価格の関係
- ② コストダウンへの動き
- ③ 車載インバータ搭載のSiCパワーモジュール

① SiCデバイスの構造と価格の関係 ～車載用 SiC-MOSFETの断面構造～

- ・SiC-MOSFETは縦型構造。
- ・電流はチップの厚み方向に流れる。

TESLA Model3搭載(2017年)

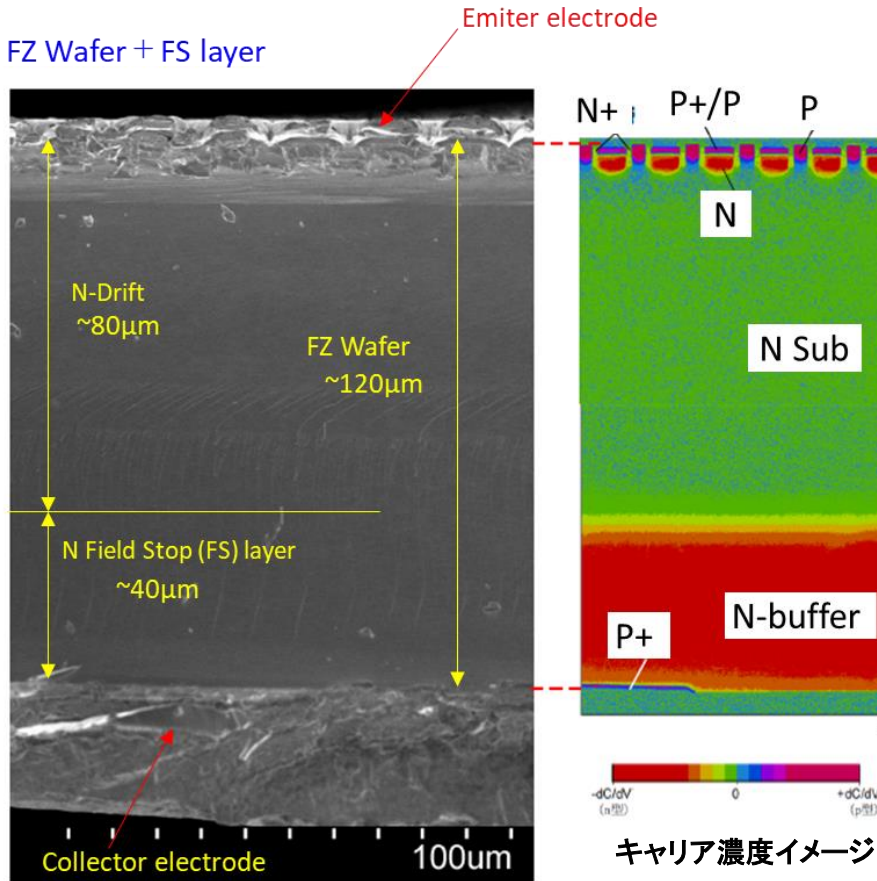


① SiCデバイスの構造と価格の関係 ～ドリフト層の比較～

- ・ほぼ同じブレークダウン電圧を得るために、SiC-MOSFET の「Nドリフト」層の厚さは、Si-IGBT の約 8 分の 1 である。⇒On抵抗が低い
- ・電流量が大きい＝チップサイズが大きいほど高額となる。

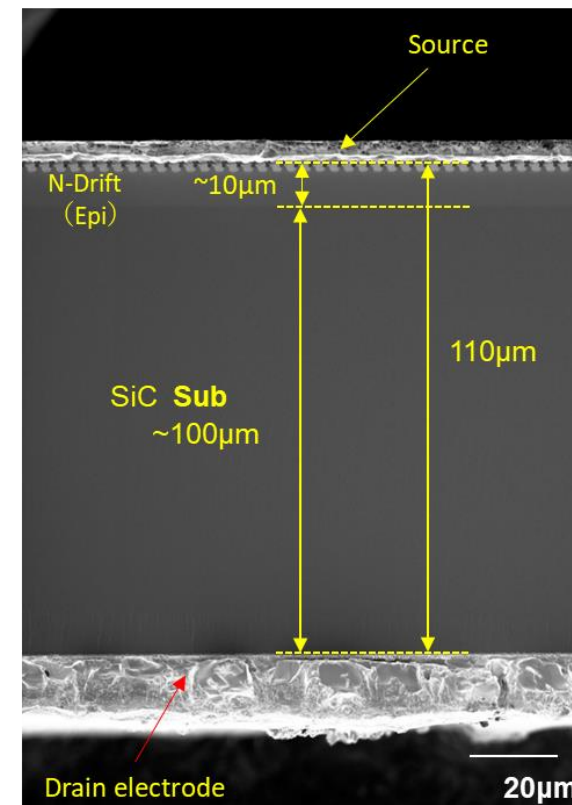
Si IGBT 1250V

FZ Wafer + FS layer



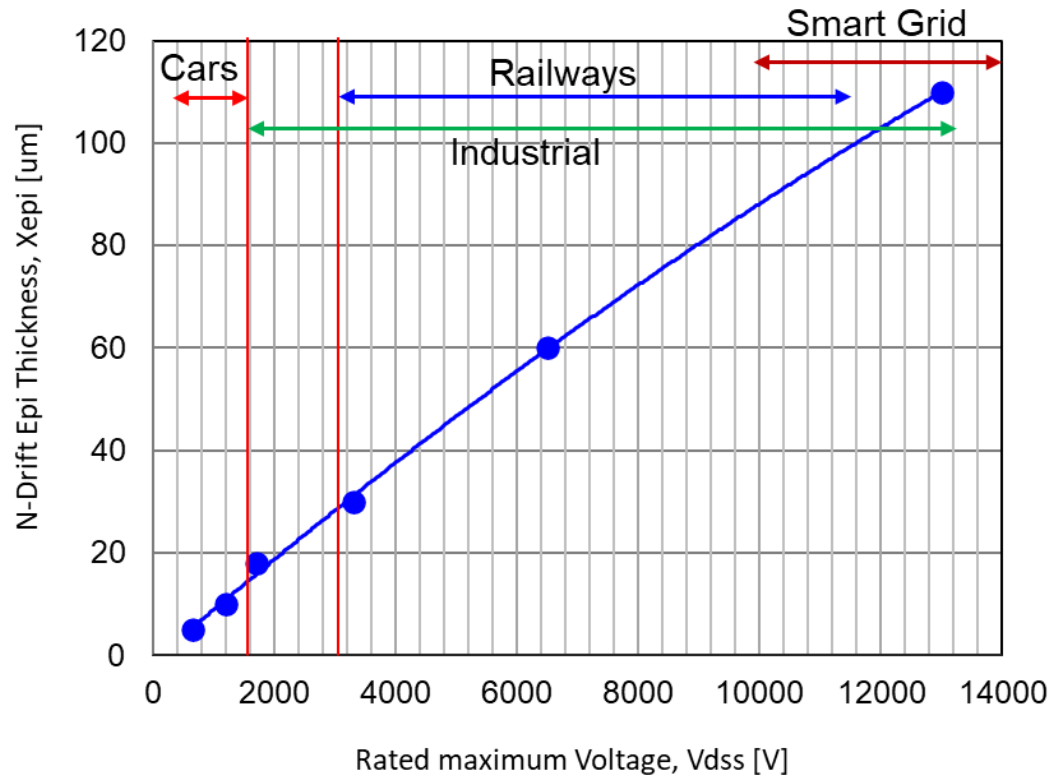
SiC MOSFET 1200V

SiC Wafer



① SiCデバイスの構造と価格の関係 ～高耐圧SiC-MOSFETs: エピ層の厚さ

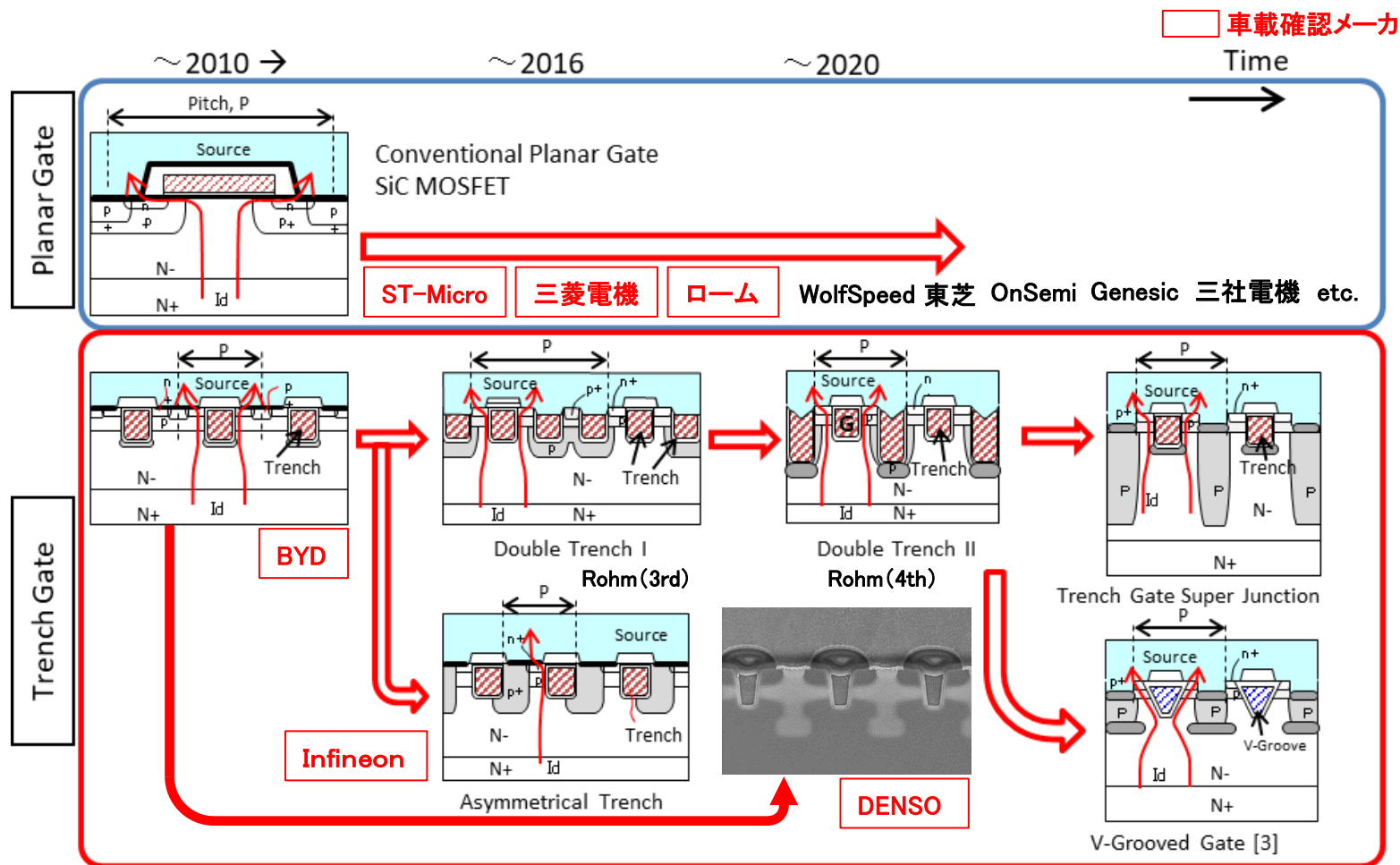
- ・N-Drift層の厚みでデバイスの耐圧が決まる。
- ・耐圧が高いドリフト層が厚いほど、SiCのウェハコストは高くなる。



定格最大ドレイン電圧 V_{dss} とSiC-MOSFETのNドリフト(epi)領域の厚さ

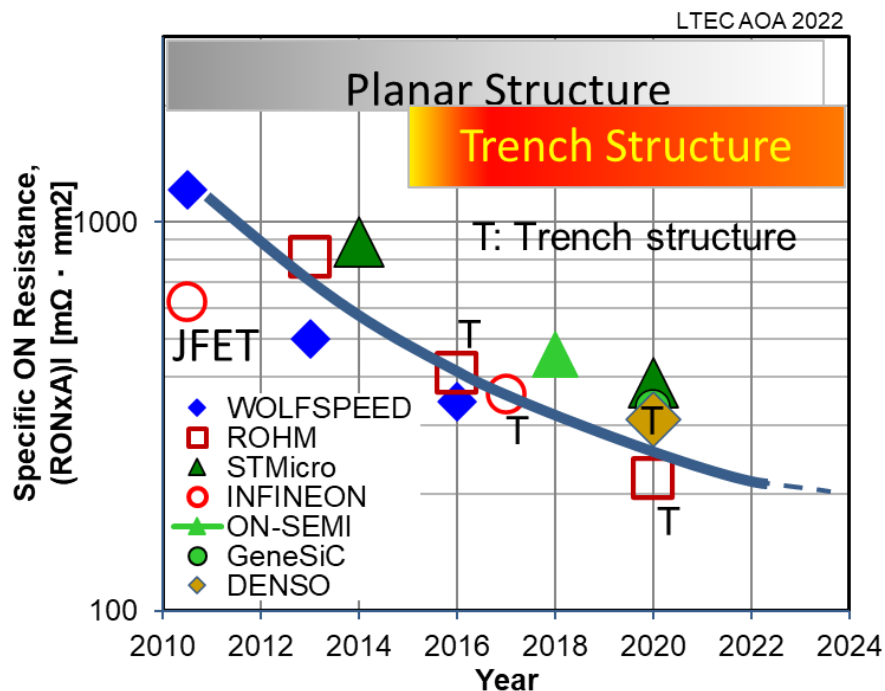
② コストダウンへの動き ～SiC 縦型MOSFET構造の進化(1)～

- セルピッチを小さく、トレンチゲート構造の採用により、 $RONxA$ が減少すると、チップのサイズが小さくなり、コスト/価格が下がることが期待される。

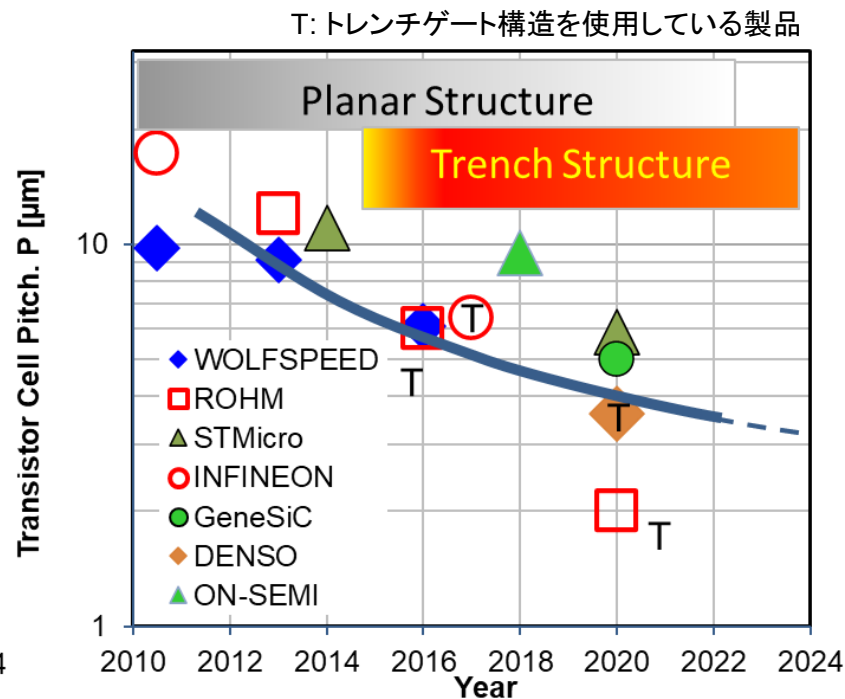


② コストダウンへの動き ～ SiC 縦型MOSFET構造の進化(2)～

- ・RONxAはRONxA $\sim 0.66\sim 0.7 \times$ / 3-4年の傾向。
セルピッチの減少によってトランジスタのセルサイズは小さくなる。⇒コスト削減



1200V SiC-MOSFETのオン抵抗(RONxA)



1200V SiC-MOSFETのセルピッチ(サイズ)の傾向

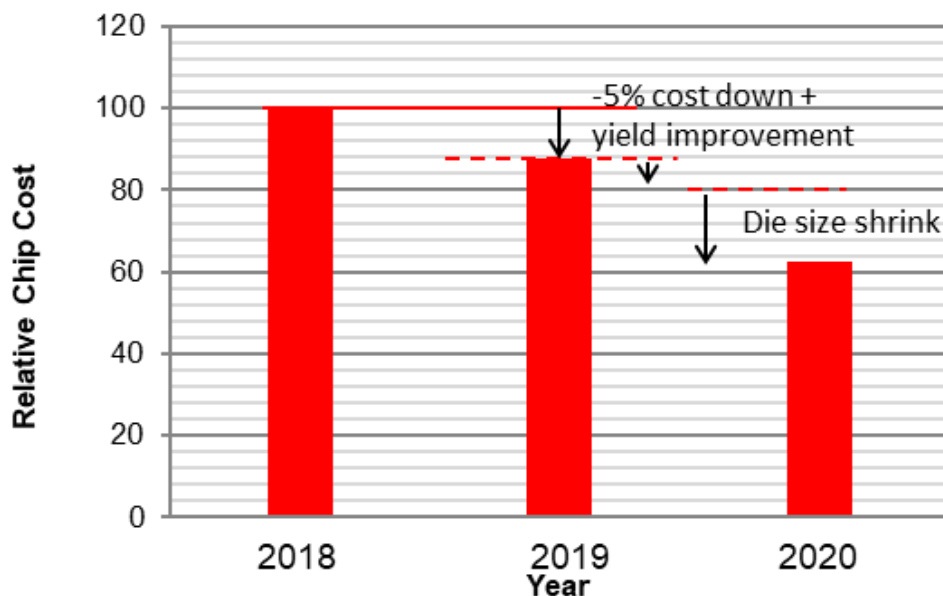
② コストダウンへの動き ～ SiCデバイスメーカー～

- ・Infineon(独) OnSemi(米)、STMicro(瑞)といった海外大手。
 - ・三菱電機やローム、東芝、富士電機、日立、日本企業も多くみられる。
- 新規工場の建設、提携や供給契約などが行われている。

No.	Company	Country	Epi Wafer	Device Chip	Module
1	WOLFSPEED (CREE)	US	✓	✓	✓
2	ローム	JPN	✓ SiCrystal	✓	✓
3	INFINEON	DE	✓Sillectra (2018)	✓	✓
4	STMicro	ITY/FR	✓Norstel (2019)	✓	✓
5	三菱電機	JPN		✓	✓
6	富士電機	JPN		✓	✓
7	日立パワーデバイス	JPN		✓	✓
8	東芝	JPN		✓	✓
9	Onsemi	US	✓GTA (2021)	✓	✓
10	MicroSemi	US		✓	✓
11	GeneSiC →Navitas	US		✓	
12	LITTELFUSE/IXYS	US		✓	
13	United SiC Corp (Qorvo)	US		✓	
14	X-Fab	US		Foundry	
15	デンソー	JPN		✓	✓

② コストダウンへの動き ～Si-MOSFET(1200V)の価格動向～

- ・インバータ搭載のSi-MOSFET(1200V)の価格は、年々低下の方向、価格低下は加速している。
- ・価格低下の要因としては、(i) 大量生産と販売の増加、(ii) 競争、利益率の低下 (iii) 製造歩留まりの向上に起因していると考えられる。

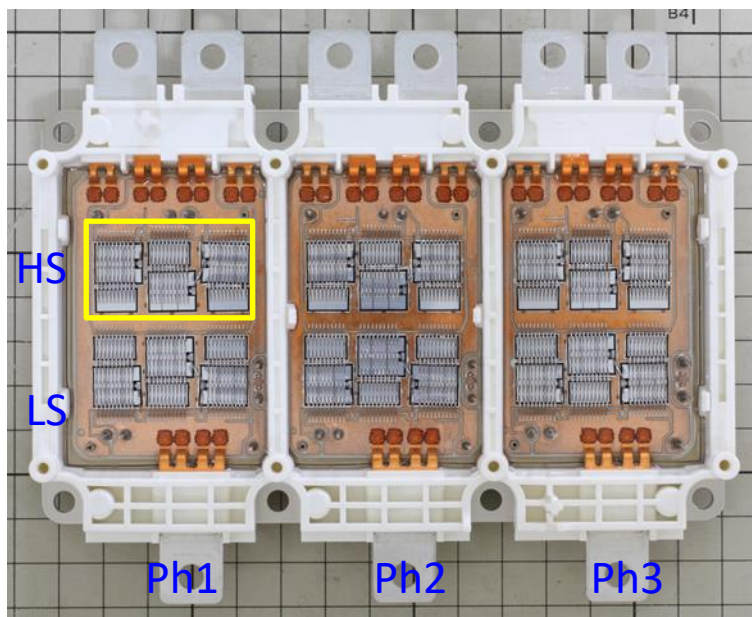


- Manufacturer A 2018: ASP/A = 0.55 \$/A
2022: ASP/A = 0.42 \$/A
- Manufacturer B 2019: ASP/A = 0.42 \$/A
2022: ASP/A = 0.26 \$/A

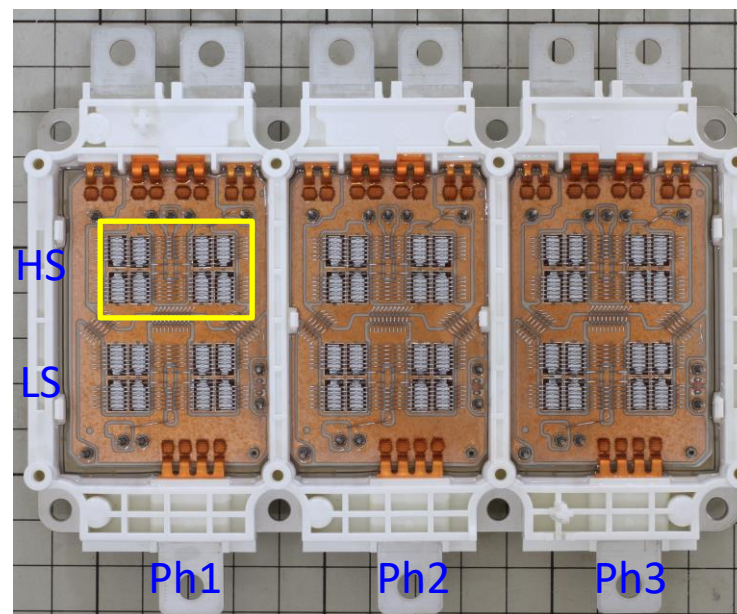
↓ 約半額になっている

③ 車載インバータ搭載のSiCパワーモジュール

・SiC-MOSFET搭載のモジュールには、チップサイズの小さい多くのトランジスタが
使われている。



Si-IGBT 搭載パワーモジュール

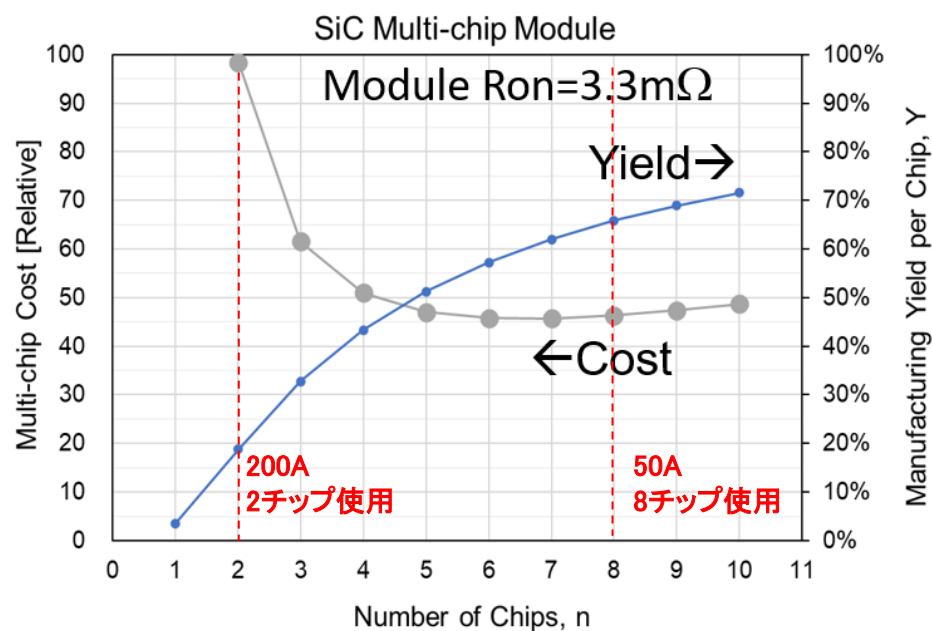
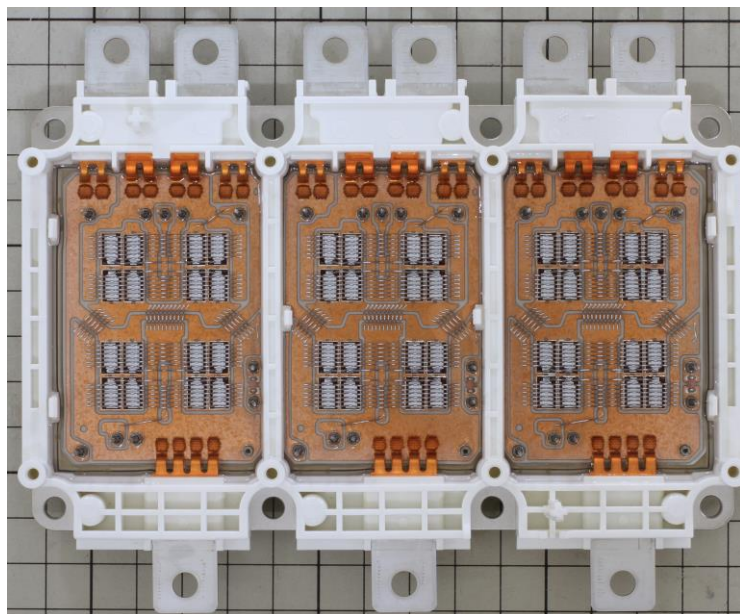


SiC-MOSFET搭載パワーモジュール

三相 400A モーター インバータ パワー モジュール

③ 車載インバータ搭載のSiCパワーモジュール ～搭載チップ数とコスト～

- Si-IGBT、SiC-MOSFET 搭載チップ数と歩留まり、コストの関係
- SiC素子のサイズを小さくすることで歩留まりを上げて、コストを下げている。
結果として搭載チップ数がSi-IGBTと比べて多くなる。
⇒実装面積、温度、特性ばらつきが問題



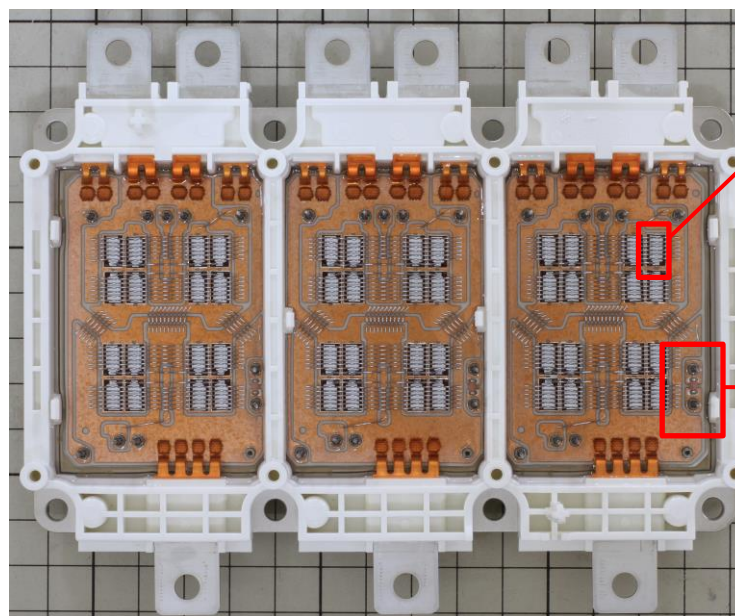
③ 車載インバータ搭載のSiCパワーモジュール ～デバイスの状態把握～

- ・3相パワーモジュールについては搭載チップ数が多く、モジュールの相毎に温度監視（サーミスタ）が配置されている製品が主流。
→各チップでの温度のモニタリングができない。

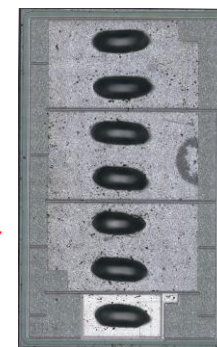


8.1 × 9.1

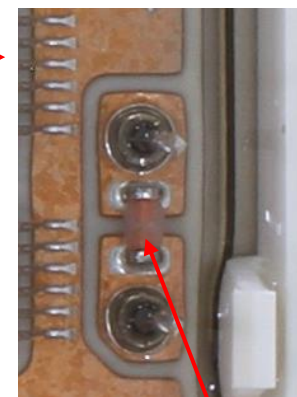
チップ上温度センサ搭載
SiC-MOSFET
※MIRAI FCコンバータ搭載



SiCパワーモジュール内センサ搭載箇所
※IONIQ5搭載



4.1 × 6.7



サーミスタ

コストについての現状と動向

- ・デバイスのシュリンク、新構造の採用での単位面積当たりのOn抵抗の低減
ウェハの供給、チップ生産能力の増強によって、デバイス価格は下がってきている。

が、現状としては下記

- ・SiCモジュールは価格の問題から小さいチップを複数チップ(4~8チップ)搭載。
搭載デバイスの特性ばらつき、実装場所の違いによるチップ間の温度差など課題は多い。実装面積も大きい。
→モジュールサイズとしては、Si-IGBT搭載の製品と比較して、SiC搭載による小型化はまだ進んでいない。
- ・モジュールの温度検出は、ローカルNTCサーミスタを使用した温度検出が支配的。
→搭載されている個々のSiCデバイスでの温度モニタリングができていない。

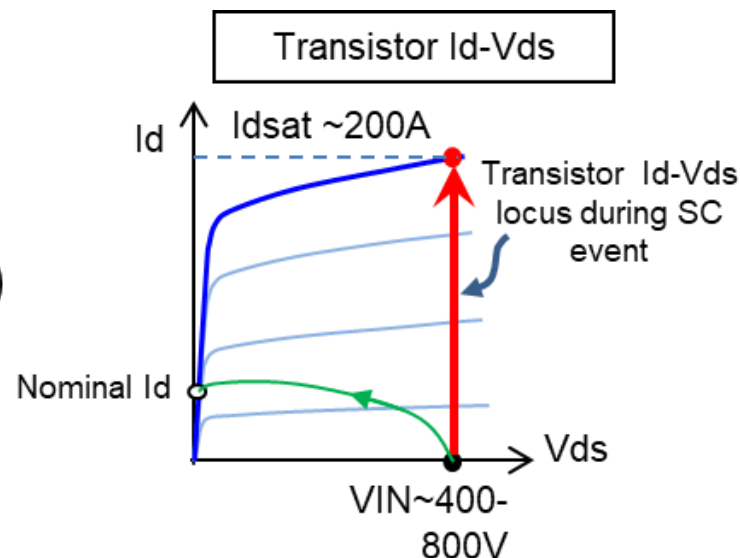
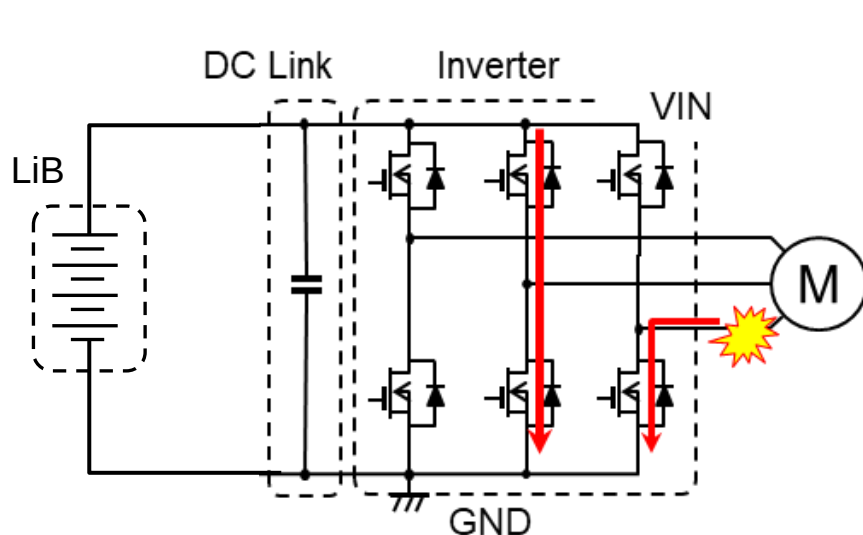
5. SiC-MOSFETの短絡耐量

- ① 電動車インバータ搭載への課題
- ② チップサイズと短絡耐性の関係

① 電動車インバータ搭載への課題

- ・SiC-MOSFETの性能優位性から、電動車インバータへの搭載が始まっているものの、インバータ特有の破壊モードである短絡破壊に対しての信頼性が課題。
- ・SiC-MOSFETの 短絡ベンチマーク データの欠如
→短絡耐性時間 (SCWT, $t_{sc,f}$) や 短絡破壊エネルギー ($E_{sc,f}$) などのデータは開示されていない。
- ・デバイス/回路の動作マージンを評価するには、異常動作時のパワートランジスタの内部温度をシミュレート/推定することが不可欠
※電源等一般用途、 $T_j=150^{\circ}\text{C}$ の場合の Z_{th} データーは開示されているが、短絡イベント(電力パルス10 μs 以下)での熱インピーダンス (Z_{th}) データの欠如。

インバータ短絡現象について



インバータ内回路にて異常が発生した場合

- ・DC リンク コンデンサは、印加されたドレイン電圧 ($V_{IN} \sim 600V$) を維持。

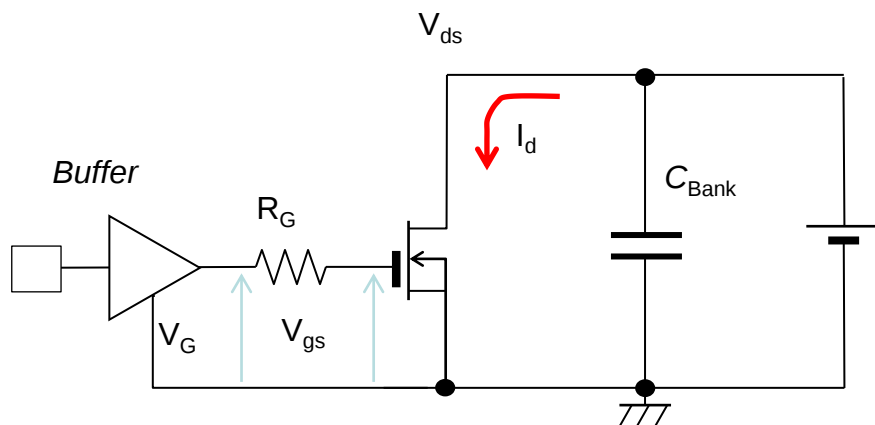
- ・トランジスタ のチャネル温度 T_j は ($\propto \sqrt{time}$) まで上昇。

(a) トランジスタが破壊する前に保護回路によって安全にオフになる。

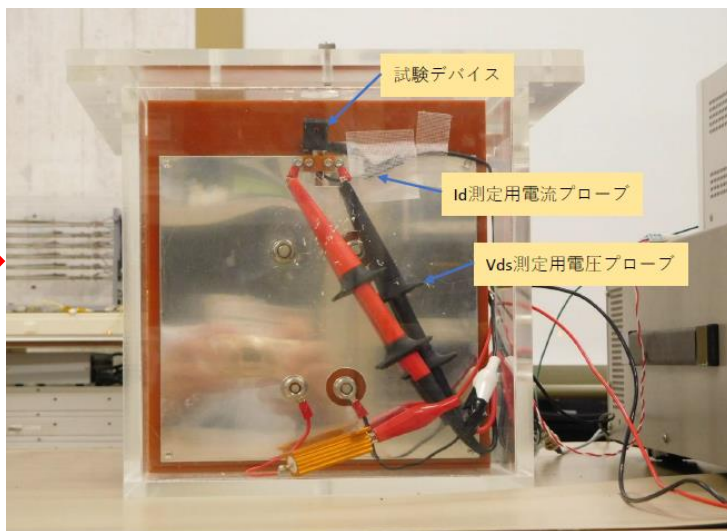
(b) チャネル温度が臨界に達しデバイスが破壊する。(短絡破壊)

⇒破壊するまでの時間(短絡耐性時間)

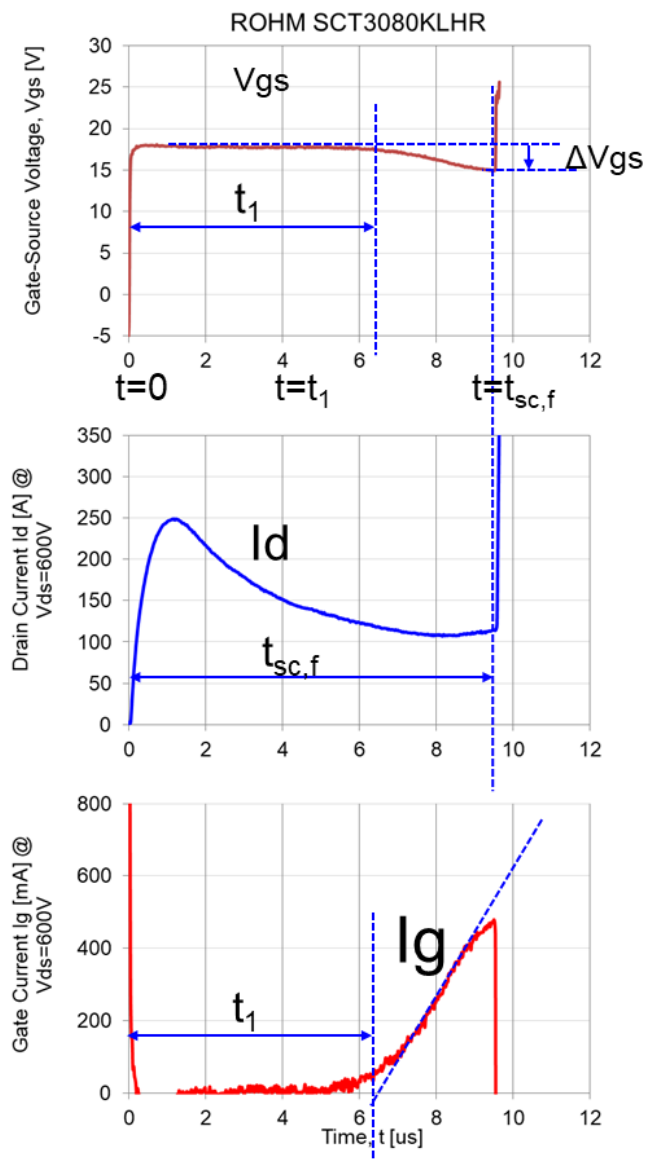
短絡試験回路



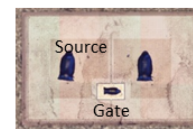
短絡試験回路



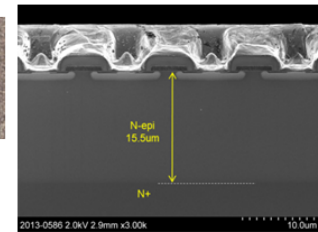
短絡耐量評価装置の写真



デバイス構造ベースの 熱インピーダンス(Z_{th})解析

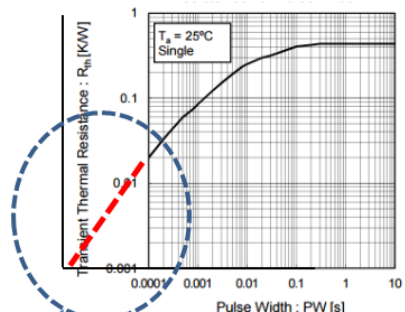


チップ



材料物性

データシート Z_{th}
測定値 Z_{th}



データシートにおける
熱インピーダンス(Z_{th})

Short時の Z_{th} を提供

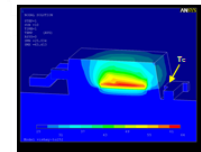
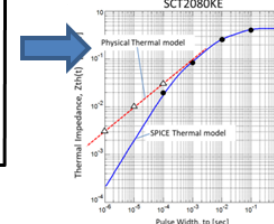
物理解析→構造解析

1st step

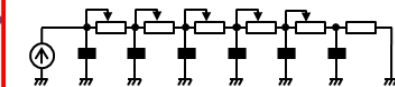
◆物理モデルの設定

◆数値解析とフィッティング

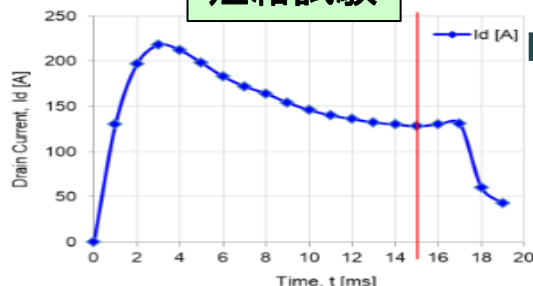
◆ Z_{th} のSPICE
シミュレーションモデル



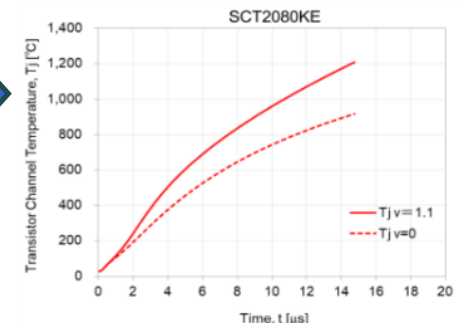
合成された Z_{th} の熱等価回路



短絡試験



SPICE 回路シミュレーションModel

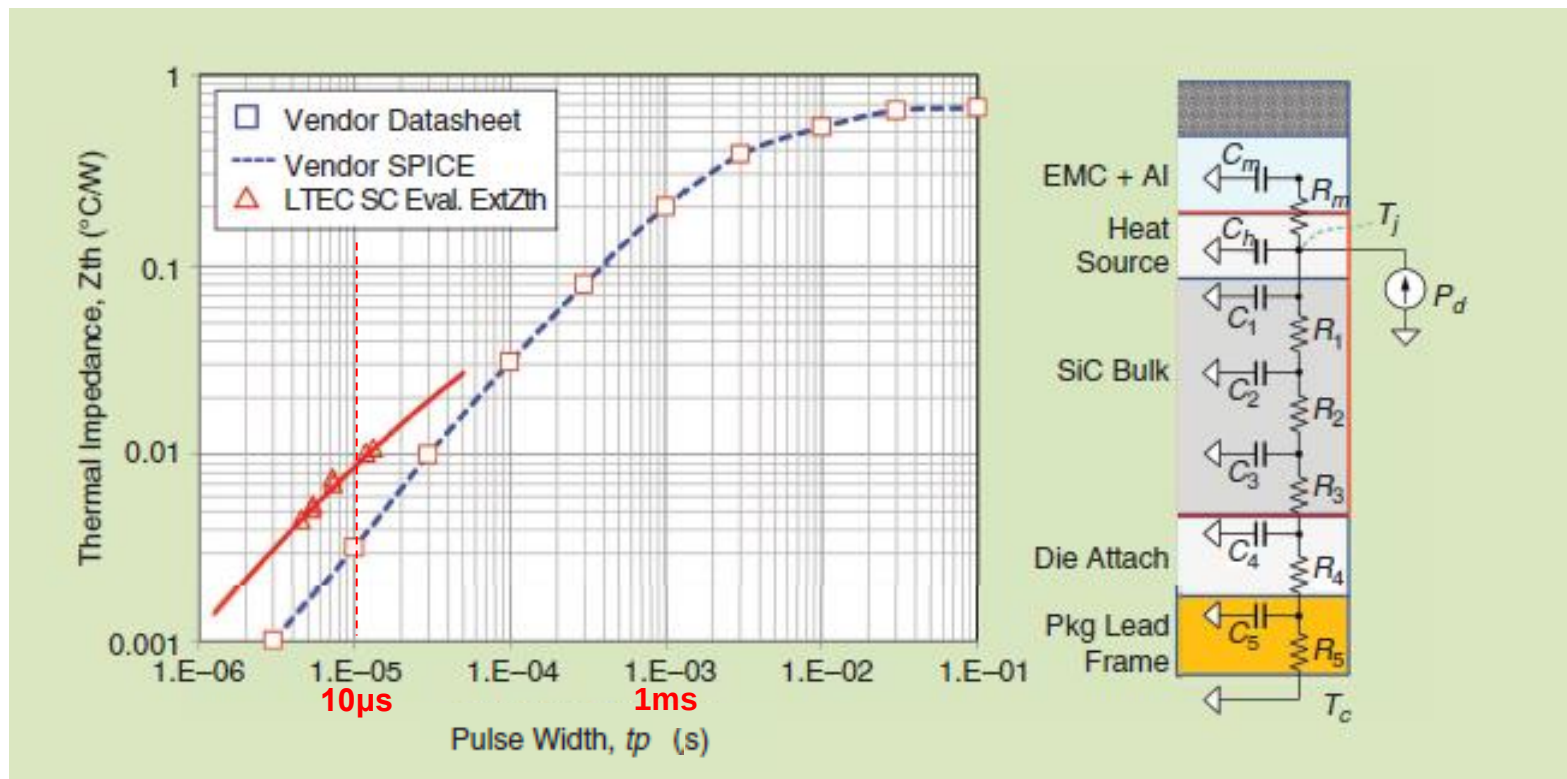


短絡イベント中のドレイン電流パルス波形

短絡パルス中のシミュレートされた温度上昇

短絡パルス範囲での Z_{th} のモデル化(~msec)

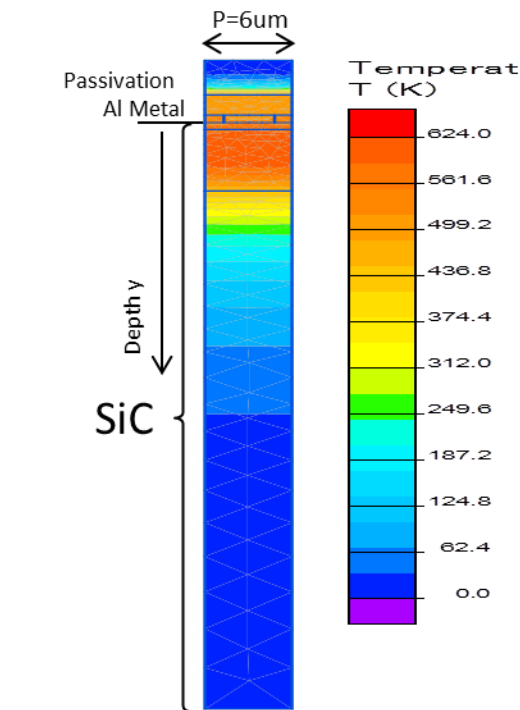
- ・データシート搭載のメーカー開示の熱インピーダンスと、当社モデルでの熱インピーダンス
当社モデルの方が高く、デバイスがメーカー想定温度に比べて高温になることを示しています。



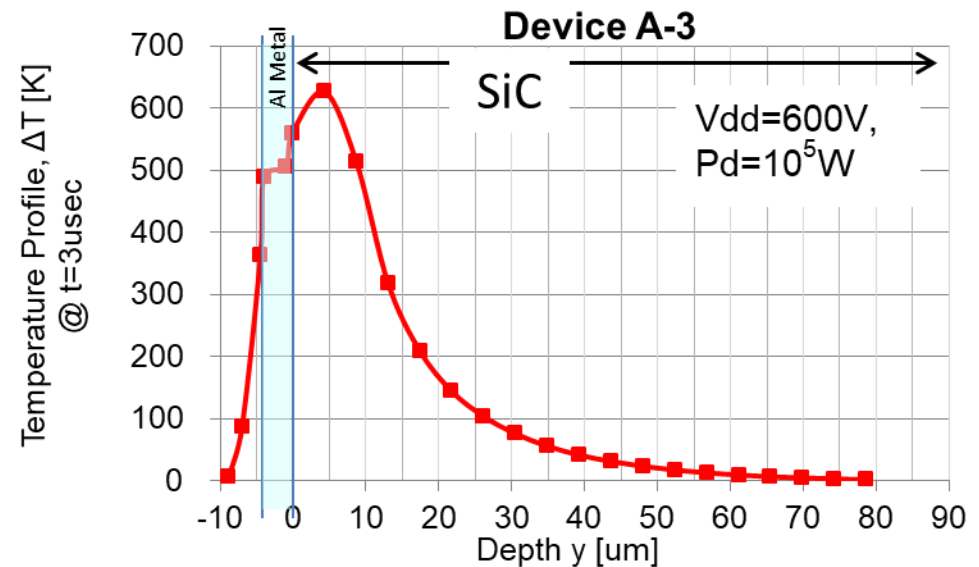
左)抽出/モデル化された熱インピーダンス Z_{th}
右) SiCトランジスタの合成電熱等価回路

SiCトランジスタセルの温度分布シミュレーション

- ・SiC-MOSFETの(a)ドレイン電流と(b)温度上昇 T_j シミュレーション結果の比較
- ・チップ表面接合部が最も高温となる。



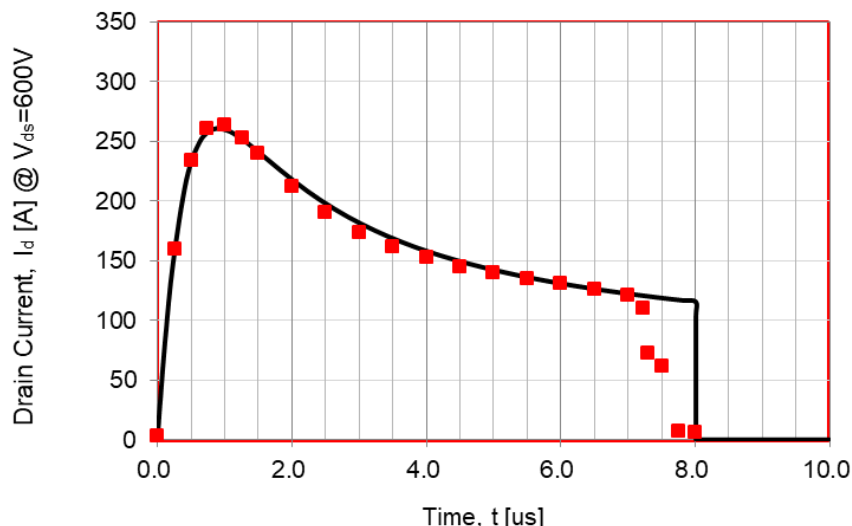
SiC-MOSFETの深さ方向の温度(T)
※ $3\mu\text{s}$ 時点



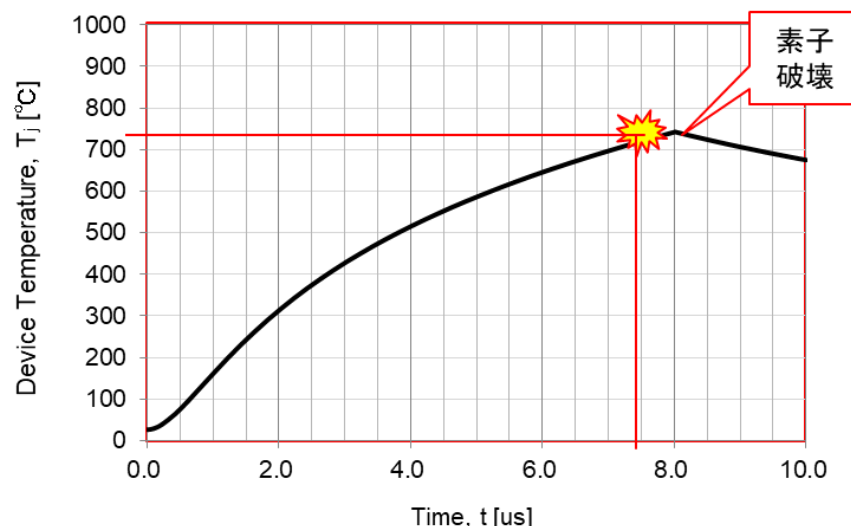
SiC-MOSFETの深さ方向の温度変化(Δt)
※ $3\mu\text{s}$ 時点

熱インピーダンスモデル比較 (サンプルC)

- ・短絡過渡SPICEモデリングおよび抽出されたトランジスタの温度。
破壊時のデバイス温度 T_j は約720°Cであると推定される。



ドレイン電流(I_d)と短絡耐量時間(t_{sc})



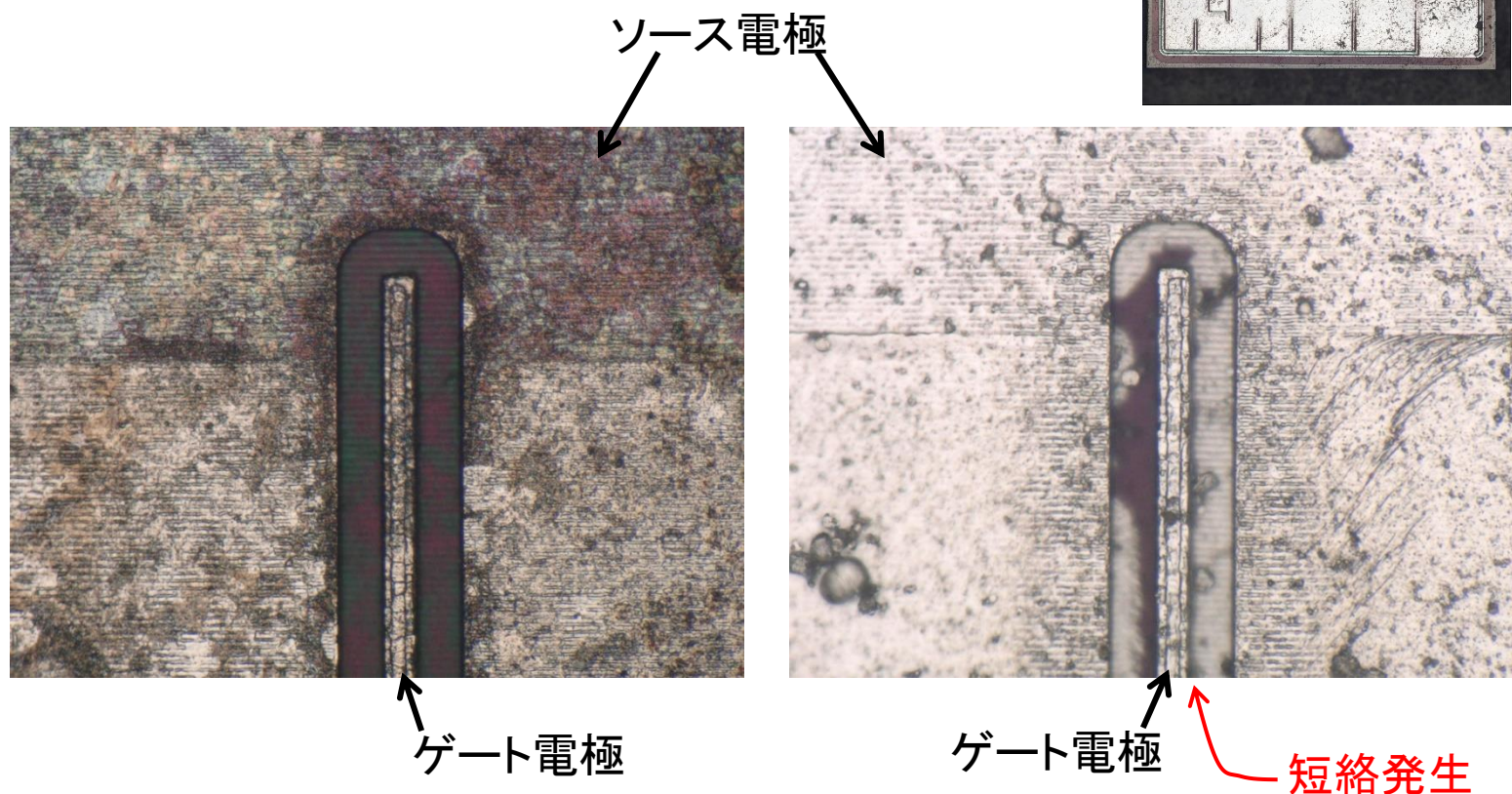
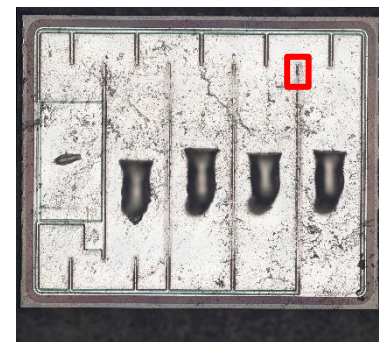
チャネル温度(T_j)と短絡耐量時間(t_{sc})

接合温度(T_j)試算結果

	Datasheet Graph	Vendor's Zth Model	1D Model	Simulated
P_d (W)	9.5×10^4			
t (μ sec)	7.2			
Z_{th} (°C/W)	NA	0.0025	0.0075	
T_j (°C)	NA	238	712	720

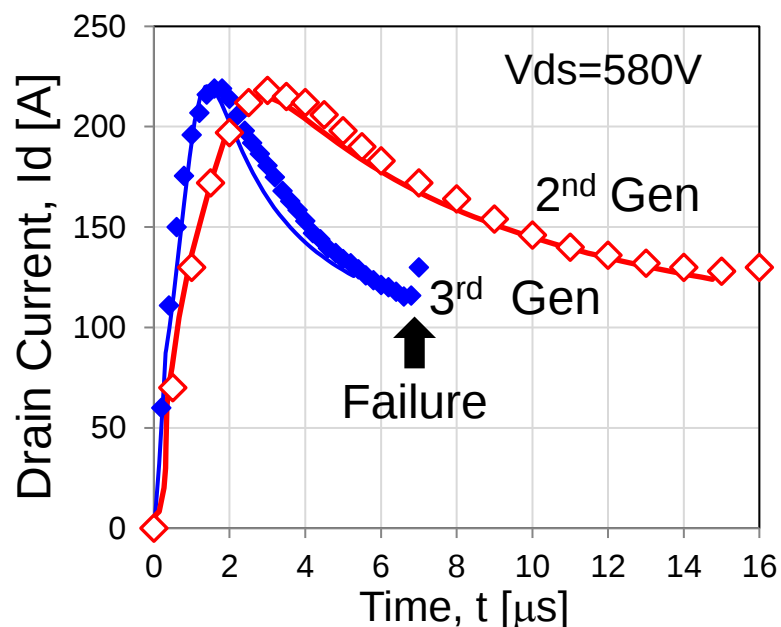
SiC-MOSFETのソースメタル融解

- ・短絡後のチップ観察でAlの溶解が確認。
→短絡イベント中に、トランジスタの温度が
アルミニウムの融解温度 ($T_m \sim 660^\circ\text{C}$) を超えている。

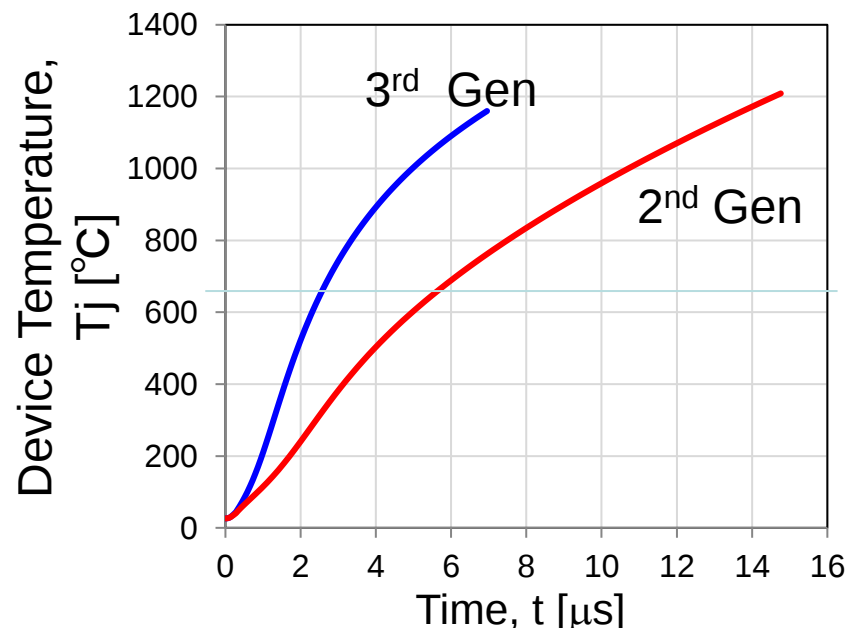


② チップサイズと短絡耐性の関係

- ・デバイス進化(世代の違い)によるダイサイズのシュリンクにて、短絡耐量の特性悪化がみられる。



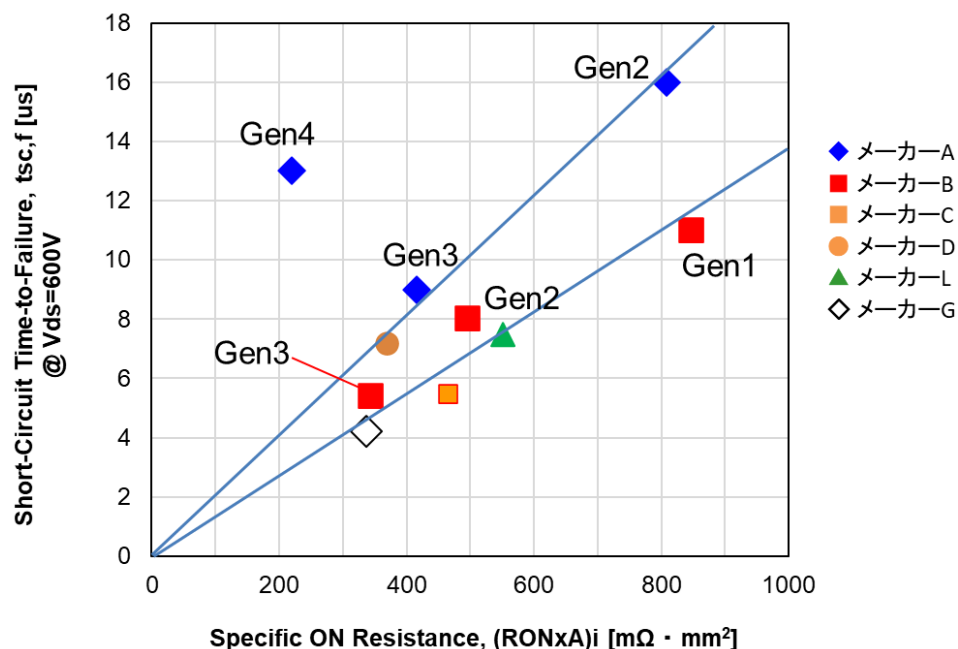
ドレイン電流 (I_d) と短絡耐量時間 (tsc)



チャネル温度 (T_j) と短絡耐量時間 (tsc)

短絡耐量およびトランジスタのスケーリング

- トランジスタの単位セルのサイズが縮小すると、短絡耐量時間 $t_{sc,f}$ は減少する傾向がある。
→メーカーAの第4世代トランジスタは、新構造を採用し、 $t_{sc,f} \sim 13 \mu s$ を実現している製品も見られる。



複数世代SiC-MOSFETの短絡耐量時間 $t_{sc,f}$ とトランジスタ単位面積当たりON抵抗 ($RONx A$) の相関

SiC—MOSFETの短絡耐量の現状

- ・デバイス構造を解析、短絡パルス範囲での Z_{th} のモデル化することで、短絡イベントでの破壊現象に近い T_j (接合温度)のシミュレーションを行う事が出来た。
 - 抽出された伝熱モデルを使用して、回路/システム設計者は、回路/トランジスタの設計マージンを見積もることができる。
- ・デバイス構造の進化によるダウンスケーリングによる、チップサイズのシュリンクによって短絡耐性は悪化する。
 - 構造、技術的な対策、改善が必要
- ・ $V_{ds}=600V$ で、現状の先端デバイス(第3世代トランジスタ)での短絡耐性時間はSi-IGBT(t_{scf} 約 $10\mu s$)と比較すると短い製品が多く、チップサイズを大きくするには歩留まり(コスト)が問題となる。
 - 構造、技術的な対策、改善が必要

総括

- ・車両搭載ユニットの小型化、軽量化、電池の大容量化の要望に伴い、インバータ駆動電圧は高圧（800V以上）へとシフトしつつあり、大きなアクションとしては Si-IGBT⇒SiC-MOSFETへの置き換えが進む。
 - ・Si-IGBTに対してSiC-MOSFETのコストは高いが、特性が優れていることから、電動車への搭載（インバータ、コンバータ、充電器）のケースが増えている。
 - ・電動車への搭載についてはコストの問題、特にインバータに関しては短絡耐性が課題。デバイスプロセスによるチップのシュリンクによる歩留まり向上、コスト低減が求められる。一方で、インバータへのSiC-MOSFET採用については短絡耐性の向上、信頼性を上げる必要がある。
- 現状インバータ搭載のSiCパワーモジュールとしてはコストの点からマルチチップが主流であるが、特性のマッチング、温度監視が課題。
- 短絡耐性については、新構造の採用によりチップシュリンクしても短絡耐性の高い製品も見られる。

関連レポート

案件 No.	レポート名	カテゴリー	Semiconductor Manufacturers Power
18G-0008-1	1200V SiC-MOSFET技術の現状とベンチマーク (2018年版)	Benchmark	ROHM WOLFSPEED INFINEON
18G-0010-1	SiC-MOSFET(ROHM SCT2080KE)の拡張熱インピーダンスモデル	熱インピーダンス	ROHM
18G-0018-1	SiC-MOSFET(ROHM SCT3080KL)の拡張熱インピーダンスモデル	熱インピーダンス	ROHM
18G-0032-1	Wolfspeed 製1200V SiC-MOSFET (C3M0075120K)短絡耐量評価レポート	短絡耐量	Wolfspeed
19G-0005-1	Wolfspeed製 900V SiC-MOSFET (E3M0065090) 短絡耐量評価レポート	短絡耐量	Wolfspeed
19G-0007-3	ON Semi製 SiC-MOSFET(NVHL080N120SC1) 短絡耐量解析レポート	短絡耐量	OnSemiconductor
19G-0019-1	Rohm SCT3080KLHRC11 短絡耐量評価レポート	短絡耐量	ROHM
19G-0020-1	Infineon IMW120R045M1XKSA1短絡耐量評価レポート	短絡耐量	Infineon
19G-0020-2	Infineon IMW120R045M1XKSA1熱インピーダンスレポート	熱インピーダンス	Infineon
19G-0025-1	1200V SiC-MOSFET短絡耐量ベンチマークレポート	Benchmark	Rohm WOLFSPEED ON-Semi INFINEON
20G-0015-3	Toshiba SiC MOSFET(TW070J120B) 短絡耐量レポート	短絡耐量	TOSHIBA
21G-0009-1	電気自動車 (xEV) のパワートレインにおけるSiおよびSiCパワートランジスタ ～日本の自動車メーカーおよび半導体メーカーの調査～	Benchmark	Fujielectric Denso Hitachi Toshiba ROHM WOLFSPEED INFINEON
21G-0018-3	GeneSiC 1200V SiC-MOSFET 「G3R75MT12K」 短絡耐量解析レポート	短絡耐量	GeneSiC
22G-0007-3	ローム製第4世代SiCMOSFET SCT4062 短絡耐量評価レポート	短絡耐量	ROHM
22G-0017-1	1200V SiC-MOSFET技術の現状とベンチマーク (2022年版)	Benchmark	TOSHIBA ROHM WOLFSPEED ON-Semi INFINEON

今後、SDGsという世界的な大きな流れの中で、
SiCを含めて化合物半導体、パワーデバイスの需要は
益々増え、様々な進化をしていくと思われます。

エルテックは解析メーカーとして、製品の特許、特性、
構造、様々な視点でデバイス、搭載製品を評価し、
開発をサポートしてまいります！

ご清聴ありがとうございました。



<https://www.ltec-biz.com/>