

## 1200V SiC MOSFETs調査・ベンチマークレポート(2022年版)

### 背景

過去4年間で、SiCトランジスタはEV(電気自動車)で使用され始め、主要メーカーは技術更新を行いました(2016年のローム第3世代プロセスから2021年の新しい第4世代プロセス)。エルテックは2018年以降、これらの製品に関する重要な分析データと情報を蓄積しており、そのデータには中国のメーカー(BYD)やTier 1の自動車システムサプライヤー(DENSOなど)が含まれています。それらの情報を基に、2018年度に作成したSiC MOSFETベンチマークレポートを更新し、2022年版のSiC MOSFET技術調査およびベンチマークレポートをリリースします。

### 調査結果:

- ・SiCウエハの供給を確保するための買収・合併
- ・200mm SiCウエハ(WOLFSPEED)の生産開始
- ・用途拡大(EV、PV等)と歩留まりの向上によるASP(平均販売価格)(-25 ~ -40%削減されている2018-2022)
- ・トレンチ構造のSiC MOSFETが普及しつつある(ROHM、Infineon、デンソー、富士電機、BYD)
- ・SiC MOSFETの着実かつ絶え間ない技術改善と性能向上。面積あたりのオン抵抗(RONxA)は、 $\sim 220\text{m}\Omega \cdot \text{mm}^2$ (第4世代、 $V_{\text{dss}}=1200\text{V}$ )に達しており、これは650V Si スーパー Junction MOSFET(CoolMOS C7)のRONxAの約1/4である。
- ・半導体メーカーの分類
  - 垂直生産統合のトップリーダー(ウエハ→デバイス→モジュール)
  - 専用アプリケーション(例、鉄道、自動車Tier-1)のB-to-B
  - 一般的な商業/産業アプリケーションのメーカー

### オープンレポート内容(次ページの目次参照):

ベンチマーク: TOSHIBA, ROHM (3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> Gen), Wolfspeed, Onsemi, INFINEON (CoolSiC M1)

このレポートで対処する質問:

- ・SiC ウエハの主要サプライヤーおよび大手なSiCトランジスタメーカー
- ・SiCトランジスタの技術進化および性能向上動向
- ・SiC MOSFETは値下がりしていますか? ASP(平均販売価格)が下がる傾向はありますか?
- ・SiCとSi系のトランジスタのコスト/価格比は? 2018年から変わった?
- ・短絡(SC)の耐性と短い耐性時間について
- ・大電流( $I_d \sim 200\text{A}$ )パワーモジュールに使用される大面積SiC MOSFETの製造歩留まり低下への対策

レポート販売価格: 80万円(税別)

目次 2022年版		ページ
1	1.1 エグゼクティブサマリー	2
	1.2 はじめに: 背景, 目的 & 範囲	5
	SiCトランジスタを使用した電気自動車(xEV)システム	6
2	SiCトランジスタの展望	8
	2.1 Si、GaNとSiCパワートランジスタの競合関係	8
	Table 2-1: SiCデバイスおよびモジュールメーカーの現状 (2022年7月時点)	9
3	SiC MOSFETの技術動向と進化	11
	3.1 SiC MOSFETの技術動向と進化	12-17
	3.2 更なる高耐圧SiC MOSFETs: エピ層の厚さ	18
	3.3 SiC MOSFETのブレイクダウン電圧 Bvdssとエピ層厚さ	20
	3.4 SiC MOSFETのオン抵抗とブロッキング電圧のトレードオフ	21
	3.5 SiC 縦型MOSFET構造の進化	22-26
	ROHM 第4世代SiC MOSFET: SCT4062KR	22
	DENSO SiC MOSFET: Toyota Mirai用 Trench型SiC MOSFET	23
	BYD社(中国企業) Han EV用 SiC MOSFET	24
	次世代SiC MOSFET: Superjunction構造	25
	日立パワーデバイス 新規SiC MOSFET	26
4	SiC MOSFETの製造コストと価格について	27
	4.1 製造コスト	28-32
	4.2 平均販売価格(ASP)について 2018~2022年のSiCトランジスタの価格動向	33-36
	4.3 SiC MOSFETの考察事項とステータス: FOMと平均販売価格	37
5	SiC MOSFETのベンチマーク:	38
	第4世代ROHM, 車載用Infineon, Onsemi, GeneSiC, IGBT-6	
	5.1 SiC MOSFETの信頼性に対する懸念点	39
	5.2 Table 5-1: 1200V Si-IGBT vs. SiCトランジスタベンチマーク	40
	5.3 Table 5-2: 評価された1200 V SiC MOSFETの構造	41
	5.4 性能指数FOM	42
	5.5 SiC MOSFETのベンチマーク結果	46
	5.5.1 比較結果: パフォーマンス & FOM	50-53
	5.5.2 電気特性評価	54
	真性の電気特性の比較 RON成分解析 オフ状態のドレインリーク電流の比較	56-68
	5.6 大電流パワーモジュール: SiC MOSFETチップサイズとその製造歩留まり 大電流アプリケーション(> 200A)と歩留まりの制限	69-74
	5.7 SiC MOSFETsの負荷短絡耐量 ★ Scaling効果と技術動向	75-82
	5.7.1 背景情報	75
	5.7.2 モーターインバーターの短絡イベント	76
	5.7.3 1200V SiC MOSFETで測定された短絡波形	77
	5.7.4 短絡試験回路	78
	5.7.5 短絡波形と特性耐久時間の定義	79
	5.7.6 温度上昇ΔTjの解析と推定: SPICEシミュレーション	80
	5.7.7 短絡ドレイン電流波形の比較	81
	5.7.8 短絡耐量およびトランジスタのスケーリング	83
6	まとめと結論	84-86
7	参考文献 ★重要な特許のリスト(追加)	87-88
8	Appendixes	89-102
	Appendix 1: パワートランジスタとモジュール関連の用語集	90
	Appendix 2: パワーMOSFETのオン抵抗性能指数(FOM): RONxA	91
	Appendix 3: SiCおよびGaNパワートランジスタの現状と展望	92
	Appendix 4: パワーエレクトロニクスデバイス用の半導体材料の関連する特性	93
	Appendix 5: パワー電子デバイスにおける高温考察	94
	Appendix 6: Si-IGBTおよびSiCパワートランジスタの技術的方向性	95
	Appendix 7: Si-IGBTとSiCパワートランジスタの現在の長所と短所	96
	Appendix 8: SiCウエハやエピ価格情報	97
	Appendix 9: SiCウエハサプライヤー	98
	Appendix 10: SiCトランジスタの進歩	99
	Appendix 10-1: 大手SiC関連企業重要な特許のリスト	100-102

# SiC MOSFETs 調査・ベンチマークレポートから抜粋 (1)

Table.1-1 Outline of FOM and cost/price of evaluated device

		TOSHIBA	ROHM	WOLFSPEED	ON-Semi	INFINEON	INFINEON	
FOM	Summary of Performance FOMs	TW070J120B	SCT3080KL	SCT4062KR	C3M0075120K	NVHL080N1205C1	AIKW120R060M1H	IKQ75N120C56X
	◆評価ランキング	SiC						Si
	Process Technology Generation							
	Specific Effective ON Resistance, RONxA @ Tj = Tjmax	mΩ · mm <sup>2</sup>						
	Specific Intrinsic ON Resistance, RONxA @ Tj = 150°C	mΩ · mm <sup>2</sup>						
	Qg x RON @ Tj = Tjmax	nC · Ω						
	Ciss x RON @ Tj = Tjmax	pF · Ω						
	Turn-off Switching Energy, Eoff x RON @ Tj = Tjmax	mJ · mΩ						
	Turn-on Switching Energy, Eon x RON @ Tj = Tjmax	mJ · mΩ						
	Maximum Switching Frequency, fmax	kHz						
Cost & Price	Short-Circuit Robustness, t1 (Gate current time) 600V	us						
	Average Selling Price, ASP (Retailer)	\$/unit						
	ASP per Ampere (@ Tc=100°C)	\$/A						
	ASP x RON	\$/Ω						
	Processed Wafer Cost (Estimated)	\$/wafer						

Table 2-1: SiCデバイスおよびモジュールメーカーの現状 (2022年7月時点)

#	Company	LTEC Report※	Epi Wafer	Device Chip	Module	Latest activities
1	STMicro (IT)	✓	✓ Norstel AB	✓		6インチウェハを使用。★STMicroの650VSIC-MOSFETは、TESLA-3iパワーカードで使用されている。
2	INFINEON (DE)	✓		✓ Sillectra	✓	
3	WOLFSPEED (US) (CREE)	✓	✓	✓	✓	
4	ROHM (JPN)	✓		✓ SiCrystal (subsidiary)	✓	
5	ONSEMI (US)	✓	✓ GTAT	✓	✓	
6	MITSUBISHI Electric (JPN)	✓		✓	✓	
7	Fuji Electric (JPN)	✓		✓	✓	
8	Hitachi (JPN)				✓	
9	TOSHIBA (JPN)	✓		✓		
10	MicroSemi/Microchip (US)	✓		✓	✓	
11	GeneSiC (US)	✓		✓		
12	Littelfuse/IXYS (US)	✓		✓		
13	United SiC Corp (Qorvo) (US)	✓				
14	X-Fab (US)				Foundry	
15	Denso (JPN)	✓		✓	✓	
16	Toyota (JPN)					
17	BOSCH (DE)			✓		
18	SUMITOMO Electric Ind. (JPN)			✓		

※解析レポートはエルテックにお問い合わせください



# SiC MOSFETs 調査・ベンチマークレポートから抜粋 (2)

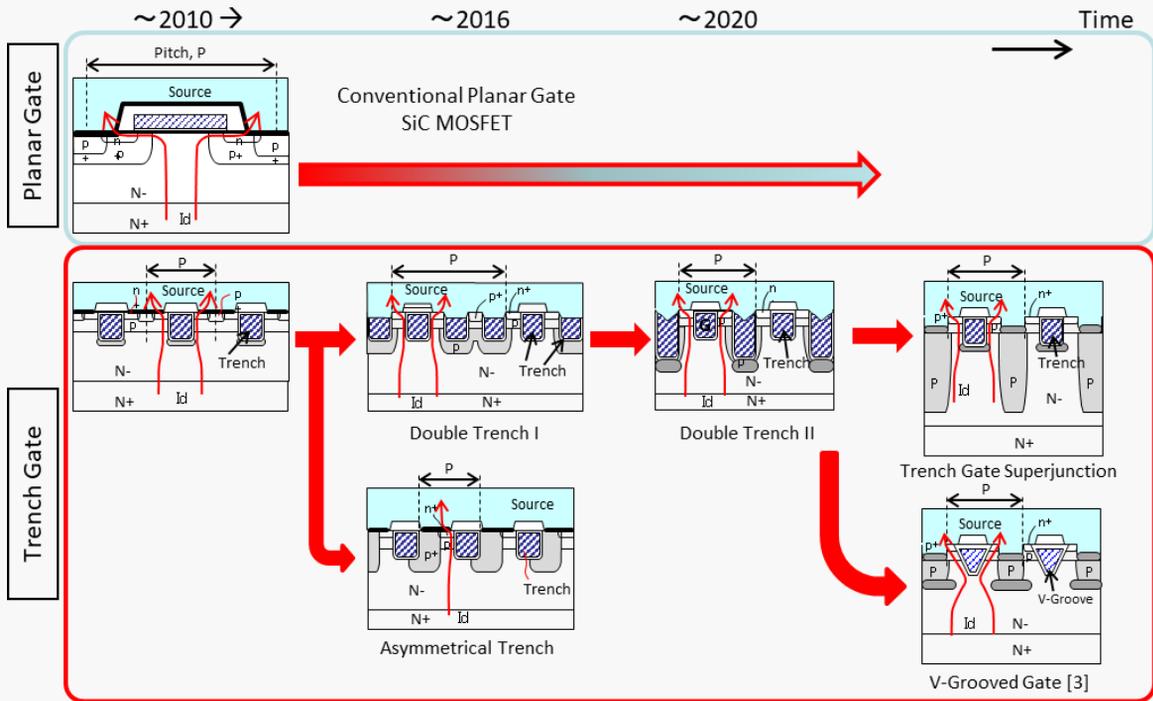


Fig 3-1 SiC縦型MOSFET構造の進化

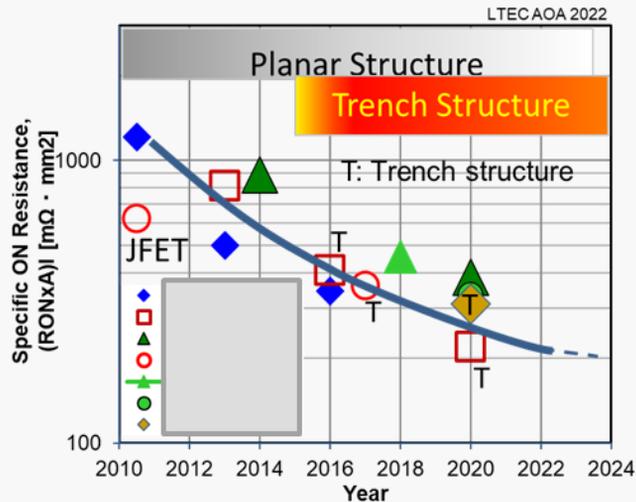


Fig. 3-2 1200V SiC-MOSFETのオン抵抗 (RONxA) 性能指数(FOM)の傾向

# SiC MOSFETs 調査・ベンチマークレポートから抜粋 (3)

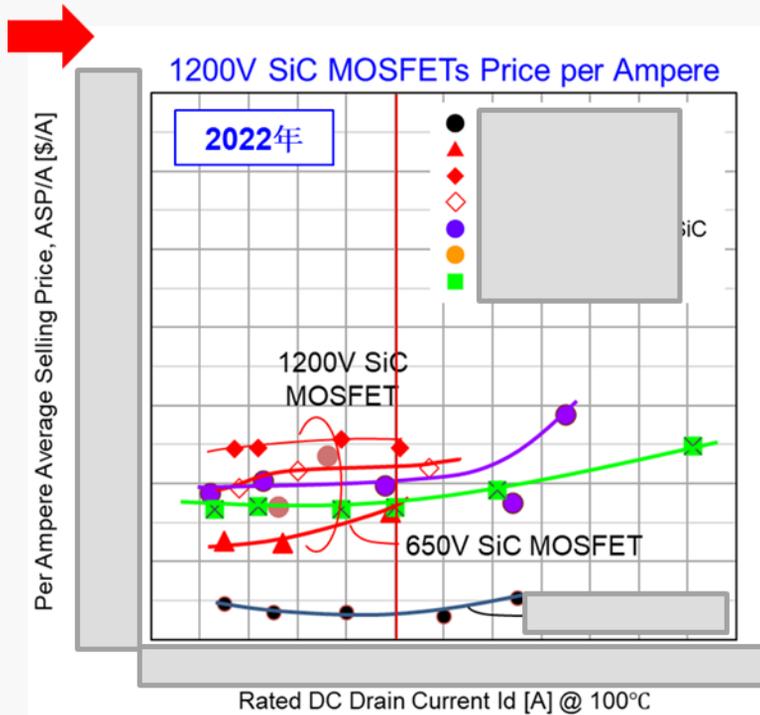


Fig.4-3: 比較のために、2018年のアンペアあたりASPのデータ(左のグラフ)と2022年のASP/A データ(右のグラフ)を示します。

## ・大面積(低 RON) チップの歩留まりとパワーモジュールの考慮事項

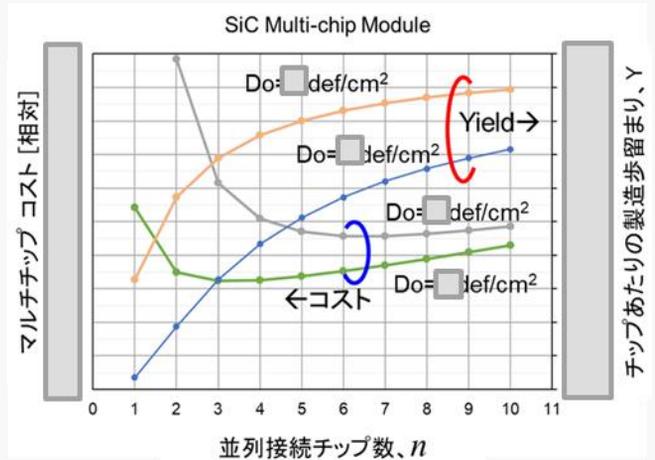
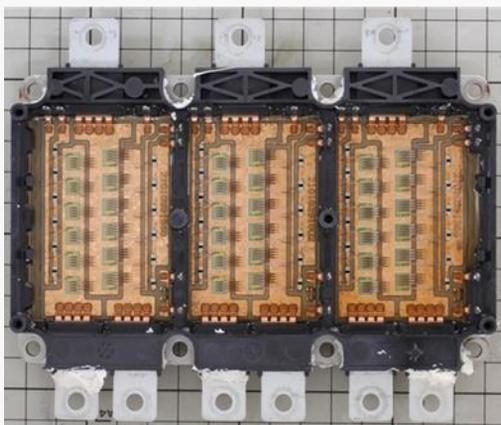


Fig.5-23 グラフでは、製造歩留まり(Y、青いとベージュ線)と総チップコスト(nチップ、灰色と緑線)を表す。