

電圧共振用 IGBT : GT20N135SRA

アプリケーションノート

概要

IH 炊飯器、IH 調理器およびインバーター電子レンジなどの調理家電を中心に共振回路を用いたインバーターシステムが幅広く使用されています。加熱用のコイルとコンデンサーが並列に配置される電圧共振と直列に配置される電流共振回路に大別されますが、いずれの応用においても多くの場合スイッチング素子として IGBT が使用されています。

今回、電圧共振用に 20A、1350V の定格を有する IGBT GT20N135SRA を開発し 2019 年 10 月より量産を開始しました。今後電流ならびに電圧定格の異なる製品展開を行い、ラインアップを拡大していきます。

本資料では、共振回路および誘導加熱の説明ならびに新製品 GT20N135SRA の特長を従来品の GT40RR21 と比較しながら説明します。

これは参考資料です。本資料での最終機器設計はしないでください。

本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。

目次

概要.....	1
目次.....	2
1. 共振回路.....	4
1.1. 電圧共振.....	4
1.2. 電流共振.....	5
1.3. 誘導加熱.....	6
2. ソフトスイッチング用 IGBT	7
3. AC220 V 電圧共振用 IGBT GT20N135SRA の特長	8
3.1. コレクター飽和電流の抑制	8
3.2. 順方向安全動作領域 (FBSOA) の拡大	9
3.3. 低熱抵抗化	10
3.4. ボディーダイオードの順方向特性改善	10
3.5. 放射ノイズの改善	11
4. まとめ.....	12
製品取り扱い上のお願い	13

図目次

図 1.1	IGBT 電圧共振回路応用例.....	4
図 1.2	電圧共振回路動作波形.....	4
図 1.3	電圧共振回路動作.....	4
図 1.4	IGBT 電流共振回路応用例.....	5
図 1.5	電流共振回路動作波形.....	5
図 1.6	電流共振回路動作.....	6
図 1.7	誘導加熱の原理.....	6
図 2.1	ソフトスイッチング用 IGBT の変遷.....	7
図 3.1	GT20N135SRA と GT40RR21 の順方向特性比較.....	9
図 3.2	擬似突入電流試験回路と試験結果.....	9
図 3.3	GT20N135SRA と GT40RR21 の安全動作領域比較.....	9
図 3.4	GT20N135SRA と GT40RR21 の過渡熱抵抗特性比較.....	10
図 3.5	RC-IGBT の構造図とボディダイオード.....	10
図 3.6	GT20N135SRA と GT40RR21 のボディダイオード順方向特性比較.....	11
図 3.7	GT20N135SRA と GT40RR21 のノイズ比較（卓上型 IH 調理器）.....	11

表目次

表 2.1	ソフトスイッチング用ディスクリート IGBT の製品一覧.....	8
表 3.1	GT20N135SRA と GT40RR21 の飽和熱抵抗比較.....	10

1. 共振回路

1.1. 電圧共振

電圧共振は、スイッチング用 IGBT と FWD（注）および、LC 並列回路で構成されており、IH 炊飯器や IH 調理器およびインバーター電子レンジなどに応用されます。代表的な回路例を図 1.1 に示します。交流入力(AC 入力)をダイオードブリッジ (DB) で全波整流しコンデンサー (Cm) を充電します。この充電電圧を供給源として共振用コイル Lr、共振用コンデンサー Cr の並列回路およびスイッチング用 IGBT Q1 と FWD で構成されています。図 1.2 にスイッチング用 IGBT に印加される電圧と通電電流、および共振用コイルの通電電流を、図 1.3 に各サイクルにおける回路動作を示します。（注：FWD---環流ダイオードを指し、Free Wheel Diode の略）

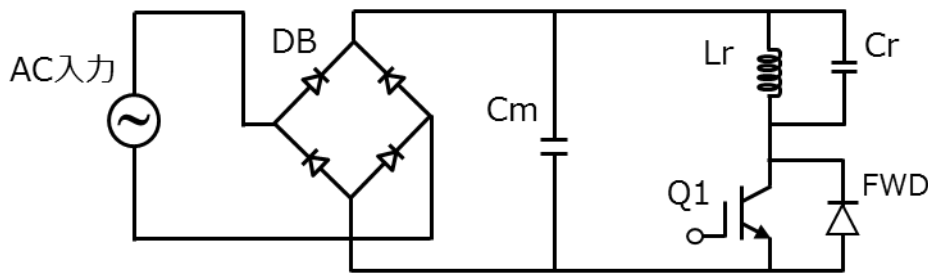


図 1.1 IGBT 電圧共振回路応用例

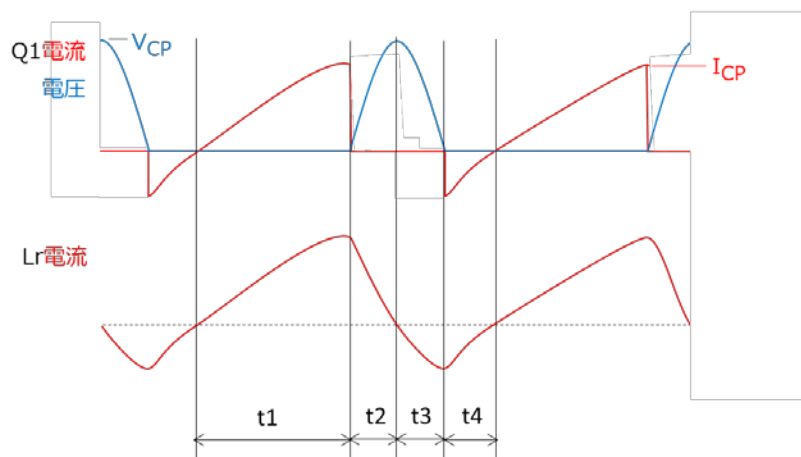


図 1.2 電圧共振回路動作波形

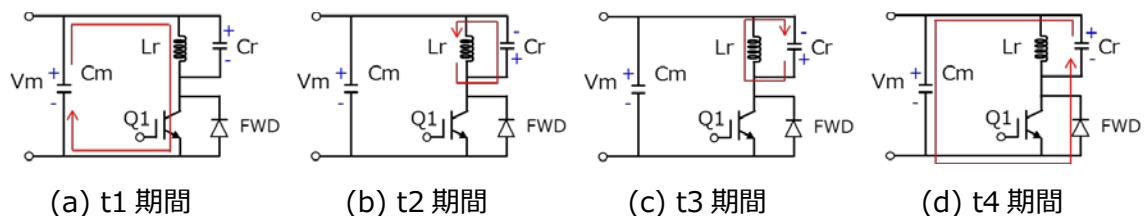


図 1.3 電圧共振回路動作

(a) Q1 がターンオンし、Cm(+)-Lr-Q1-Cm(-)の閉ループで直線的に電流が増加します。

$I_{CP} = (V_m / L_r) \cdot t_1$ この時、Cr の両端電圧 V_{Cr} は、 V_m 電圧にクランプされています。（図 1.3(a)）

(b) Q1 がターンオフ、Lr および Cr による共振が始まり、この共振電圧のピーク $V_{CrP} = V_m \cdot t_1 / \sqrt{Lr \cdot Cr}$ となり、
t1 すなわち I_{CP} に比例して増加します。なお、Q1 の両端電圧 $V_{CP} = V_{CrP} + V_m$ の電圧が印加されます。

(図 1.3(b))

(c) Lr および Cr による共振電流が逆転し Cr の両端電圧は低下します。(図 1.3(c))

(d) Cr の電圧極性が反転、Cr の電圧が V_m を超えると Cr-Cm-FWD-Cr の経路で電流が流れ始めます。

(図 1.3(d))

この(a)~(d)の動作を繰り返し行います。

電圧共振の場合、共振電圧のピーク値 V_{CrP} が入力交流電圧のピーク値よりも非常に大きくなりますので、AC100 V 入力で耐圧 900~1200 V、AC220 V 入力で 1350~1800 V 程度のスイッチング用 IGBT が使用されています。

(電圧定格に対するマージンなどにより、使用されるスイッチング用 IGBT の耐圧は幅があります。)

1.2. 電流共振

電流共振は、スイッチング用 IGBT 2 素子でハーフブリッジを構成する LC(R)直列回路となっています。代表的な回路例を図 1.4 に示します。調理家電応用において、加熱用コイル Lr は磁気結合により負荷 R と繋がっており等価的には LCR 直列共振回路を構成しています。図 1.5 に各スイッチング用 IGBT に印加される代表的な電圧と通電電流を、図 1.6 に各サイクルにおける回路動作を示します。

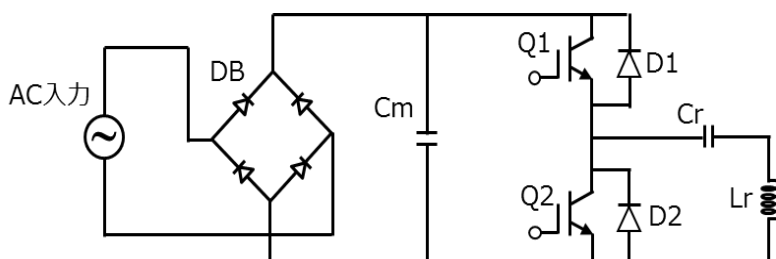


図 1.4 IGBT 電流共振回路応用例

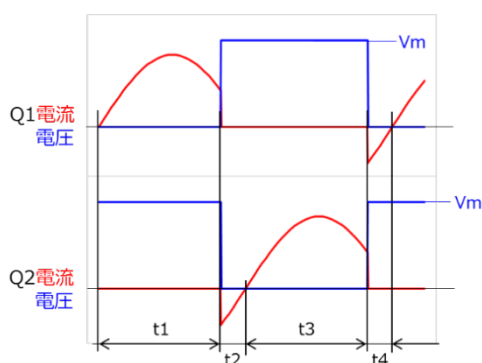


図 1.5 電流共振回路動作波形

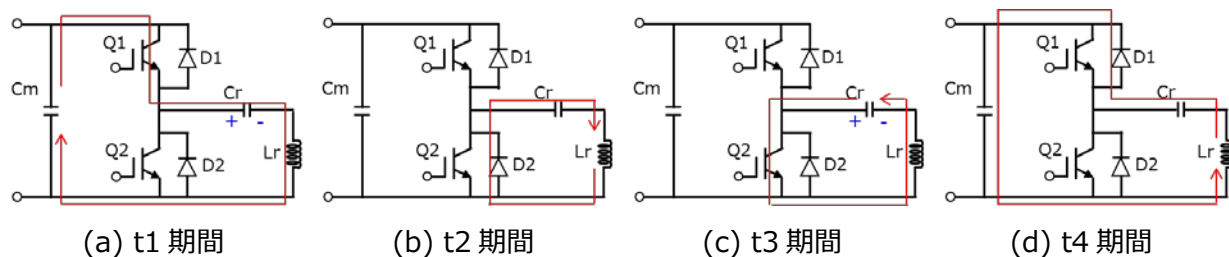


図 1.6 電流共振回路動作

- (a) Q1 がターンオンし、 $Cm(+)-Q1-Cr-Lr-Cm(-)$ の閉ループで $Lr \cdot Cr$ の共振電流が流れ、Cr が充電されます。(図 1.6(a))
- (b) Q1 がターンオフ、 $Lr-D2-Cr-Lr$ のループで継続して Cr の充電が行われます。(図 1.6(b))
- (c) Q2 のコレクター・エミッター間の電圧は、 $-1V$ 程度 ($D2$ の V_F) にクランプされた状態でターンオン (ゼロ電圧スイッチング : ZVS)、 $Cr(+)-Q2-Lr-Cr(-)$ の閉ループで共振電流が流れます。(図 1.6(c))
- (d) Q2 がターンオフ、 $Lr-Cr-D1-Cm-Lr$ のループで環流電流が流れ、Q1 のコレクター・エミッター間の電圧は、 $-1V$ 程度 ($D1$ の V_F) にクランプされ、次の Q1 ZVS に繋がります (図 1.6(d))

この(a)~(d)の動作を繰り返し行います。

電流共振の場合、スイッチング用 IGBT に印加される電圧は、入力交流電圧のピーク+スイッチング用 IGBT ターンオフ時のスパイク電圧となります。従いまして、AC220 V 入力に対して耐圧 600~650 V のスイッチング素子が使用されています。

(調理家電応用において、電流共振は電圧共振に対して制御電力が大きい、あるいは高周波スイッチングが必要とされるモデルに適用されており、AC100 V 入力での応用例はあまりありません。)

1.3. 誘導加熱

IH 炊飯器および IH 調理器などは、誘導加熱を利用して電気を熱へ変換しています。図 1.7 にその原理を示します。同図(a)は、IGBT を使用した電流共振回路を、同図(b)は加熱用コイル L_r とこのコイルに流れる電流により発熱する鍋を模式的に記述、同図(c)は加熱用コイルに電流を通电することで磁界が発生、その磁界により鍋に渦電流 i_e が流れ、鍋の表皮抵抗によりジュール熱 $i_e^2 \cdot R_L$ が発生し鍋を加熱することを表しています。

この状態を図(a)の共振回路に置き換えるとインバーター回路出力 (AC) から L_s 、 Cr および R_s から成る LCR 共振回路 (図(d)) を構成することになります。(L_s および R_s は、加熱用コイルから見た等価的なインダクタンスおよび抵抗成分)

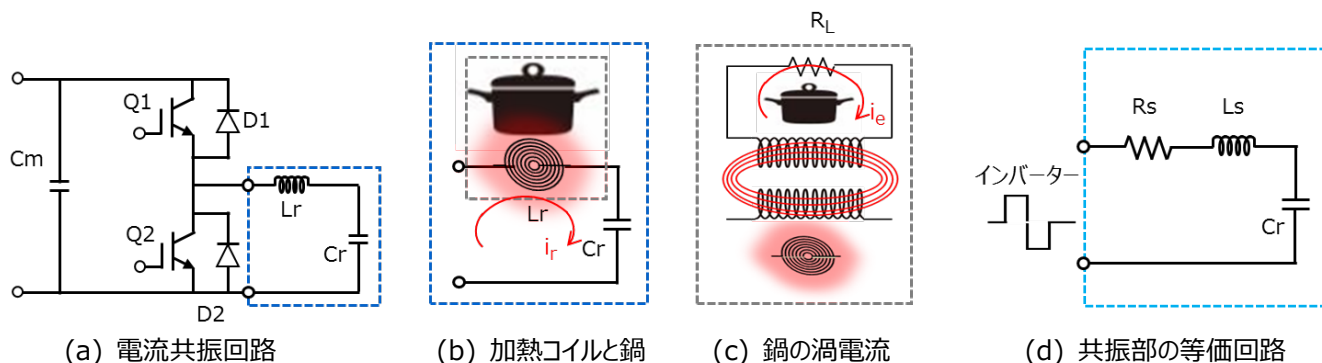


図 1.7 誘導加熱の原理

この等価抵抗 R_s は、鍋の材料に依存し磁性体である鉄や磁性ステンレスは大きく、非磁性体のアルミニウムや銅などは小さくなります。また、 R_s は周波数を上げると大きくなり、下げると小さくなる特性があるため、非磁性体鍋を負荷として使用する場合は、周波数を上げて、 R_s を大きくし、ジュール熱を上げる必要があります。

一般的に、磁性体鍋(鉄・磁性ステンレス)に限定したモデルでは、電圧・電流共振共に共振周波数を 20~30 kHz 程度に設定、非磁性体鍋(アルミニウム・銅)が使用できるオールメタル対応のモデルでは 80~100 kHz 程度に設定された電流共振回路を使用している事例が多く見られます。

2. ソフトスイッチング用 IGBT

東芝ディスクリート&ストレージでは、電圧・電流共振に用いられるソフトスイッチング用 IGBT に対して、様々な性能改善を進めてきました。

第 4 世代までの製品は、厚ウエハーを使用したパンチスルー (PT) 型でしたが、以降は順方向ならびにスイッチング特性が優れる薄ウエハーを使用した PT 型の第 6 世代製品が主流になっています。(これをフィールドストップ、FS 型と呼んでいます。)

また、この FS 型 IGBT では、コレクターの P 層が非常に薄く (トランスペアレント P コレクター層) 容易にコレクター層に N 層を形成できることにより、逆導通型 IGBT (Reverse Conducting IGBT : RC-IGBT) を開発・量産しております。

図 2.1 は、各世代の構造イメージおよびその標準的な静特性例を示しています。

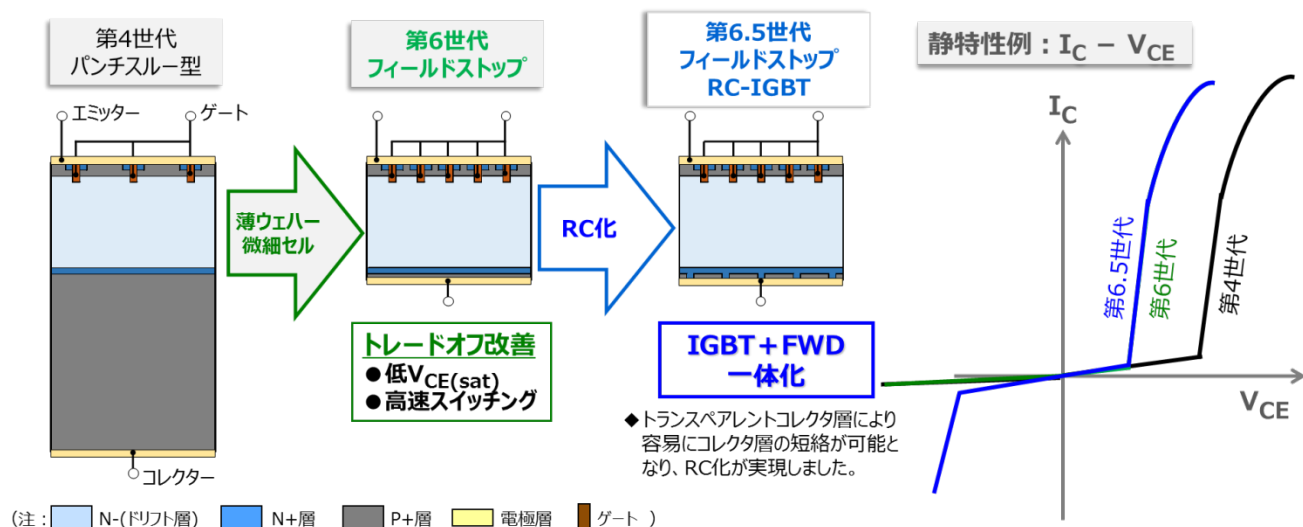


図 2.1 ソフトスイッチング用 IGBT の変遷

今回は、新たなデザインで様々な特長を有する第 6.5 世代プロセスを活用した電圧共振用 1350 V および 1100 V 耐圧の製品を開発しています。(表 2.1 赤字) AC220 V、中電力制御用 20 A/1350 V 定格の IGBT GT20N135SRA は 2019 年 10 月より量産を開始しました。さらに、その大電流製品および AC100 V 用に 1100V 耐圧の電圧共振用 RC-IGBT の開発、展開をしていく予定です。

東芝デバイス&ストレージでは、ソフトスイッチングの各用途向けに表 2.1 に記載する IGBT を量産・開発しています。

また、製品の定格、パッケージおよび用途を容易に判断できるように新製品 GT20N135SRA から型名付与法を変更しました。主な変更点は次の通りです。

- ① 電流定格 : 高温 100℃における直流コレクター電流表記 (従来は、主に常温電流定格で表記)

- ② パッケージ：アルファベット表記により分類（N：TO-247 パッケージ、従来は表記なし）
- ③ 電圧定格：アルファベット表記から電圧定格の 1 / 1 0 の数字を表記（135⇒1350 V 定格）
- ④ その他：応用、内部構造および世代の表記（SRA：ソフトスイッチング用 RC-IGBT、第 6.5 世代）

表 2.1 ソフトスイッチング用ディスクリート IGBT の製品一覧

VCES	AC100V 電圧共振用			AC220V 電圧共振用			電流共振用
	小容量 (~1100 W)	中容量 (~1250 W)	大容量 (~1400 W)	小容量 (~1900 W)	中容量 (~2200 W)	大容量 (~2400 W)	
600 V							GT40J322 GT50J341 GT50JR21 GT50JR22
900 V	GT50MR21						
1000 V		GT50N322A	GT50N324				
1050 V	GT50NR21						
1100 V		GT60PR21 S1PA6 (※)	S1PA7 (※)				
1200 V	GT40QR21			GT40QR21			
1350 V				GT40RR21	GT20N135SRA	S1PA5 (※)	
1800 V				GT40WR21			

（黒字：第 4 世代、緑字：第 6 世代、青字：第 6.5 世代、赤字：開発品・新製品）

（※：S1PA* は、開発段階の試作番号を示しており、量産時は正式名称に変更となります。）

3. AC220 V 電圧共振用 IGBT GT20N135SRA の特長

今回開発しました 20 A (@100°C DC コレクター電流定格) /1350 V 定格の GT20N135SRA は、従来の同等定格品である GT40RR21 と比較しますと様々な点で改善された性能を有しており、AC220 V 電圧共振応用に使用しやすくなっています。両製品を比較しながら新製品 GT20N135SRA の特長を記載します。

3.1. コレクター飽和電流の抑制

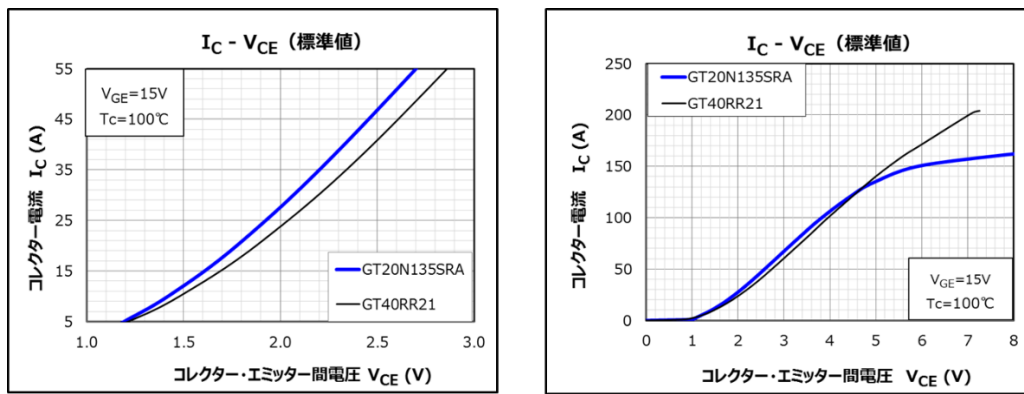
図 1.1 に示した電圧共振回路は、通常 Q1 がターンオンする時 Cm と Cr の両端電圧は同じであり、Q1 へのターンオン電流 i_c は、 $i_c = (V_m / L_r) \cdot t$ となりターンオン後の通電時間 t に対し直線的に増加していきます。したがって Q1 へ大きなターンオン電流が流れることは有りません。（ V_m ：Cm 両端の充電電圧）

しかし、機器の電源投入時など、Cr の充電電圧が Cm の充電電圧より小さい状態で Q1 がターンオンした場合、Cm(+) - Cr - Q1 - Cm(-) のルートで短絡電流が流れます。この電流を抑制するには、①回路の制御により短絡電流を抑制する(ソフトスタート)、②スイッチング素子の通電能力を抑える、という 2 つの方法があります。

GT20N135SRA は、GT40RR21 と比較して図 3.1(a)に示すように通常使用される電流領域(負荷電流領域)のコレクター・エミッター間電圧 V_{CE} は小さく、導通損失は低く抑えられています。一方、コレクター飽和電流 $I_{C(sat)}$ は、同図 (b)に示すとおり 150 A 程度 (@100°C) と小さくなっており、短絡時の通電電流を低く抑えることができます。その具体的な試験結果を図 3.2(b)および(c)に示します。

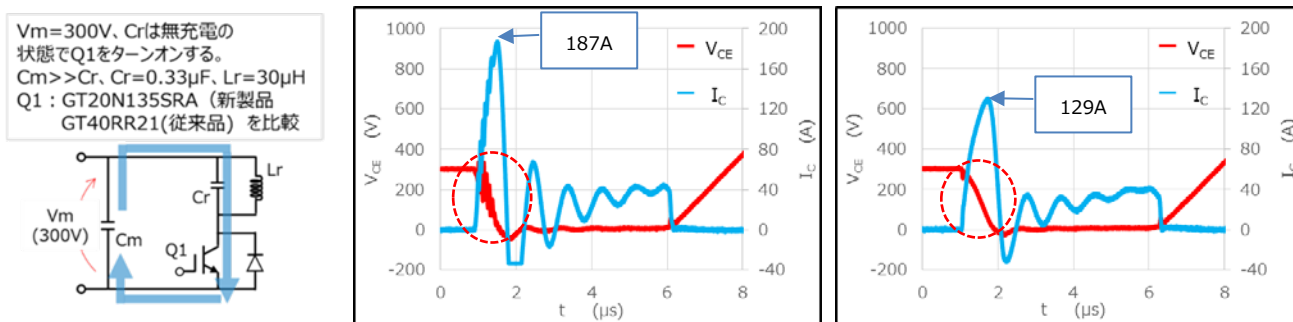
GT20N135SRA は、コレクター飽和電流 $I_{C(sat)}$ を低く抑えた結果、電源投入時に想定される短絡電流を低く抑えています。（187 A⇒129 A と大幅に減少）また、IGBT は、この短絡状態において発振し易く、GT40RR21 はその傾向が観測されていますが（図 3.2(b)破線赤丸）、GT20N135SRA ではこの発振現象も抑制されています。（図 3.2(c) 破線赤丸）

また、GT20N135SRA は、非繰り返しピークコレクター電流 $I_{CSM}=220\text{ A}$ ($t < 3\ \mu\text{s}$) が規定されており、電源投入時の短絡電流に対する判断基準としています。



(a) 負荷電流領域の電圧降下特性 (b) コレクター電流の飽和特性

図 3.1 GT20N135SRA と GT40RR21 の順方向特性比較



(a) 試験回路 (b) GT40RR21(従来品)試験結果 (c) GT20N135SRA(新製品)試験結果

図 3.2 擬似突入電流試験回路と試験結果

3.2. 順方向安全動作領域 (FBSOA) の拡大

GT20N135SRA は、ペレットデザイン(レイアウト、縦方向など)の最適化により、GT40RR21 と同等のペレットサイズでありながら安全動作領域を大きく拡げることができました。図 3.3 は、パルス幅 1 ms および 100 μs における両製品の FBSOA の保証値を示しています。

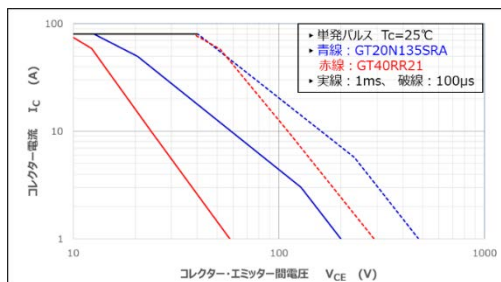


図 3.3 GT20N135SRA と GT40RR21 の安全動作領域比較

両製品の FBSOA は、コレクター・エミッター間電圧 V_{CE} が、高くなるにつれ耐量差が拡大する傾向にあり、100 V を超える条件において、GT20N135SRA は GT40RR21 に対し倍以上のコレクター電流を許容しています。

3.3. 低熱抵抗化

前述の通り GT20N135SRA は、ペレットデザインの最適化を進め FBSOA を広げることができましたが、同時に熱抵抗特性も改善されています。両製品の接合-ケース間の飽和熱抵抗 $R_{th(j-c)}$ を表 3.1 に、過渡熱抵抗 $r_{th(j-c)}$ を図 3.4 に比較しています。

GT40RR21 と比較して、GT20N135SRA の飽和熱抵抗は $0.17^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 改善され、過渡熱抵抗は時間 $t=0.1\sim 100\text{ ms}$ 期間、概ね 25~30 %程度小さくなっています。したがって、同じ電力損失、放熱条件であった場合、GT20N135SRA の接合部温度 T_j は GT40RR21 より低く抑えられることになります。

例えば、両製品を IH 調理器に使用し平均電力損失 35 W が発生した場合、GT20N135SRA の接合温度 T_j とケース温度 T_c の差、 $\Delta T_j(j-c)$ は 6°C 程度低くなり、GT20N135SRA の放熱設計はその分余裕を持つことが可能となります。(ピーク電力における過渡的な温度上昇を加味した場合、この温度差は更に大きくなります。)

表 3.1 GT20N135SRA と GT40RR21 の飽和熱抵抗比較

製品名	飽和熱抵抗 $R_{th(j-c)}$ max.
GT20N135SRA	$0.48^{\circ}\text{C}/\text{W}$
GT40RR21	$0.65^{\circ}\text{C}/\text{W}$

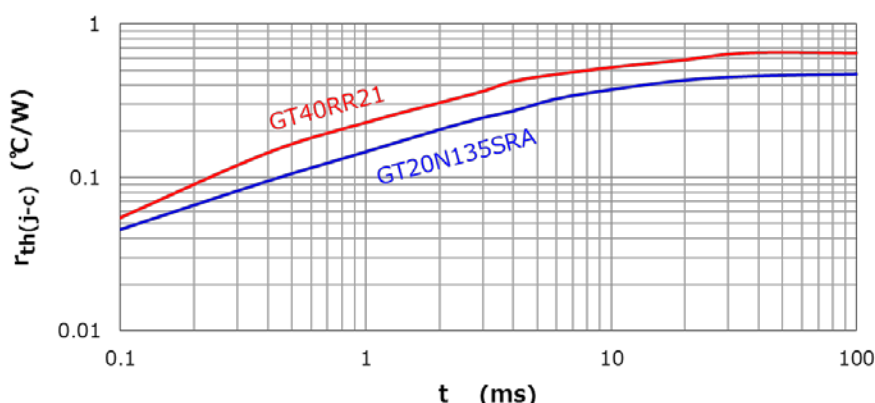


図 3.4 GT20N135SRA と GT40RR21 の過渡熱抵抗特性比較

3.4. ボディーダイオードの順方向特性改善

GT20N135SRA に採用している RC-IGBT の模擬図を図 3.5 に示します。RC-IGBT は、トランスペアレント P コレクター層の中に N 層を設けボディーダイオード層を形成します。ボディーダイオードの順方向性能は、コレクター電極の N 層の配置、面積などにより大きく変化します。

GT20N135SRA はこの N 層の設計を最適化することでダイオード順方向電圧降下 V_F 特性の低減を実現しましたので、図 3.6 に示すように GT40RR21 と比較して大幅な低 V_F 化を達成しています。(0.5 V 改善@ $I_F=20\text{ A}$)

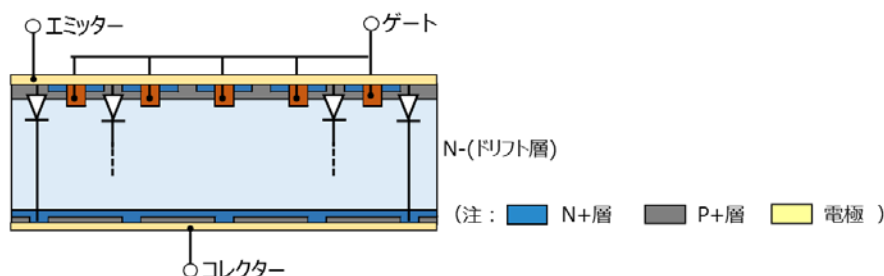


図 3.5 RC-IGBT の構造図とボディーダイオード

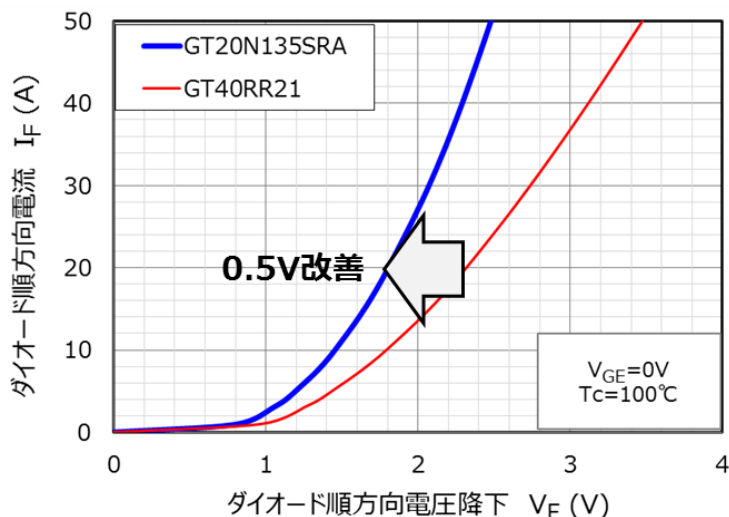


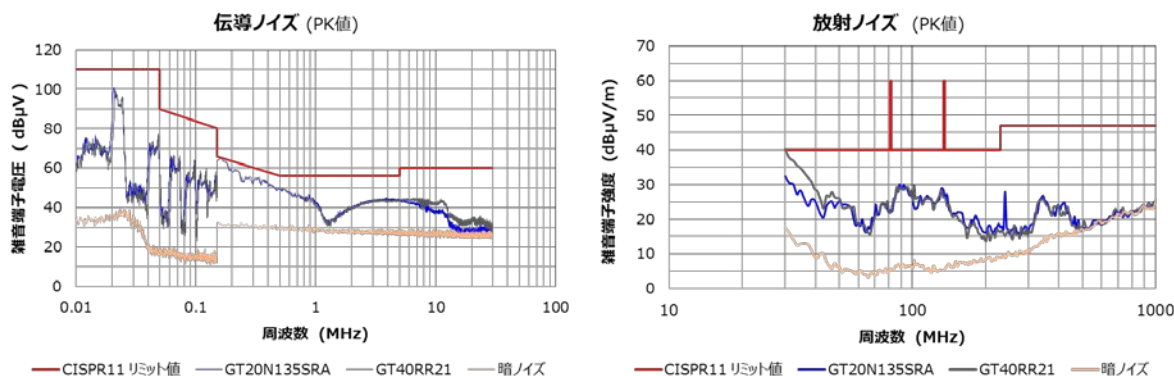
図 3.6 GT20N135SRA と GT40RR21 のボディダイオード順方向特性比較

3.5. 放射ノイズの改善

EMC (Electro-Magnetic Compatibility : 電磁適合性) に関して各国で規制を行っておりますが、その規格の中心を成しているのは国際無線障害特別委員会 CISPR 規格 (通称シスプル : Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques) です。EMC は、ノイズを発生する EMI (Electro-Magnetic Interference : 電磁妨害) とノイズ耐性 (進入を妨げる) の EMS (Electro-Magnetic Susceptibility) に分類され、EMI は電源ラインやランドパターンを通して発生する伝導ノイズと空中に電波となって伝わる放射ノイズがあります。

図 3.7 は、市販されている AC220V 用の卓上型 IH 調理器に GT20N135SRA と GT40RR21 を搭載して伝導および放射ノイズを測定した結果を示しています。伝導ノイズは、IH 調理器の PCB やフィルター設計などにより決定される要素が多く、IGBT による差異はほとんどありませんが、放射ノイズは 30MHz で約 10dB の差が発生しており、GT20N135SRA が規格リミット値に対してマージンが大きいことが判ります。放射ノイズは、スイッチング用 IGBT のターンオフ動作の違いが差異の一因となることがあります。放射ノイズが大きい場合、大きなゲート抵抗 RG を挿入し IGBT のターンオフスピードを遅くして対策することが一般的ですが、スピードを遅くすることで IGBT のターンオフ損失は大きくなります。

同一ゲートドライブ条件において、GT20N135SRA は、GT40RR21 より放射ノイズが小さく、IGBT 損失と機器の EMI 低減の相反する性能が優位となっており、機器の設計エンジニアの負担を軽減することが可能です。



(a) 伝導ノイズ測定結果

(b) 放射ノイズ測定結果

図 3.7 GT20N135SRA と GT40RR21 のノイズ比較 (卓上型 IH 調理器)

4. まとめ

AC220 V 用 IH 炊飯器、IH 調理器およびインバーター電子レンジなどの電圧共振用スイッチング素子として開発された東芝 RC-IGBT GT20N135SRA は、①コレクター飽和電流抑制による電源起動時の短絡電流の制限 ②順方向安全動作領域の拡大 ③低熱抵抗化による温度上昇の抑制 ④ボディダイオードの順方向特性改善 ⑤放射ノイズの改善 と従来品と比較し、さまざまな性能を改善しております。

今回の AC220V 電圧共振用 RC-IGBT GT20N135SRA に続き、その大電流製品および AC100 V 用に 1100V 耐圧の電圧共振用 RC-IGBT の開発、展開をしていく予定です。

製品取り扱い上のお願い

株式会社東芝およびその子会社ならびに関係会社を以下「当社」といいます。
本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステムを以下「本製品」といいます。

- 本製品に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。
- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体・ストレージ製品は一般に誤作動または故障する場合があります。本製品をご使用頂く場合は、本製品の誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことを願います。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独およびシステム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断してください。
- 本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器（ヘルスクエア除く）、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、発電関連機器などが含まれますが、本資料に個別に記載する用途は除きます。特定用途に使用された場合には、当社は一切の責任を負いません。なお、詳細は当社営業窓口まで、または当社 Web サイトのお問い合わせフォームからお問い合わせください。
- 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- 本製品を、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用することはできません。
- 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をしておりません。
- 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事用途の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守し、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。
- 本製品の RoHS 適合性など、詳細につきましては製品個別に必ず当社営業窓口までお問い合わせください。本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は一切の責任を負いかねます。

東芝デバイス&ストレージ株式会社

<https://toshiba.semicon-storage.com/jp/>