

MOSFET SPICE モデルグレード

概要

当社が提供している MOSFET SPICE モデルのグレードの紹介、及びそれらモデルによる計算結果とデータシートの特性カーブ比較を行った結果を示します。本アプリケーションノートを参考に、シミュレーション環境や目的に合わせ最適なモデルグレードをお選びいただきますようお願いします。

目次

概要	1
1. はじめに	4
2. モデル名とモデルグレードの定義	4
2.1. モデル名	4
2.2. 暗号化	4
2.3. モデルグレード G0、G1、G2 の定義	5
3. フィッティング精度(RMS エラー)	6
4. U-MOS シリーズの G0 と G2 モデルのフィッティング比較例	7
4.1 I_D - V_{DS} カーブ (TPH5R60APL)	7
4.2 寄生容量カーブ (TPH5R60APL)	8
4.3 スイッチング解析 (TPH1R306PL)	9
5. DTMOS シリーズの G0 と G2 モデルのフィッティング比較例	11
5.1 I_D - V_{DS} カーブ(TK040N65Z)	11
5.2 寄生容量カーブ(TK040N65Z)	12
5.3 スイッチング解析(TK040N65Z)	13
製品取り扱い上のお願い	15

図目次

図 3-1 Web 公開デバイスモデル作成時に使用している RMS エラー式	6
図 4-1 G0、G2 モデルのシミュレーションとデータシートの I_D - V_{DS} 特性カーブ	7
図 4-2 G0、G2 モデルのシミュレーションとデータシートの容量特性カーブ	8
図 4-3 抵抗負荷スイッチング回路.....	9
図 4-4 抵抗負荷回路スイッチング波形のシミュレーションと実測比較	10
図 5-1 G0、G2 モデルのシミュレーションとデータシート I_D - V_{DS} カーブ	11
図 5-2 G0、G2 モデルのシミュレーションとデータシート容量カーブ	12
図 5-3 インダクタンス負荷スイッチング回路	13
図 5-4 インダクタンス負荷回路スイッチング波形のシミュレーションと実測比較	14

表目次

表 2-1 モデルグレードと Simulator に対する暗号化の有無	4
表 2-2 グレードと特性カーブの再現性一覧.....	5

1. はじめに

近年、回路設計や開発の時間短縮のためにシミュレーションが重要となってきました。シミュレーションには、電気回路シミュレーション、熱シミュレーション、機械応力シミュレーションなどがあり、電気回路シミュレーションにおいて当社では PSpice® と LTspice® 用 SPICE モデルの Web 上での公開 (<https://toshiba.semicon-storage.com/jp/design-support/simulation.html>) を進めています。

実際に行う回路評価では回路内部の電圧・電流や各種特性を必ずしも把握できないこともありますが、SPICE モデルを使用した電気回路シミュレーションであれば、測定機器などの影響を受けることなく理想的な動作を検証することができます。そのためには SPICE モデルの精度が重要になります。

当社では、MOSFET に対して、計算速度が短くファンクションチェックに適した G0 モデル、寄生容量の電圧依存特性の再現性を高め高精度なスイッチングシミュレーションを可能にした G1 モデルと G2 モデルを準備しており、G2 モデルでは更に I_D - V_{DS} カーブの高電流領域特性と合わせて再現性を高め、更に高精度な実測に近いシミュレーションを可能にしています。

本アプリケーションノートでは、G0、G1、G2 モデルそれぞれの定義、及び低耐圧 MOSFET (U-MOS シリーズ) 及び中高耐圧 MOSFET (DTMOS シリーズ) を用いて実際のデバイスとシミュレーションモデルの挙動の比較を紹介します。

2. モデル名とモデルグレードの定義

2.1. モデル名

当社が提供している MOSFET SPICE モデルはグレード名を表示し提供しています。ファイル名の構成を下記に示します。各モデルのグレードは製品名の後ろに記載しています。

TPH1R204PL_G2 _01_ PSpice _rev1 _ enc . lib

製品名 グレード名 追番 Simulator 名 モデルファイルの管理番号 暗号化 拡張子

2.2. 暗号化

当社提供の SPICE モデルには各 Simulator に合わせた暗号化を行っているものがあり、モデル名に enc がついているものが暗号化モデルになります。モデル名中の Simulator 名と暗号化の有無を確認し使用ください。

表 2-1 にモデルグレードと Simulator に対する暗号化の有無を示します。

表 2-1 モデルグレードと Simulator に対する暗号化の有無

SPICE Model グレード	PSpice	LTspice	SIMetrix
G0	非暗号化	暗号化	暗号化
G1	暗号化	暗号化	暗号化
G2	暗号化	暗号化	暗号化

2.3. モデルグレード G0、G1、G2 の定義

表 2-2 にグレードに対する特性カーブの再現性を示します。表中の括弧内は現在モデル作成時に基準としている RMS エラー (Root Mean Square: 2 乗平均平方根) を示しています。グレードがあがるにつれ特性カーブのフィッティング精度は高く、より高精度なシミュレーションが可能になります。一方で収束性や計算時間とのトレードオフになるためシミュレーション環境や目的に合わせ最適なモデルグレードをお選びいただきますようお願いいたします。

表 2-2 グレードと特性カーブの再現性一覧

SPICE Model グレード	I_D-V_{DS}	$C_{rss}-V_{DS}$	$C_{oss}-V_{DS}$	$C_{iss}-V_{DS}$
G0 (RMS エラー-クライテリア)	○ (15%以下)	× (不問)	× (不問)	× (不問)
G1 (RMS エラー-クライテリア)	○ (15%以下)	○ (2%以下)	○ (2%以下)	○ (2%以下)
G2 (RMS エラー-クライテリア)	○ (5%以下)	○ (2%以下)	○ (2%以下)	○ (2%以下)

- ① G0
BSIM3 をベースとした標準的なデバイスモデルであり、計算速度が短くファンクションチェックに適しているモデルです。
- ② G1
G0 モデルに対し、寄生容量の電圧依存特性の再現性を高め、より実測に近い高精度なスイッチングシミュレーションが可能なモデルです。
- ③ G2
G0 モデルに対し、 I_D-V_{DS} カーブの高電流領域特性と寄生容量の電圧依存特性の再現性を高め、より実測に近い高精度なスイッチングシミュレーションが可能なモデルです。

3. フィッティング精度(RMS エラー)

SPICE モデルのフィッティング精度は RMS エラーにより数値化することができます。MOSFET に関しては、作成した SPICE モデルの精度を判定する際にこの RMS エラーを使用しており、実測との差を数値化しクライアントエリアを設けています。当社が提供している MOSFET SPICE モデルを作成する際に用いている RMS エラーの計算式を図 3-1 に示します。

4 章と 5 章に低耐圧 MOSFET (U-MOS シリーズ) 及び中高耐圧 MOSFET (DTMOS シリーズ) での実例を示します。

$$\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (sim_j - meas_j)^2}{\sum_{j=1}^N (meas_j)^2 / N}} / N$$

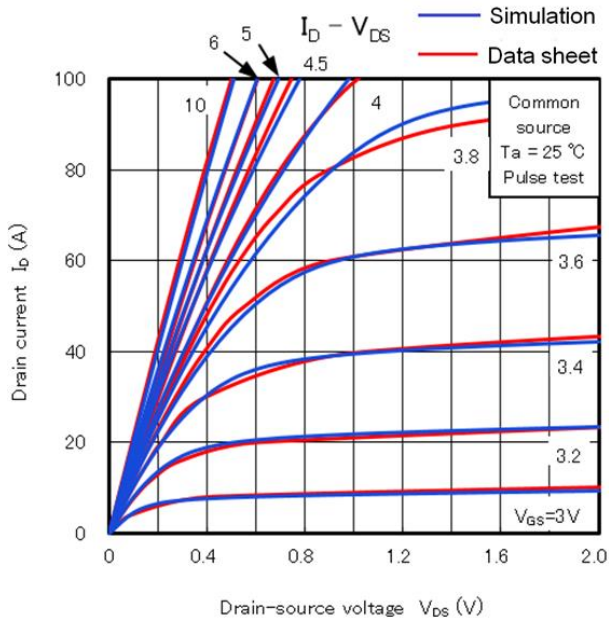
sim_j : シミュレーション値
 $meas_j$: 測定値

図 3-1 Web 公開デバイスモデル作成時に使用している RMS エラー式

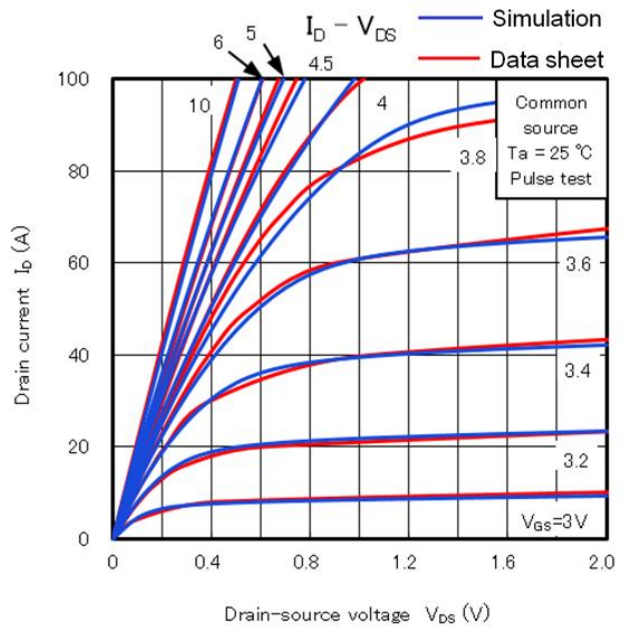
4. U-MOS シリーズの G0 と G2 モデルのフィッティング比較例

4.1 I_D - V_{DS} カーブ (TPH5R60APL)

U-MOS シリーズは 12V~300V 耐圧のトレンチゲート構造を有した MOSFET シリーズになります。図 4-1 に I_D - V_{DS} のフィッティングカーブ例を示します。低 V_{GS} から高 V_{GS} まで I_D の傾きがシミュレーションで表現できており、G0 モデル、G2 モデルともに RMS エラーが 2.43% と良好なフィッティング精度が得られています。



G0 モデル (RMS エラー: 2.43%)



G2 モデル (RMS エラー: 2.43%)

図 4-1 G0、G2 モデルのシミュレーションとデータシートの I_D - V_{DS} 特性カーブ

4.2 寄生容量カーブ (TPH5R60APL)

図 4.2 に C_{iss} 、 C_{oss} 、 C_{rss} の容量カーブを示します。G0 モデルは BSIM3 をベースに構成されているため、容量特性の非線形性を表現できず、 C_{rss} と C_{oss} のシミュレーションカーブはデータシートの特徴カーブと大きく乖離しています。それに対し、G2 モデルはデータシートの特徴カーブを十分に表現可能となっています。

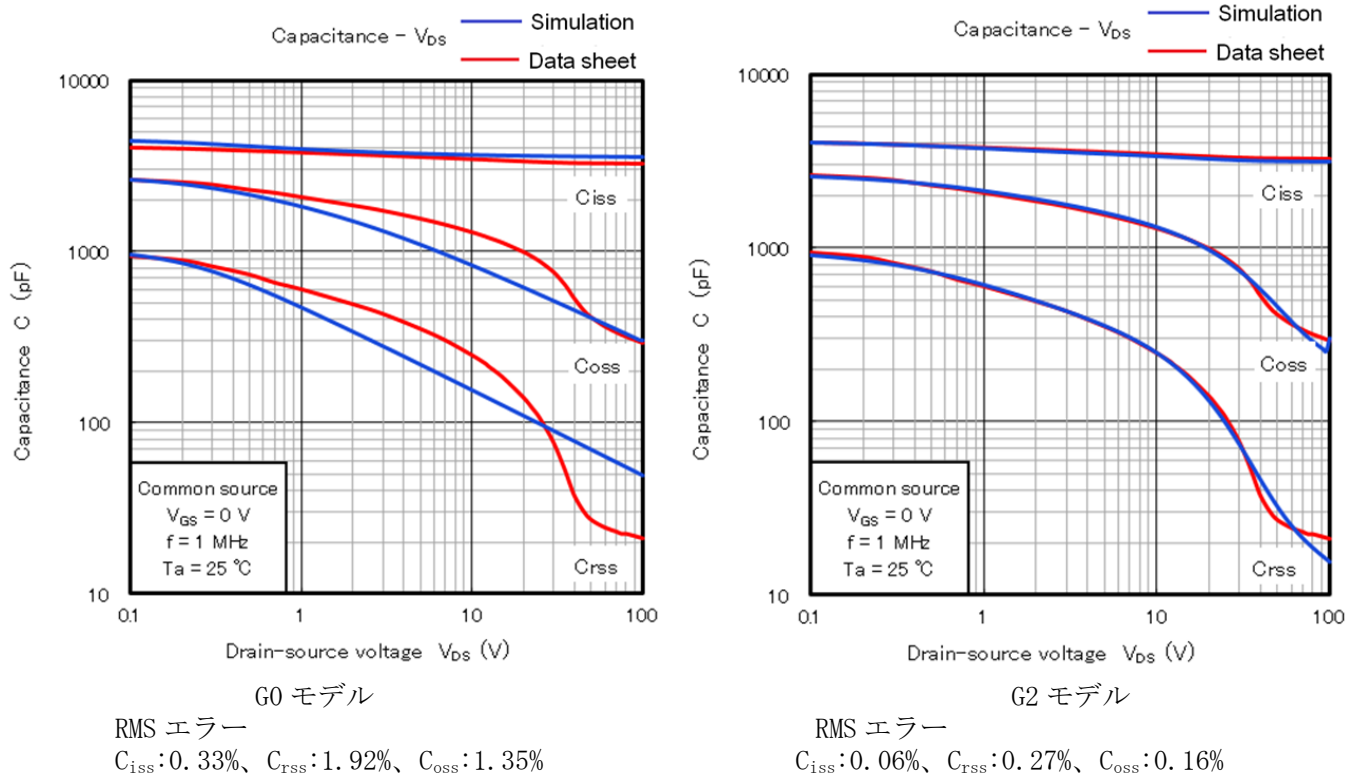


図 4-2 G0、G2 モデルのシミュレーションとデータシートの容量特性カーブ

4.3 スイッチング解析 (TPH1R306PL)

次にスイッチング解析について述べます。今回の解析は当社作製の抵抗負荷ボードを用いて解析を行いました。この試験ボードの簡易回路モデルを図 4-3 に示します。図 4-4 に本回路モデルのシミュレーション結果と実測の各電圧及び電流波形比較を示します。G0 モデルは、4.2 章で示したように、容量特性に関する非線形性表現が不十分で本来の容量値を表現できないため、急峻に変化する電流や電圧を抑制できず、その結果ドレイン・ソース間電圧 (V_{DS}) でリングングが発生しています。それに対して、G2 モデルでは、ドレイン電圧の上昇過程においても実際の容量値とほぼ同様の変化が実現できているため、実測波形と同様に V_{DS} が定常状態に移行する過程を十分に表現できています。

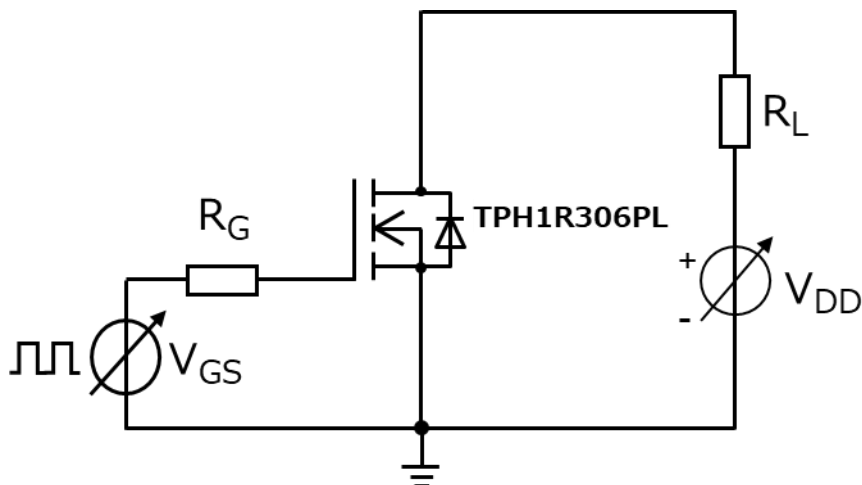


図 4-3 抵抗負荷スイッチング回路

測定条件: 抵抗負荷回路、
 $V_{DD}=30V$ 、 $V_{GS}=0/10V$ 、 $I_D=60A$ 、 $R_L=0.5\Omega$ 、 $T_a=室温(実測) / 27^\circ C(シミュレーション)$

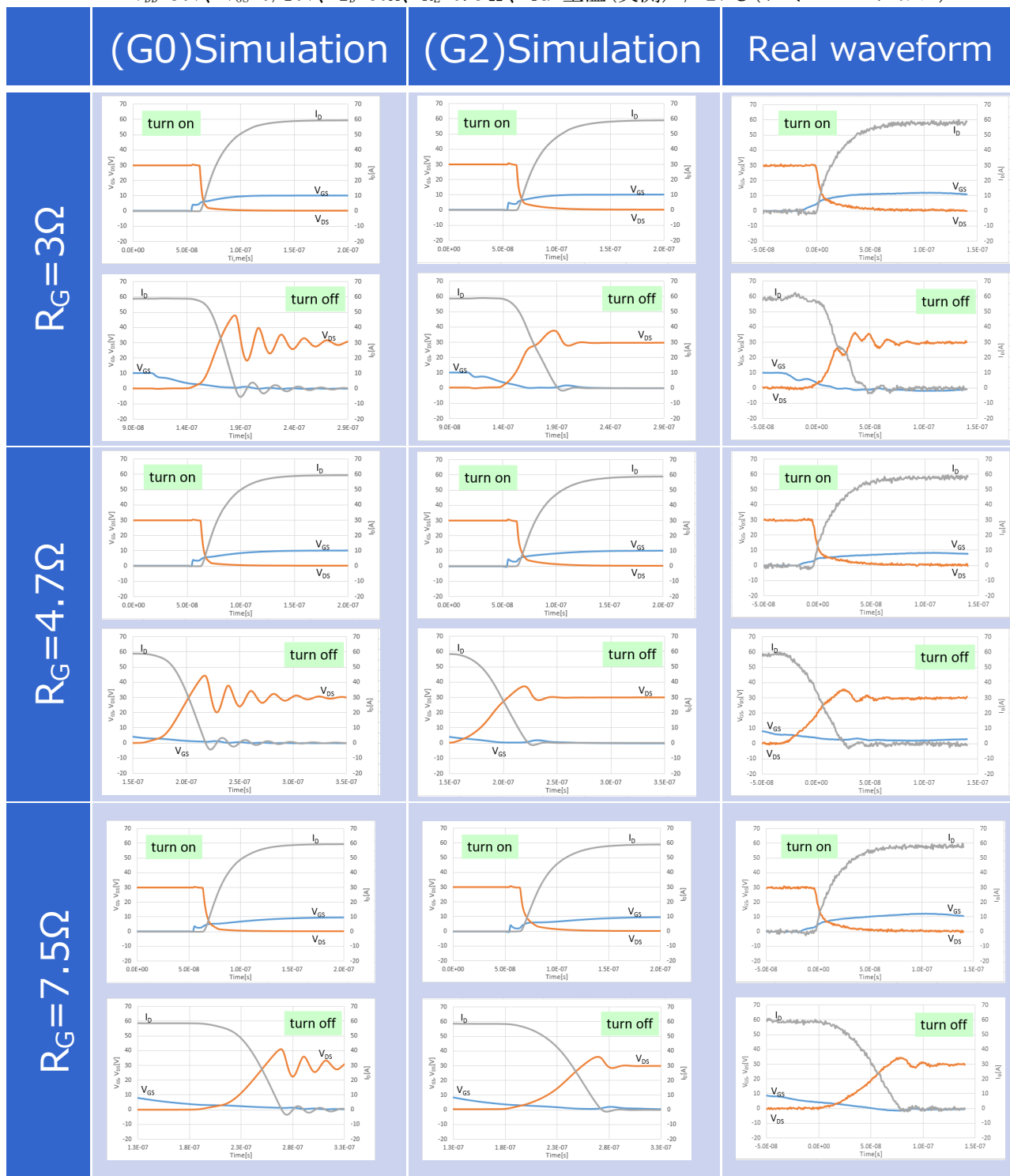


図 4-4 抵抗負荷回路スイッチング波形のシミュレーションと実測比較

5. DTMOS シリーズの G0 と G2 モデルのフィッティング比較例

5.1 I_D - V_{DS} カーブ(TK040N65Z)

DTMOS シリーズは 600V~800V 耐圧のスーパージャンクション (SJ) 構造を有した MOSFET シリーズになります。図 5-1 に DTMOSVI シリーズ TK040N65Z の I_D - V_{DS} のフィッティングカーブ例を示します。DTMOS シリーズの G2 モデルは I_D - V_{DS} の高電流領域の飽和特性の再現性が向上しています。この結果、G0 モデルの RMS エラーは 4.72% であるのに対し、G2 モデルは 2.18% と良好なフィッティング精度が得られています。

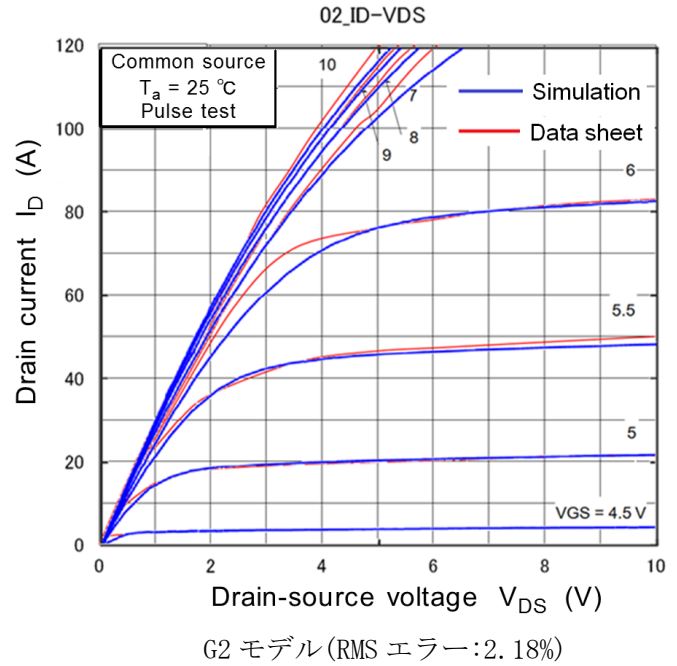
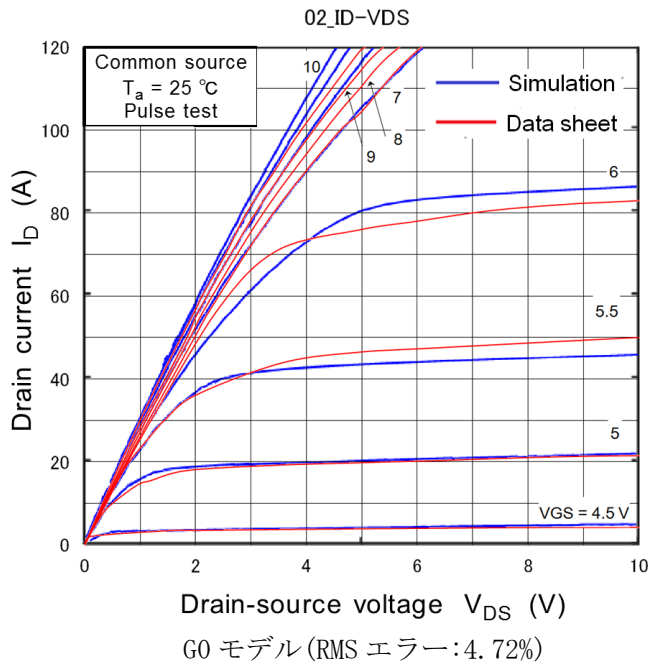
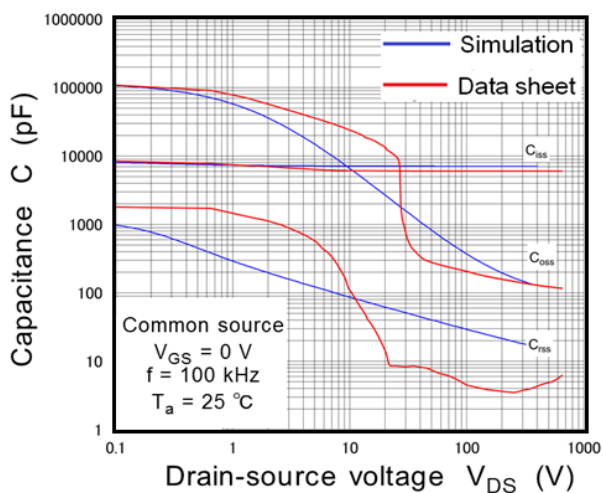


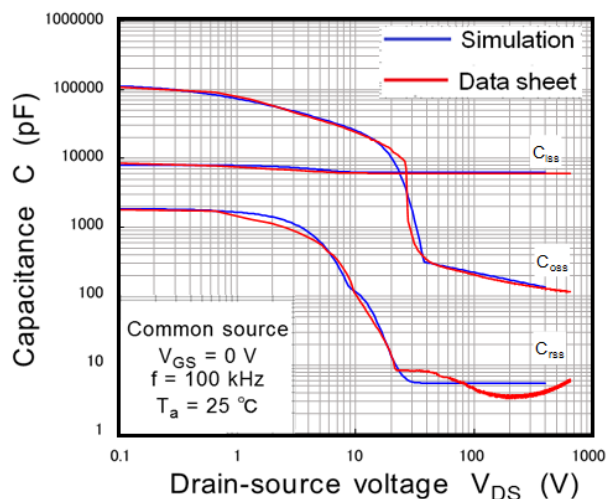
図 5-1 G0、G2 モデルのシミュレーションとデータシート I_D - V_{DS} カーブ

5.2 寄生容量カーブ(TK040N65Z)

図 5-2 に C_{iss} 、 C_{oss} 、 C_{rss} の容量カーブを示します。DTMOS シリーズはスーパージャンクション(SJ)構造を有しているため V_{DS} に対する C_{rss} 、 C_{oss} カーブは、ある電圧値から容量値が急峻に小さくなります。G0 モデルは BSIM3 をベースに構成されているため、この急峻に下がる容量特性の非線形性を表現できず、 C_{rss} と C_{oss} のシミュレーションカーブはデータシートの特性カーブと大きく乖離しています。それに対し、G2 モデルでは RMS エラー2%以下で容量カーブを表現することができています。



G0 モデル
RMS エラー
 C_{iss} :0.53%、 C_{rss} :6.25%、 C_{oss} :3.96%



G2 モデル
RMS エラー
 C_{iss} :0.22%、 C_{rss} :0.914%、 C_{oss} :0.97%

図 5-2 G0、G2 モデルのシミュレーションとデータシート容量カーブ

5.3 スイッチング解析(TK040N65Z)

次にスイッチング解析について述べます。今回、当社作製のインダクタンス負荷スイッチングボードを用いて解析を行いました。この試験ボードの簡易回路モデルを図 5-3 に示します。図 5-4 に本回路モデルのシミュレーション結果と実測の各電圧及び電流波形比較を示します。G0 モデルは、5.2 章で示したように、容量特性に関する非線形性表現が不十分で本来の容量値を表現できないため、実測で見られるゲート電圧の発振は見られません。また、ターンオフ損失(E_{off})についても実測とは合わず大きい値です。それに対して、G2 モデルは R_G 増加に対してゲート発振電圧が小さくなることも表現できており、また E_{off} も実測に対し十数%以内の差であり、G2 モデルは動特性の検証も可能なモデルであるといえます。

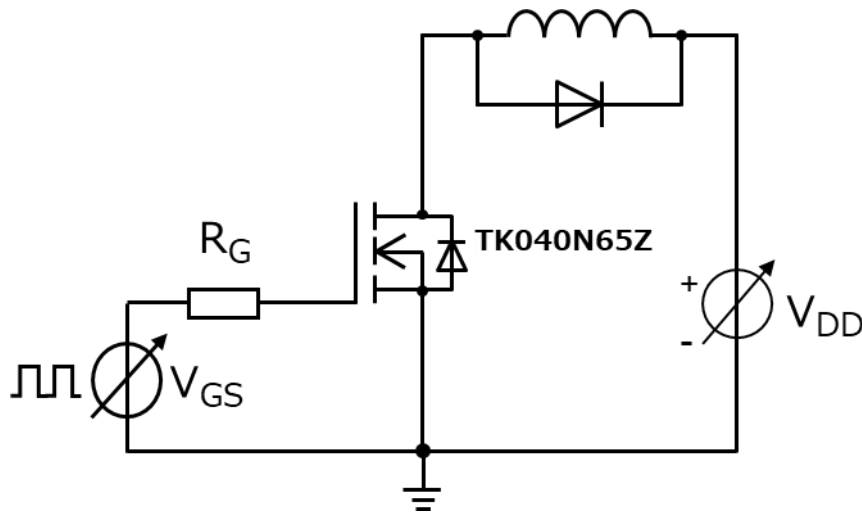


図 5-3 インダクタンス負荷スイッチング回路

測定条件: インダクタンス負荷回路、
 $V_{DD}=400V$ 、 $V_{GS}=0/10V$ 、 $I_D=10A$ 、 $T_a=室温(実測) / 27^{\circ}C(シミュレーション)$

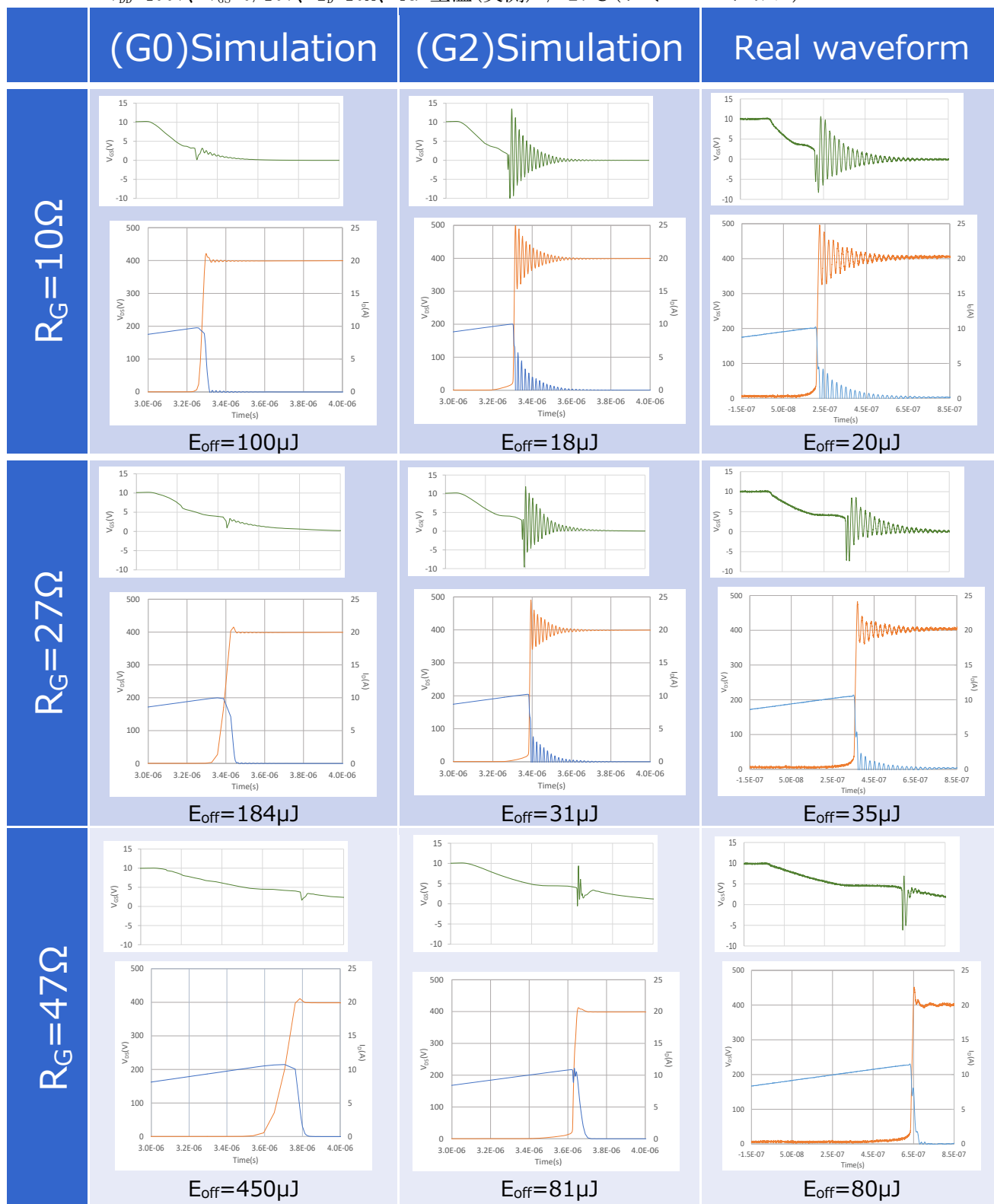


図 5-4 インダクタンス負荷回路スイッチング波形のシミュレーションと実測比較

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お願いします。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（ヘルスケア除く）、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/>