

# ゲート電荷を使用した、パワーMOSFET および IGBT のゲート駆動回路設計

## About this document

MOSFET または IGBT の入力特性に精通していない設計者は、データシートに記載されているゲート-ソース間容量または入力容量に基づいて部品の値を決定することから、駆動回路の設計を開始します。ただ通常は、ゲート-ソース間容量に基づいた RC 値では、非常に不十分なゲート駆動になってしまします。

ゲート-ソース間容量は重要な値ですが、ゲート-ドレイン間容量は、電圧の関数として影響を受ける非線形静電容量であるため、実際にはさらに重要であり、より扱いが困難です。ゲート-ソース間容量も電圧関数として影響を受けますが、影響としてははるかに低いです。

## 対象となるトピック

- 背景
- テスト方法
- ゲート電荷曲線の解釈方法
- 切り替え時間の見積り方法
- 異なるデバイスの比較方法

## Table of contents

About this document .....	1
Table of contents .....	1
1 MOS ゲートトランジスタの入力動作.....	2
2 テスト回路 .....	3
3 ゲート電荷曲線 .....	6
4 異なる製品を比較する際の注意 .....	8
改訂履歴 .....	10

## MOS ゲートトランジスタの入力動作

## 1 MOS ゲートトランジスタの入力動作

MOSFET または IGBT の入力特性に精通していない設計者は、データシートに記載されているゲート-ソース間容量または入力容量に基づいて部品の値を決定することから、駆動回路の設計を開始します。ただ通常は、ゲート-ソース間容量に基づいた RC 値では、非常に不十分なゲート駆動になってしまいま

ゲート-ソース間の容量は重要な値ですが、ゲート-ドレイン間容量は電圧の関数として影響を受ける非線形静電容量であるため、実際はさらに重要であり、より扱いが困難です。ゲート-ソース間容量も電圧関数の影響を受けますが、影響ははるかに低いです。このゲート-ドレイン間への容量関数は真空管アンプに見られるものと似ています。

ゲート-ドレイン間の静電容量効果は、電子デバイスの入力と出力間のフィードバック経路が電極間の容量によって提供される現象である「ミラー」効果に似ています。これはデバイスの総入力アドミタンスに影響を及ぼし、総動的入力容量は、一般的に静的電極容量の合計よりも大きくなります。入力アドミタンスに対するプレートインピーダンスと電圧ゲインの影響の現象は John M. Miller によって真空管三極管增幅回路で最初に研究されました。基本的に、グリッド-プレート間(ゲート-ドレイン間)の静電容量が無視できない高周波では、回路がオープンではありませんが、電圧ゲインの関数である静電容量が含まれます。「ミラー」効果を解決することは、多くのことが知られている真空管を使用した場合でも、正確に簡単なプロセスではありませんが、MOSFET ではさらに困難です。実際には、ゲート-ドレイン間容量は、ゲート-ソース間容量よりも静的で小さいものの、ゲート-ソース間容量の 20 倍以上の電圧変動を頻繁に経験します。つまり、ゲート-ドレインまたは「ミラー」容量は、通常では入力容量よりも実際の電荷を多く必要とします。

設計者が簡単に使用できる方法で、ゲート-ソース間容量とゲート-ドレイン間容量の両方を考慮するために、International Rectifier は、IGBT および HEXFET POWER MOSFET の「ゲート電荷」仕様を提供します。これは、駆動回路の要件を計算するために使用できます。ゲートを所定の量だけスイッチングするため、または完全なスイッチングを実現するために、ゲートに供給しなければならない電荷を、ゲート電荷と定義します。

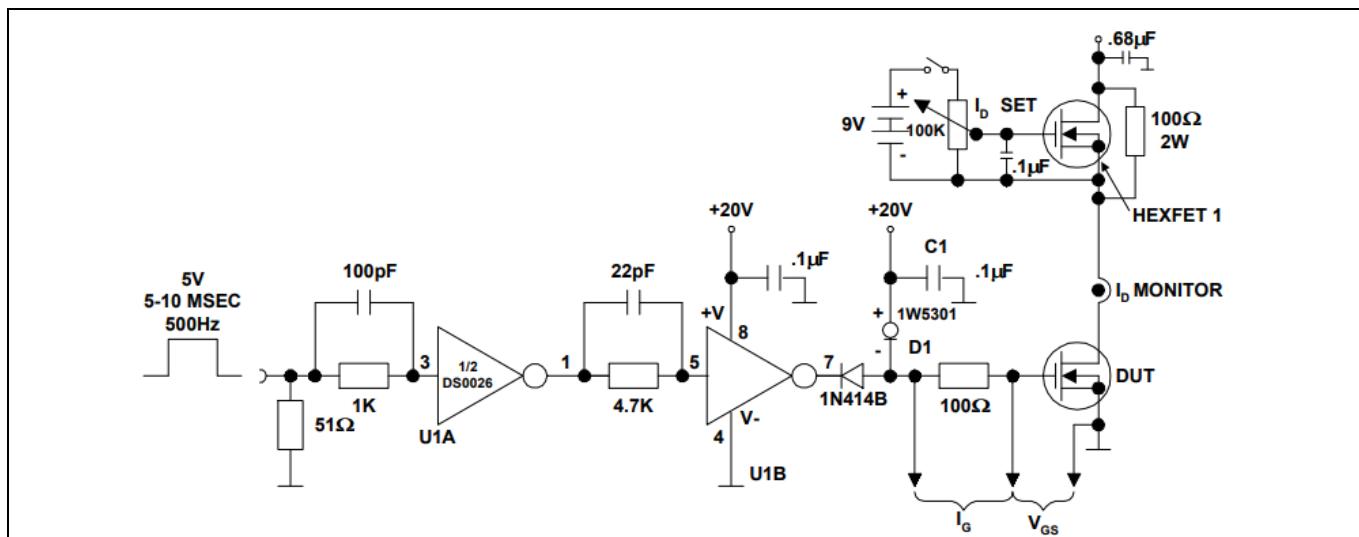


Figure 1 HEXFET POWER MOSFET ゲート電荷回路

## 2 テスト回路

ゲート電荷の測定に使用できる典型的なテスト回路を [Figure 1](#) に示します。この回路では  $0.1 \mu\text{F}$  のコンデンサ C1 からレギュレータダイオード D1 を介して、ほぼ一定の電流が被試験デバイスのゲートに供給されます。ドレイン回路の定電流は、HEXFET POWER MOSFET 1 のゲート電圧を設定することで設定されるため、ゲートで消費される電荷そのものの測定値は、ソースからドレインへの経路の特定の電流と電圧に関連します。

[Figure 2](#) に示されたテスト中のゲート-ソース間電圧のオシログラムは、ゲート電圧と時間の関係を示します。ゲートには定電流が供給されるため、水平時間スケールはゲートに提供される電荷に正比例します。したがって、適切な倍率を使用すると、このオシログラムはゲート電圧対電荷のプロットになります。2回目の電圧上昇のオシログラム上のポイントは、デバイスが完全にオンになっている場所を示します。最初の電圧上昇の間、ゲート-ソース間容量は充電され、平坦部分の間、ゲート-ドレイン間容量は充電されます。したがって、このオシログラムは、ゲート-ソースおよびゲート-ドレイン(ミラー)容量に必要な電荷を明確に区別します。2回目の電圧上昇で、両方の静電容量が所定の電圧と電流を切り替えるのに必要な範囲まで充電されます。このデータの解釈の詳細については、後で説明します。

[Figure 3](#) のグラフは、IRF130 のゲート電圧とゲート電荷をナノクーロン ( $\text{nC}$ ) で表したものです。2回目の電圧上昇はスイッチング動作が完了する点を示しますが、通常の設計の安全マージンでは、ゲートに印加される駆動電圧のレベルは、所定のドレイン電流と電圧をスイッチングするために必要なレベルよりも大きくなります。したがって、ゲートによって消費される総電荷は、実際には必要最小限よりも高くなりますが、必ずしも大幅に高くなるとは限りません。例えば、 $80\text{ V}$  で  $12\text{ A}$  を切り替えるのに必要なゲート電荷は  $15\text{ nC}$ (ポイント A) であり、対応するゲート電圧は約  $7\text{ V}$  です。印加された駆動電圧の振幅が  $10\text{ V}$ (つまり、 $3\text{ V}$  のマージン)の場合、実際に消費されるゲート電荷の合計は約  $20\text{ nC}$  になります(ポイント B)。グラフに示されているように、ドレイン回路で  $10\text{ V}$  または  $80\text{ V}$  に切り替えて、必要な電荷の差は比例よりもはるかに小さくなります。これは「ミラー」容量が電圧の非線形関数であり、電圧の増加とともに減少するためです。

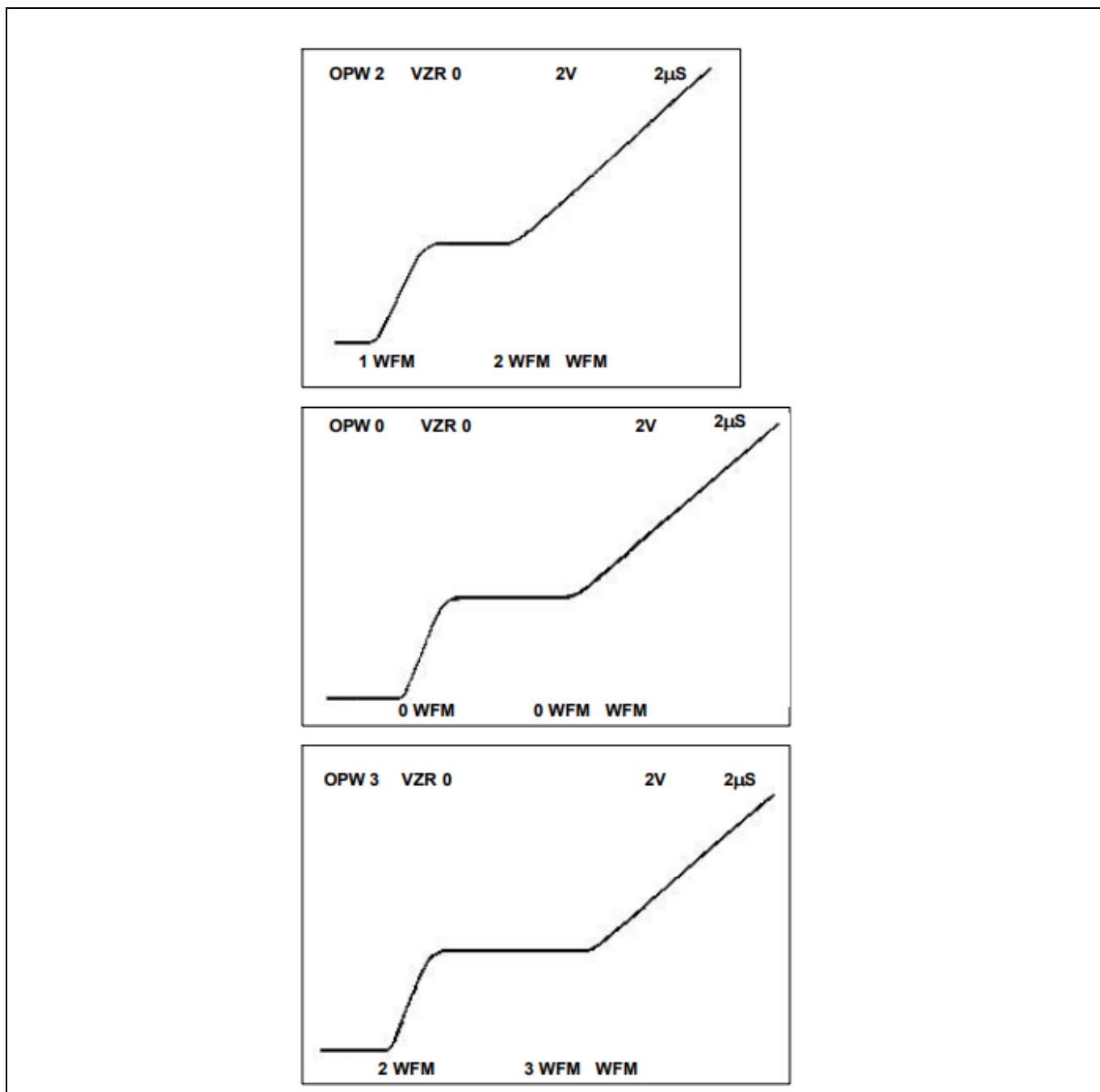


Figure 2 さまざまな値のドレイン電圧に対するゲート電圧の波形 (IRF130:  $I_G = 1.5 \text{ mA}$ ,  $I_D = 1\text{A}$ ,  $V_{DD} = 10, 40, 80 \text{ V}$ )

設計者にとってのゲート電荷データの重要性を以下に示します。前の例において、切り替えるには電荷が必要です。約 15 nC のゲートに 1.5 A が供給された場合、デバイスのドレイン電圧は 80 V、ドレイン電流は 12 A です。15nC のゲート電荷は、ゲート入力電流とスイッチング時間の積であるため、10ns でスイッチングされます。したがって、15mA がゲートに供給された場合、スイッチングは 1 us で発生します。これらの単純な計算により、設計者は、駆動回路から利用できる電流量と達成可能なスイッチング時間はトレードオフであることが分かります。ゲート電荷が分かれば、設計者は必要なスイッチング時間に適した駆動回路を開発できます。

100 ns のスイッチング時間を実現する必要がある 100kHz スイッチャーの典型的な実際の例を考えてみましょう。

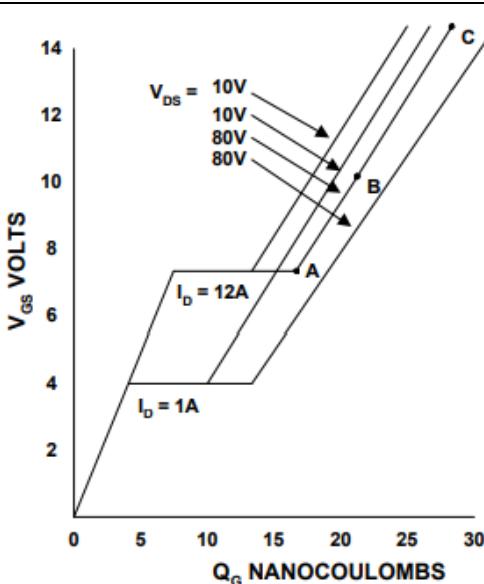


Figure 3 IRF130 のゲート電圧とゲート電荷

必要なゲート駆動電流は、単純にゲート電荷  $15 \times 10^{-9}$  を必要なスイッチング時間  $100 \times 10^{-9}$  で除算することで得られます。この計算から、設計者はさらに駆動回路のインピーダンスに到達できます。例えば、駆動回路が 14V をゲートに印加する場合、約 50 オームの駆動インピーダンスが必要になります。スイッチング期間の”フラット”な部分 (Figure 3) 全体で、ゲート電圧は約 7V で一定であることに注意してください。印加された 14V と 7V の違いは、駆動回路の抵抗を介して、必要な電流を駆動するために利用できるものです。ゲート電荷データにより、設計者は平均ゲート駆動電力をすばやく決定することも可能です。平均ゲート駆動電力  $P_{DRIVE}$  は  $Q_G V_G f$  です。上記の 100kHz のスイッチャーを例にとり、ゲート駆動電圧  $V_G$  を 14V と仮定すると、ゲート電荷の  $Q_G$  の適切な値は 27 nC です (Figure 3 のポイント C)。したがって、平均駆動電力は  $27 \times 10^{-9} \times 14 \times 10^5 = 0.038$  ワットです。スイッチング間隔中に流れる 150mA の駆動電流は比較的高く見える場合があります。ドレン電流で切り替えられる電力と比較すると、平均電力はわずか (0.004%) です。これは駆動電流が非常に短い時間でしか流れないと、平均電力が無視できるためです。したがって、MOSFET の実際の駆動電力は、ON 状態全体でスイッチング電流を維持しなければならないバイポーラ要件と比較してわずかです。もちろん、平均駆動電力は周波数が高くなると増加しますが、5MHz でも 1.9W だけです。

## ゲート電荷曲線

### 3 ゲート電荷曲線

**Figure 2** のゲート-ソース間電圧のオシログラムは、ゲート-ソース間容量に必要な電荷と、ゲート-ドレイン(「ミラー」容量)に必要な電荷とを明確に示します。添付の簡略化されたテスト回路と波形図(それぞれ **Figure 4** と **Figure 5**)に説明があります。時間  $t_0$  の前に、スイッチ S が閉じられます。テスト対象デバイス(DUT)は全回路電圧  $V_{DD}$  をサポートし、ゲート電圧とドレイン電流はゼロです。S は時間  $t_0$  で開かれます。ゲート-ソース間容量が充電を開始し、ゲート-ソース間電圧が上昇します。ゲートが閾値に達するまで、ドレインには電流が流れません。期間  $T_1$  から  $t_2$  の間、ゲート-ソース間容量は充電され続け、ゲート電圧は上昇を続け、ドレイン電流は比例して上昇します。実際のドレイン電流が利用可能なドレイン電流  $I_D$  に向かって増加している限り、フリーホール整流器は導通状態を維持し、整流器の両端の電圧は低く保たれ、DUT の両端の電圧は実質的に全回路電圧  $V_{DD}$  のままであります。したがって、ドレイン-ゲート間容量  $C_{AD}$  の上端は固定電圧のままであり、下端の電圧はゲート電圧とともに移動します。この期間に  $C_{AD}$  が消費する充電電流は小さく、事実上、 $C_{AD}$  は  $G_{CS}$  と比較して数値的に小さいため、無視できます。

時間  $t_2$  で、ドレイン電流は  $I_D$  に達し、フリーホール整流器は停止します。ドレインの電位は電源電圧  $V_{DD}$  に関連づけられなくなりました。ドレイン電流は、回路によって強制される値  $I_D$  で一定に保たれます。しかし、ドレイン電圧は低下し始めます。ゲート電圧は、DUT の固有伝達特性によって、ドレイン電流と密接に関係しており(動作が”アクティブ領域にある限り”)、”強制”ドレイン電流が一定であるため、ゲート電圧は一定に保たれます。したがって、当面は、ゲート電圧が一定に保たれるため、ゲート-ソース間容量によって、それ以上に電荷が消費されることはありません。つまり、駆動電流は全体として”ミラー”容量  $C_{AD}$  に方向転換し、駆動回路の電荷は”ミラー”容量の放電にのみ寄与します。

$t_2$  から  $t_3$  の間のドレイン電圧の変動は比較的大きく、総駆動電荷は通常、ゲート-ソース間容量  $G_{CS}$  よりも”ミラー”容量  $C_{AD}$  の方が高くなります。 $t_3$  で、ドレイン電圧は  $I_D \times R_{DS(ON)}$  に等しい値に低下し、DUT は動作の”アクティブ”領域から外れます。(バイポーラトランジスタで言えば”飽和”です。)

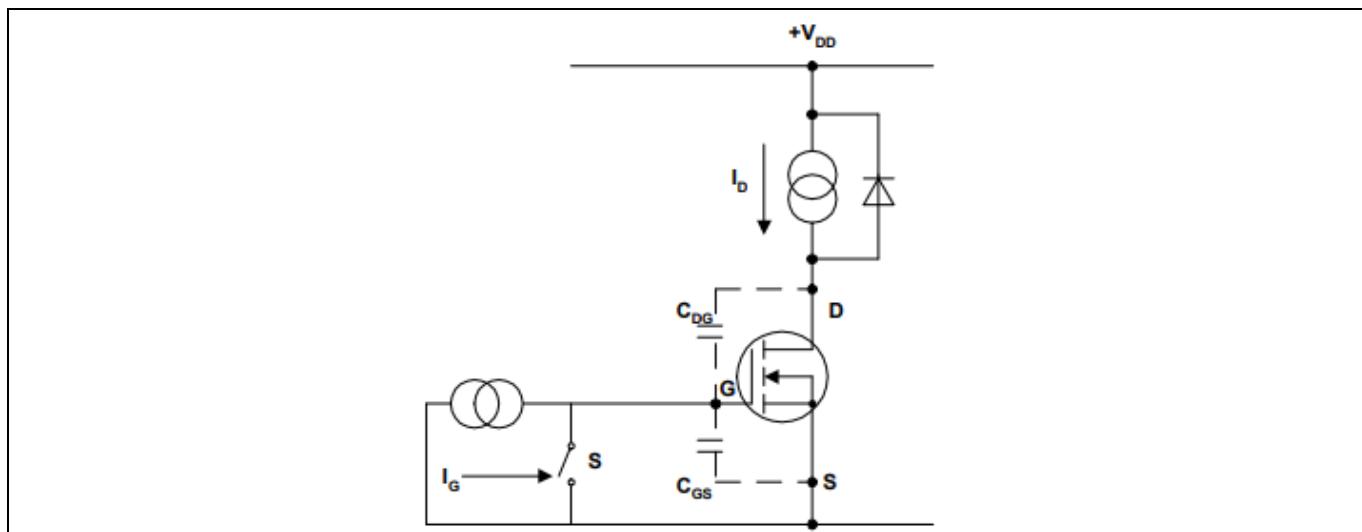


Figure 4 基本的なゲート充電テスト回路

ゲート電圧は、ドレイン電流の関連するデバイスの伝達特性によって制約されなくなり、自由に増加できます。これは、ゲート電圧がゲート回路電流源の電圧に等しくなる時間  $t_4$  まで行われます。電荷は電流と時間の積に等しく、電流はシーケンス全体で一定であるため、ゲート-ソース間電圧のオシログラムの時間スケールは、駆動回路によって供給される電荷に正比例します。したがって、期間  $t_0$  から  $t_1$  の長さは、ゲート-ソース間容量によって消費される電荷  $Q_{GS}$  を表し、期間  $t_2$  から  $t_3$  までの長さは、ゲート-ドレイン間または”ミラー”容量によって消費される電荷  $Q_{GD}$  を表します。時間  $t_3$  での総電荷は、与えられた電圧  $V_{DD}$  と電流  $I_D$  を切り替えるために必要な電荷です。時間  $t_3$  以降に消費される追加電荷は、”切り

## ゲート電荷曲線

替え”電荷を表すものではありません。印加されるゲート駆動電圧の振幅は、通常、スイッチングを達成するために必要な最小値よりも高いため(適切な設計手法の問題として)、駆動回路によって供給されるのは単に過剰電荷です。

## 異なる製品を比較する際の注意

### 4 異なる製品を比較する際の注意

製造業者は、時々、もっともらしいように見えても、実際には精査に耐えられない製品について、技術的な主張をすることがあります。その一例が、パワーMOSFET の入力容量に関するものです。”デバイス Y の入力キャパシタンスはデバイス X の入力キャパシタンスよりも小さく、ゆえに Y は X よりも高速なスイッチである”などの記述は頻繁に乱用されますが、それと同じように頻繁に誤りがあります。同一条件で比較されないことが多く、明らかに大きなチップは小さなチップよりも自己容量が大きく、より基本的なことに関して見過ごされがちです。このアプリケーションノートが示すように、「最終的に」重要なのは、総ゲート電荷です。電荷が少ないほど、所定のスイッチング時間を実現するために必要なゲート駆動電流は少なくなります。

仮想 MOSFET のブランド“X”と“Y”的一般的な比較を図に示します。デバイス X の入力容量が高くなっています。したがって、そのゲート電荷特性の初期勾配はデバイス Y の勾配よりも小さくなります。ただし、デバイス X の  $Q_{GS}$  はデバイス Y の  $Q_{GS}$  とほぼ同じです。これは、トランスクンダクタンスが高く、よって、所定のドレイン電流量に対しゲートに必要な電圧が少なくて済むためです ( $V_{GX}$  は  $V_{GY}$  よりも小さい)。デバイス X の消費量は、デバイス Y の消費量よりもはるかに少ないです。全体的な結果として、デバイス X、 $Q_x$  を切り替えるために必要な合計電荷は、デバイス Y、 $Q_y$  を切り替えるために必要な合計電荷よりも大幅に少なくなります。デバイス X と Y の比較が入力容量のより表面的な基準に基づいて行われていれば、Y は X よりも”優れている”と誤って結論付けられていたでしょう。別の考慮事項は、スイッチングに必要なエネルギーです。この例でも、デバイス X はデバイス Y を遥かに上回っています。エネルギーはゲート電荷とゲート電圧の積であり、”スイッチングポイント”をコーナーとする長方形の面積で表されます。(デバイス X の場合はポイント 1、デバイス Y の場合はポイント 2。) X が Y よりも大幅に少ないゲートエネルギーを必要とすることは明らかです。要約すると、表面的な比較に注意してください。実際にスイッチング性能に優れている MOSFET を決定する前に、すべての事実を確認してください。

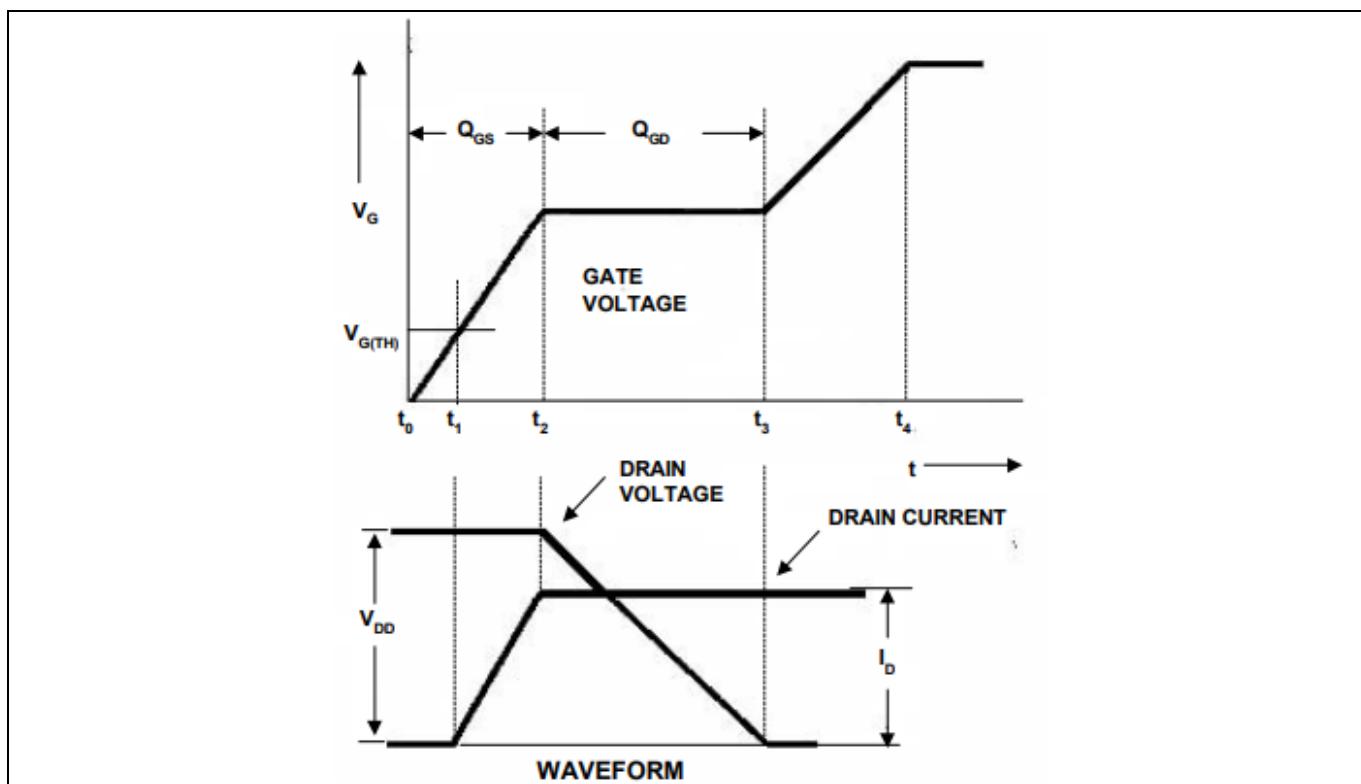


Figure 5 基本的なゲート電荷波形

異なる製品を比較する際の注意

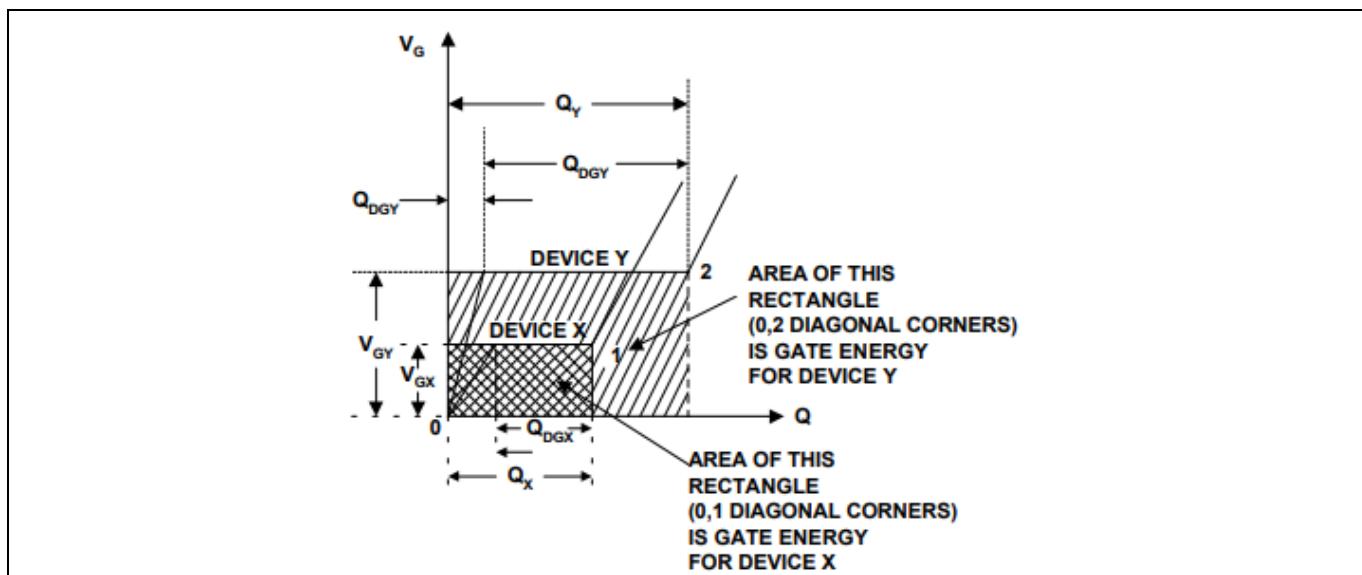


Figure 6 異なるデバイスタイプのゲート電荷特性の比較

### 関連トピック

- IGBT モジュールのゲート駆動に関する考慮事項
- IGBT のゲート駆動特性
- MOS ゲートトランジスタのゲート駆動要件
- 高電圧ゲート駆動 IC
- 三相ゲート駆動 IC
- バラスト用ゲート駆動 IC
- トランス-絶縁ゲート駆動

## 改訂履歴

Document version	Date of release	Description of changes
v.Int	2021-07-26	本版は英語版 Application Note AN-944 - Use Gate Charge to Design the Gate Drive Circuit for Power MOSFETs and IGBTs v.Int について、CYPRESS DEVELOPER COMMUNITY の参画者によって日本語に翻訳されたドキュメントです。

## Trademarks

All referenced product or service names and trademarks are the property of their respective owners.

**Edition 2021-07-26**

**Published by**

**Infineon Technologies AG**

**81726 Munich, Germany**

**© 2021 Infineon Technologies AG.  
All Rights Reserved.**

**Do you have a question about this  
document?**

**Email:** [erratum@infineon.com](mailto:erratum@infineon.com)

**Document reference**

**v.Int**

## 重要事項

本文書に記載された情報は、いかなる場合も、条件または特性の保証とみなされるものではありません（「品質の保証」）。本文に記された一切の事例、手引き、もしくは一般的価値、および／または本製品の用途に関する一切の情報に関し、インフィニオンテクノロジーズ（以下、「インフィニオン」）はここに、第三者の知的所有権の不侵害の保証を含むがこれに限らず、あらゆる種類の一切の保証および責任を否定いたします。

さらに、本文書に記載された一切の情報は、お客様の用途におけるお客様の製品およびインフィニオン製品の一切の使用に関し、本文書に記載された義務ならびに一切の関連する法的要件、規範、および基準をお客様が遵守することを条件としています。

本文書に含まれるデータは、技術的訓練を受けた従業員のみを対象としています。本製品の対象用途への適合性、およびこれら用途に関連して本文書に記載された製品情報の完全性についての評価は、お客様の技術部門の責任にて実施してください。

本製品、技術、納品条件、および価格についての詳しい情報は、インフィニオンの最寄りの営業所までお問い合わせください ([www.infineon.com](http://www.infineon.com))。

## 警告事項

技術的要件に伴い、製品には危険物質が含まれる可能性があります。当該種別の詳細については、インフィニオンの最寄りの営業所までお問い合わせください。

インフィニオンの正式代表者が署名した書面を通じ、インフィニオンによる明示の承認が存在する場合を除き、インフィニオンの製品は、当該製品の障害またはその使用に関する一切の結果が、合理的に人的傷害を招く恐れのある一切の用途に使用することはできないこと予めご了承ください。