

第4回栃木支所・群馬支所合同研究発表会

ETT-14-66

ETG-14-66

IGBTの高精度マクロモデルの研究

○香積 正基

安部文隆 KhatamiRamin 新井 薫子 轟俊一郎
戸塚拓也 青木均 小林 春夫(群馬大学)

群馬大学 工学部 電気電子工学科
情報通信システム第2研究室

- はじめに
- **IGBTの基本原理**
- **マクロモデルの作成**
- **モデルパラメータの
抽出・最適化とシミュレーション**
- **まとめ**

- はじめに
- IGBTの基本原理
- マクロモデルの作成
- モデルパラメータの
抽出・最適化とシミュレーション
- まとめ

研究背景

	バイポーラ トランジスタ	MOSFET	IGBT
高耐圧			
高速 スイッチング			

絶縁ゲートバイポーラトランジスタ
(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)は
高耐圧で高速スイッチング可能なため
近年の需要は高くなってきている

現在のシミュレーション環境

課題多

○実測の差が大きい

- ・n-層を流れるドリフト電流のモデル化不可
- ・DMOS出力抵抗が一定
- ・フリーホイールダイオードのシミュレーション不可 etc...

新しいシミュレーション環境

より高精度なシミュレーションを行えるマクロモデルを
SPICEの基本エレメントを組み合わせで開発

現在のシミュレーション環境

課題多

○実測の差が大きい

- ・n-層を流れるドリフト電流のモデル化不可
- ・DMOS出力抵抗が一定
- ・フリーホイールダイオードのシミュレーション不可 etc...

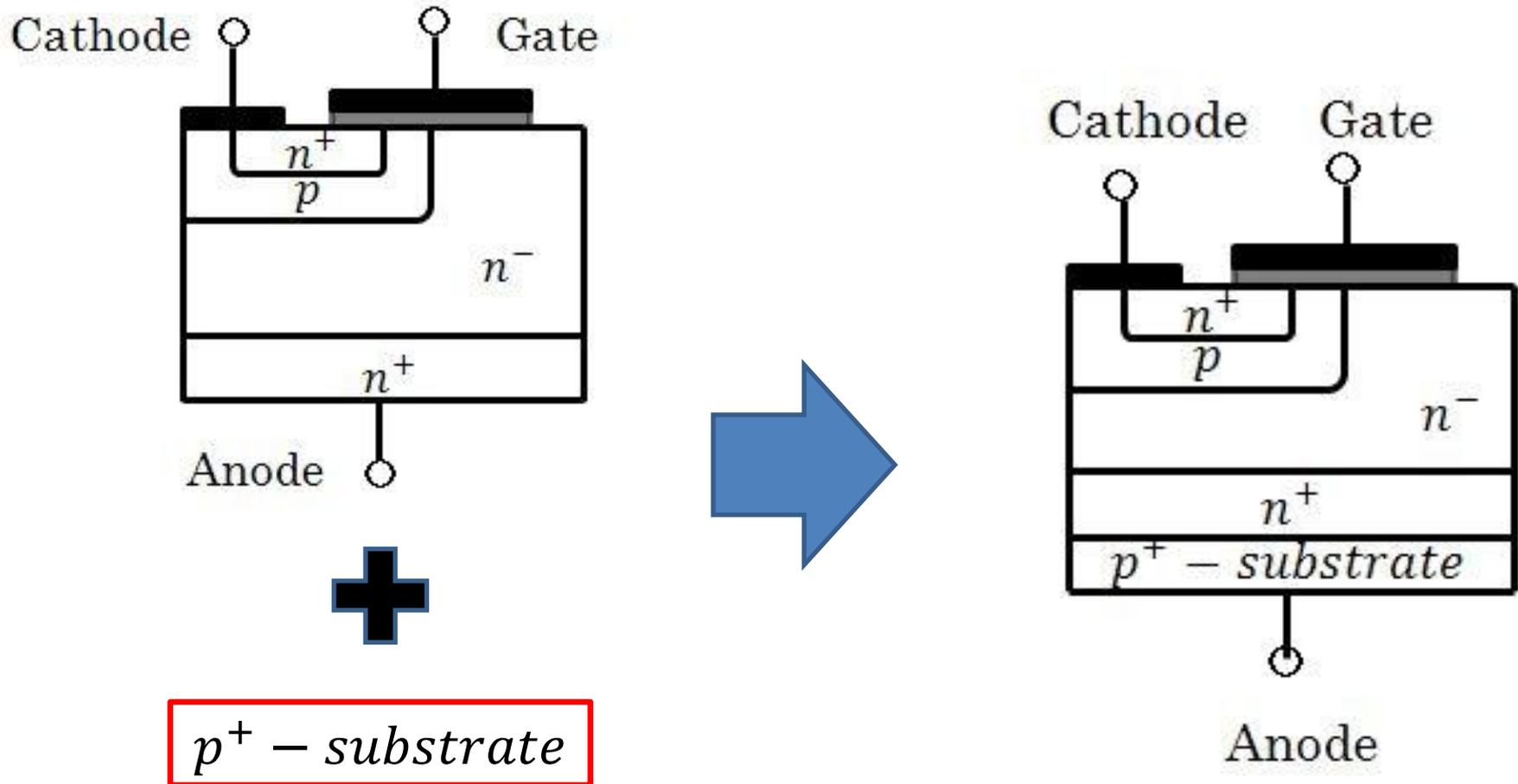
新しいシミュレーション環境

より高精度なシミュレーションを行えるマクロモデルを
SPICEの基本エレメントを組み合わせて開発

- ・IGBTのSPICEのソースコードを改造する必要なし
- ・多くのSPICE系シミュレータで使用可能

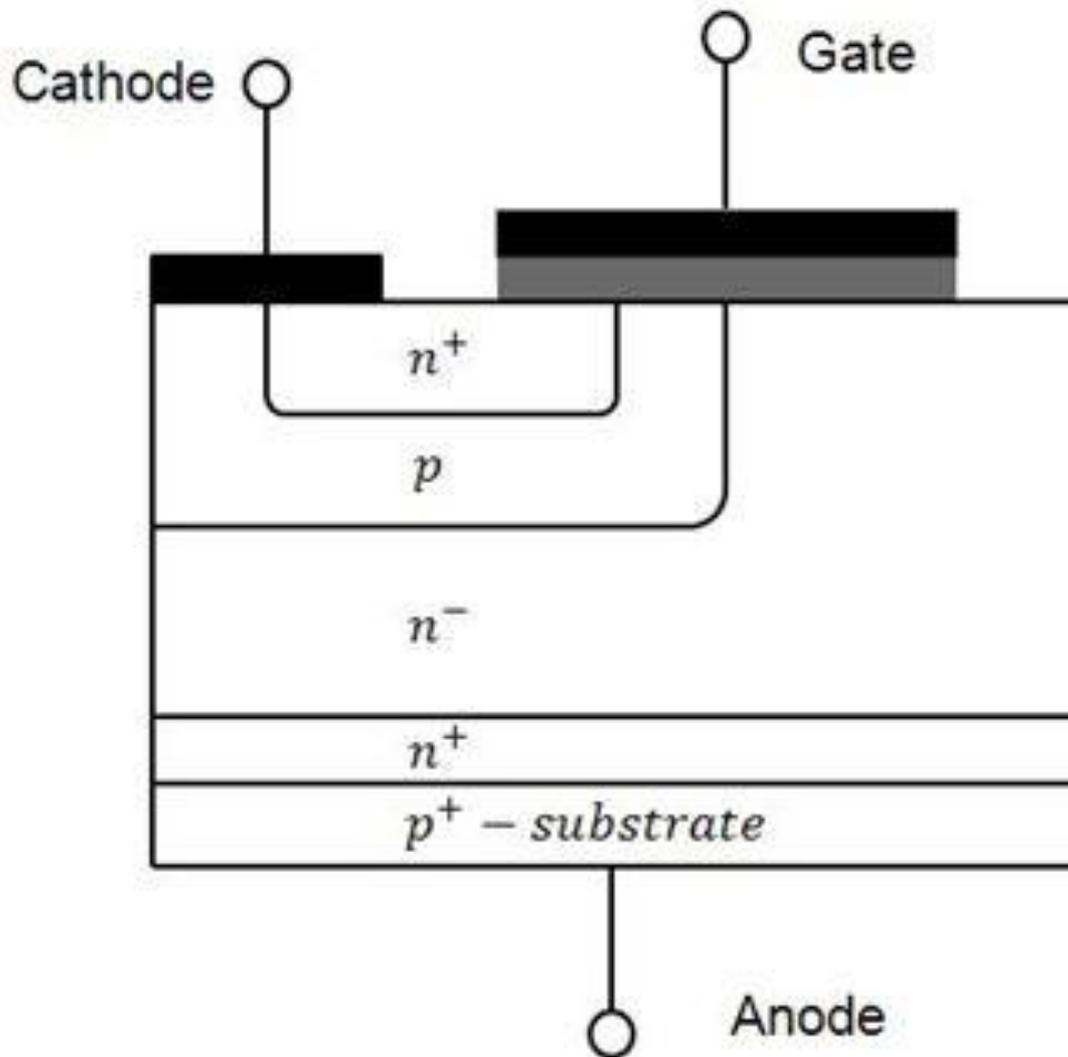
- はじめに
- **IGBTの基本原理**
- マクロモデルの作成
- モデルパラメータの
抽出・最適化とシミュレーション
- まとめ

IGBTの構造



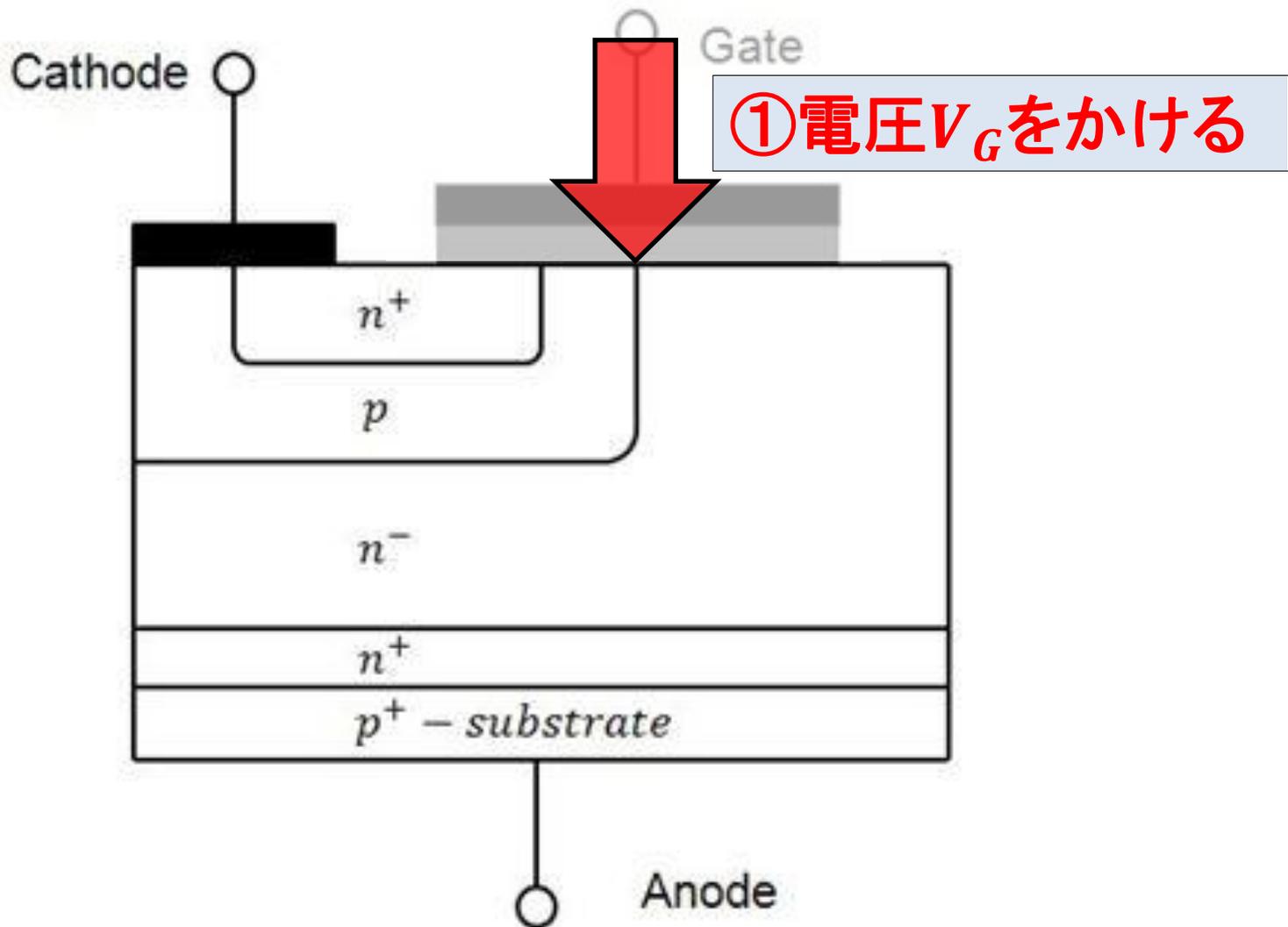
拡散レートの高い p^+ 層を
チャンネルドーパントとして付け加える

IGBTの断面図



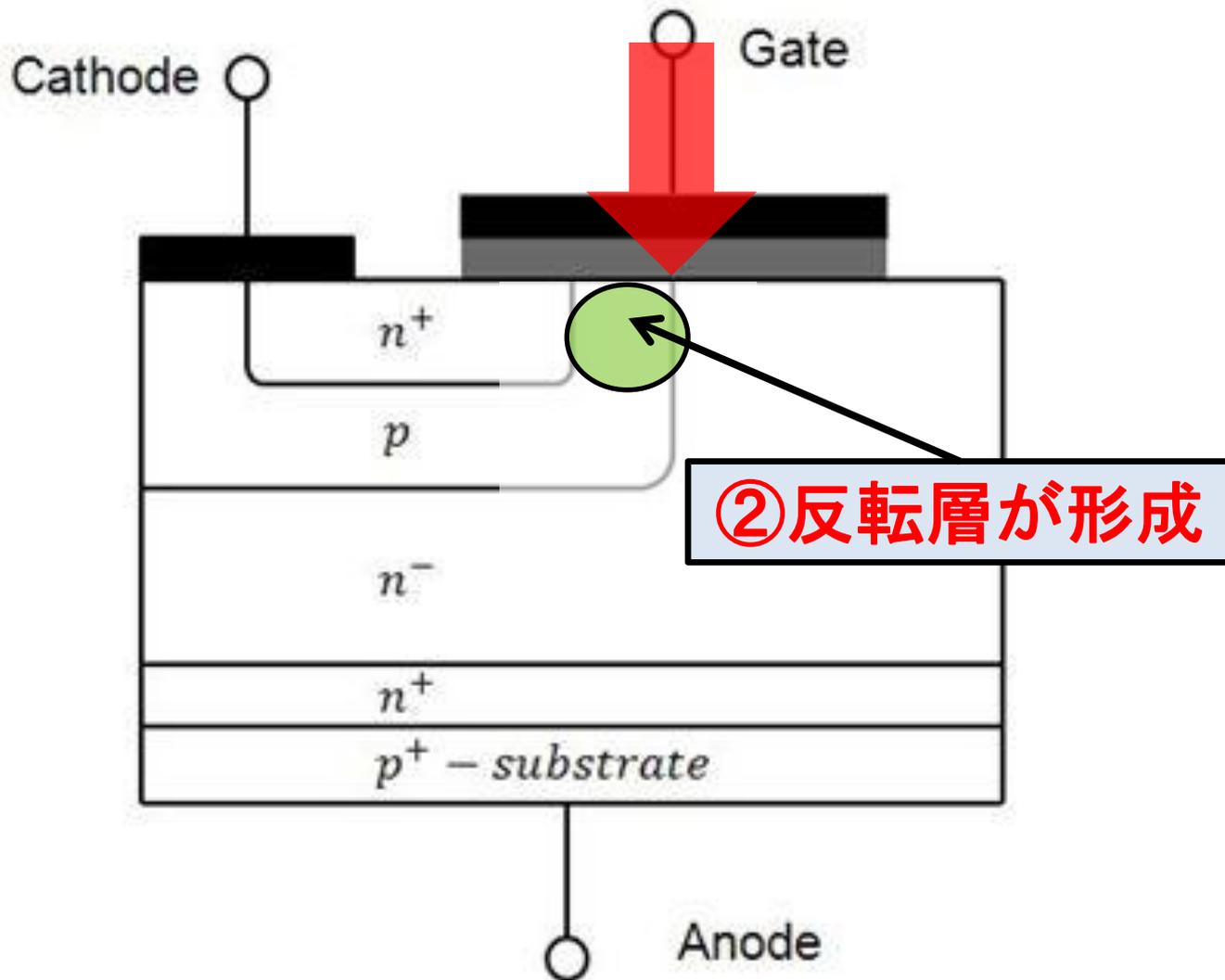
IGBTの簡易化デバイス構造

IGBTの導通



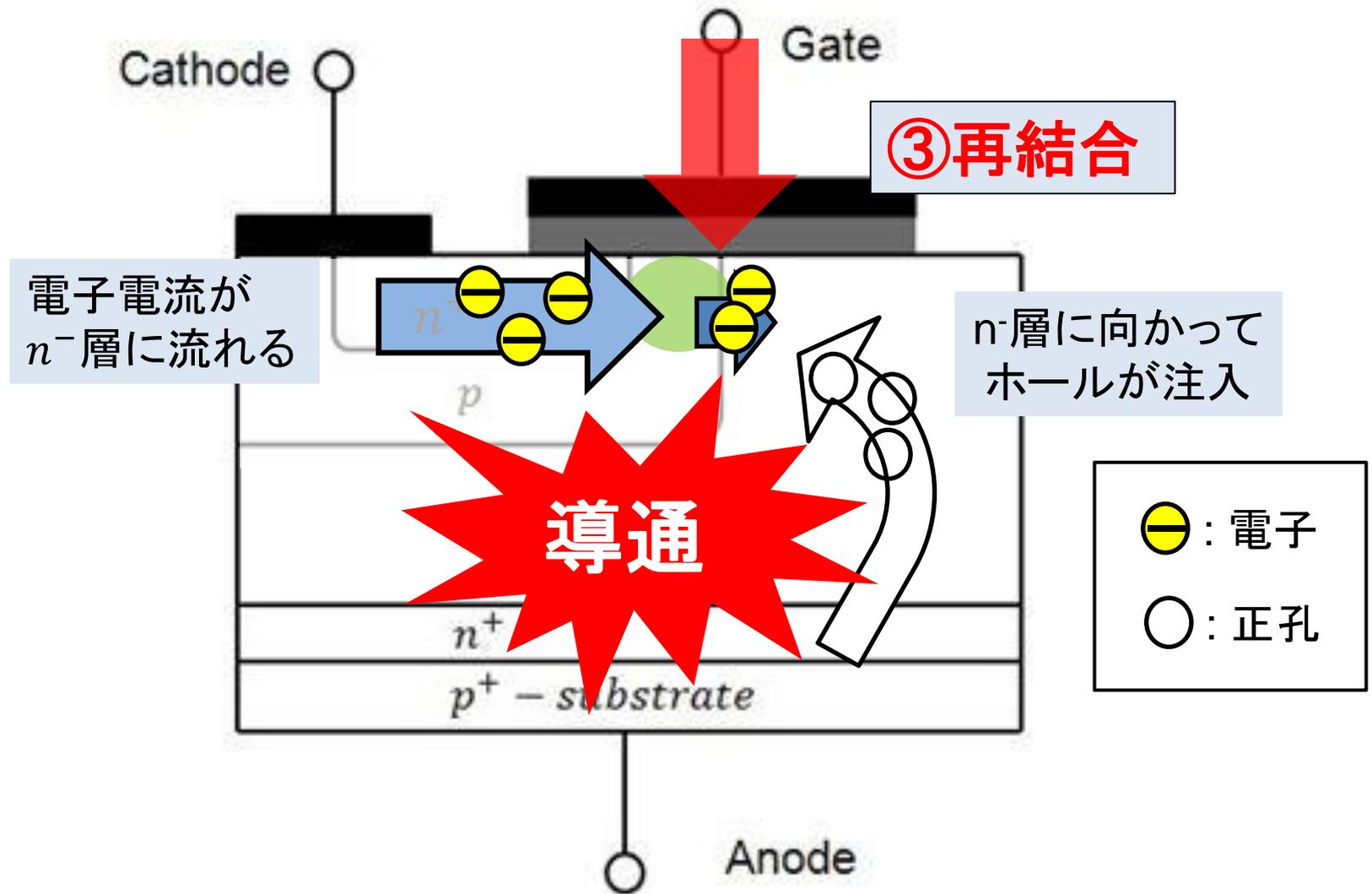
IGBTの簡易化デバイス構造

IGBTの導通



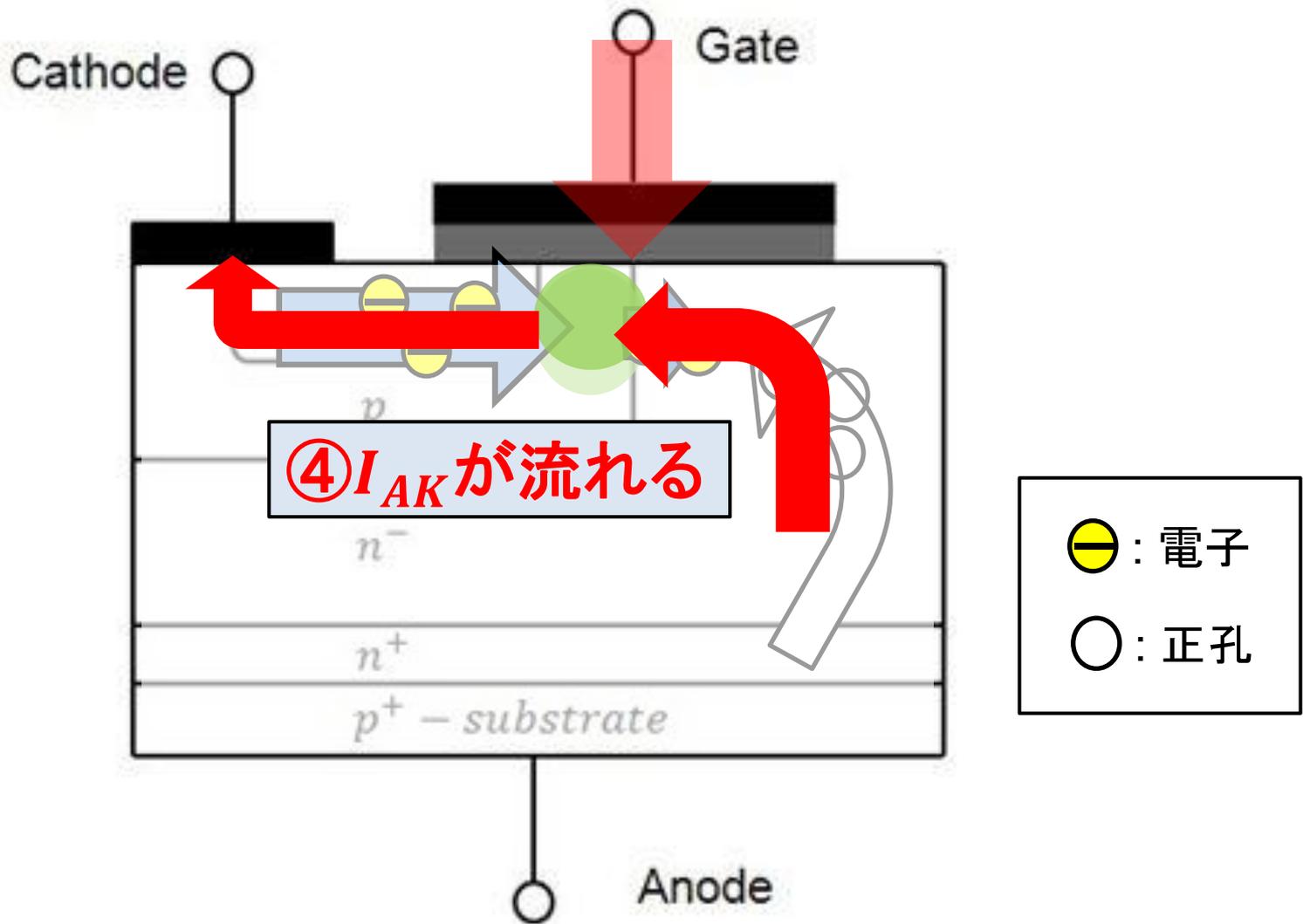
IGBTの簡易化デバイス構造

IGBTの導通



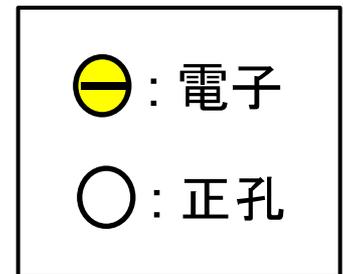
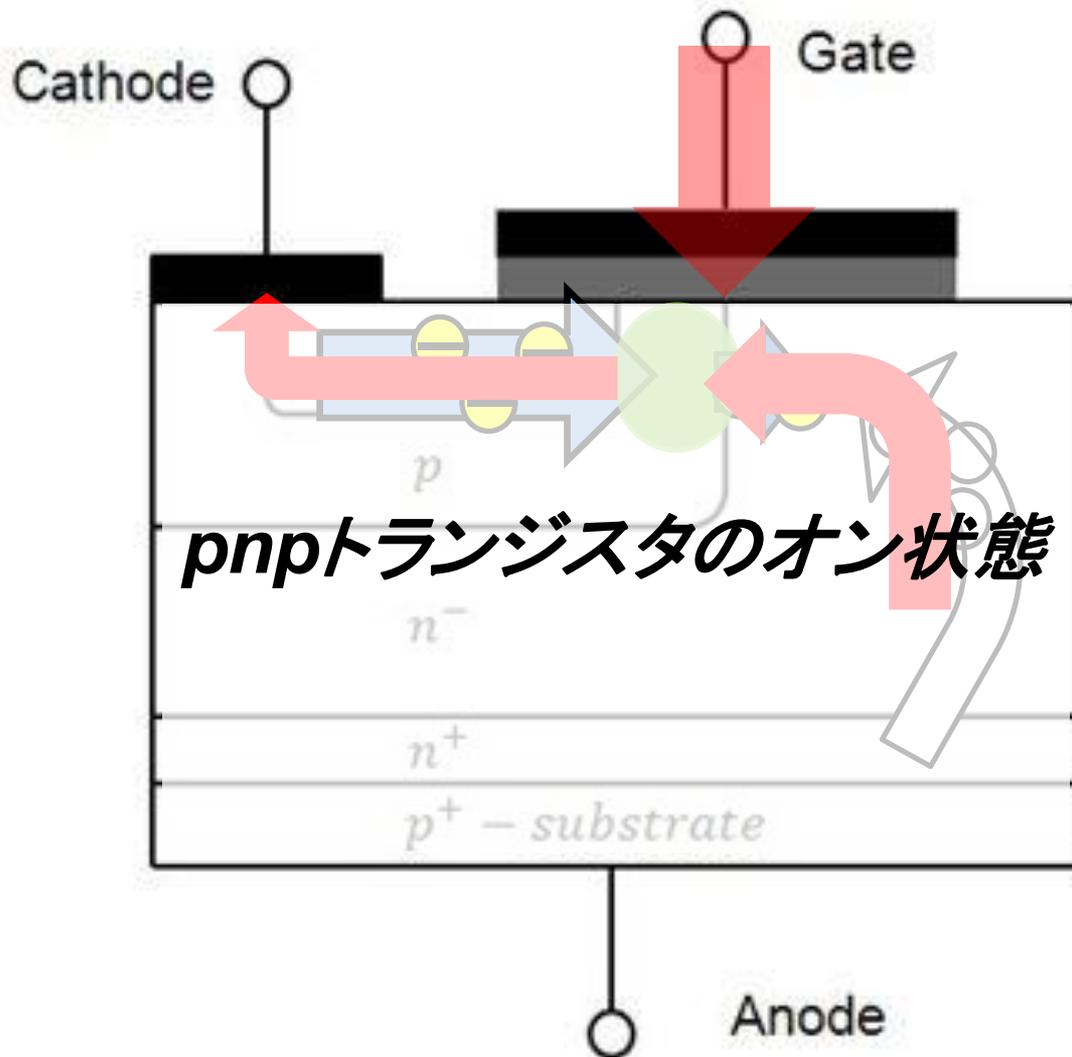
IGBTの簡易化デバイス構造

IGBTの導通



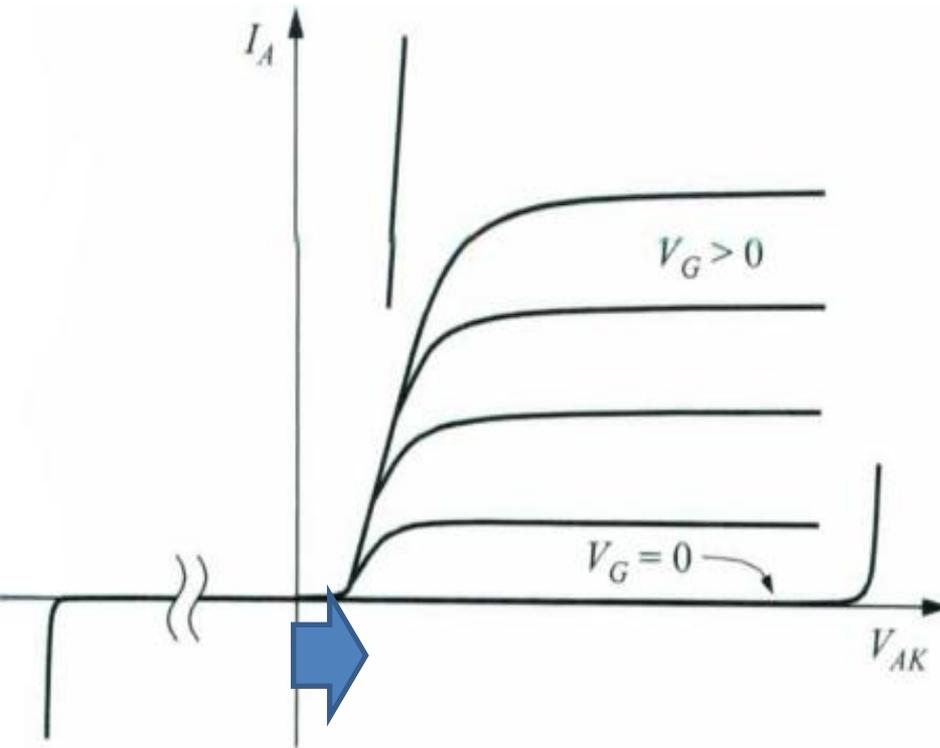
IGBTの簡易化デバイス構造

IGBTの導通



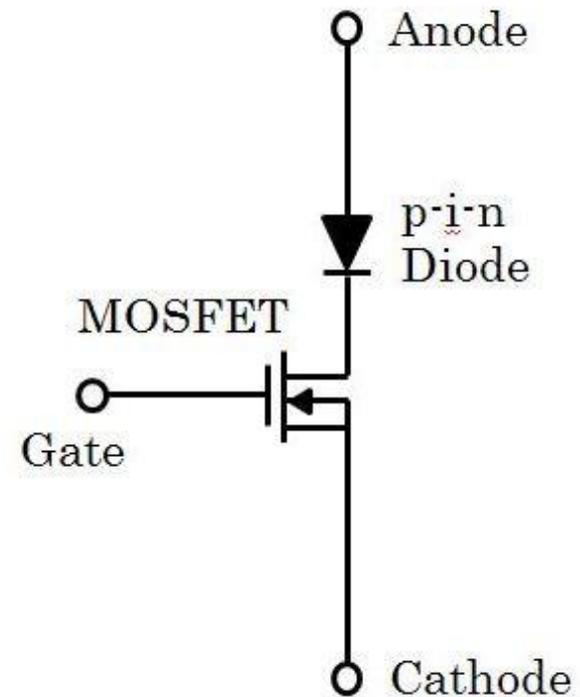
IGBTの簡易化デバイス構造

IGBTの静特性 ($V_{AK} < 0.7 \text{ V}$)



IGBTの出力電流・電圧特性

S. M. Sze, "Physics of Semiconductor",
2 nd, Wiley Inter-science, 1981.



$V_{AK} < 0.7 \text{ V}$ の時IGBTの等価回路

IGBTの静特性 ($V_{AK} > 0.7 \text{ V}$)

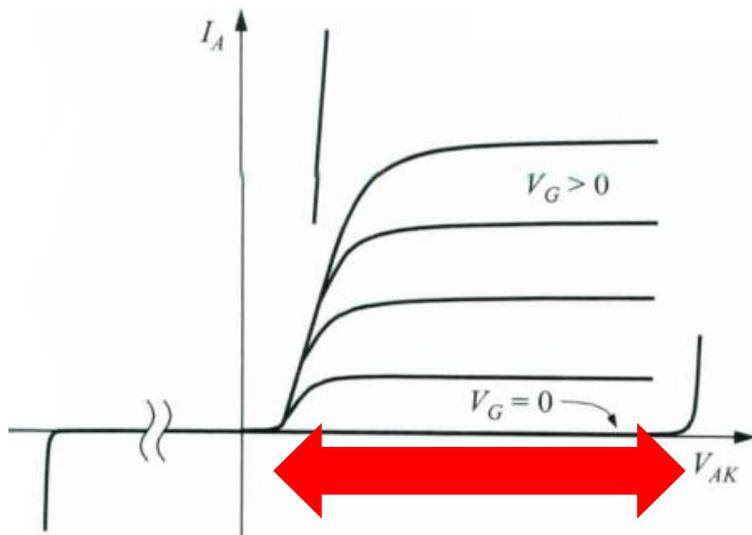
アノード電流：

$$I_A \approx (1 + \beta_{pnp}) I_{MOS} \quad (1)$$

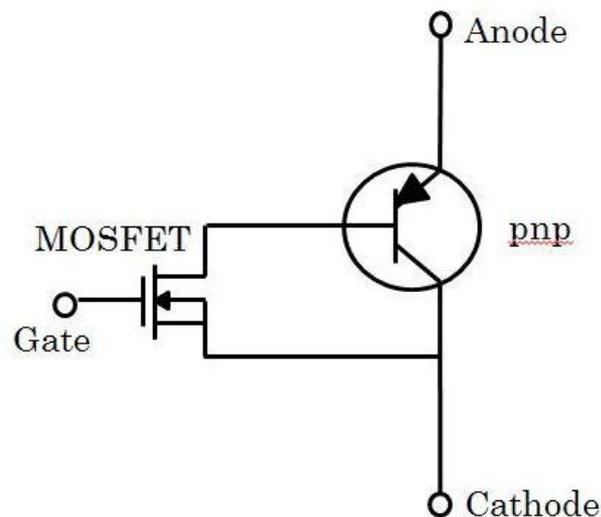
$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (2)$$

ベースのトランスポート係数：

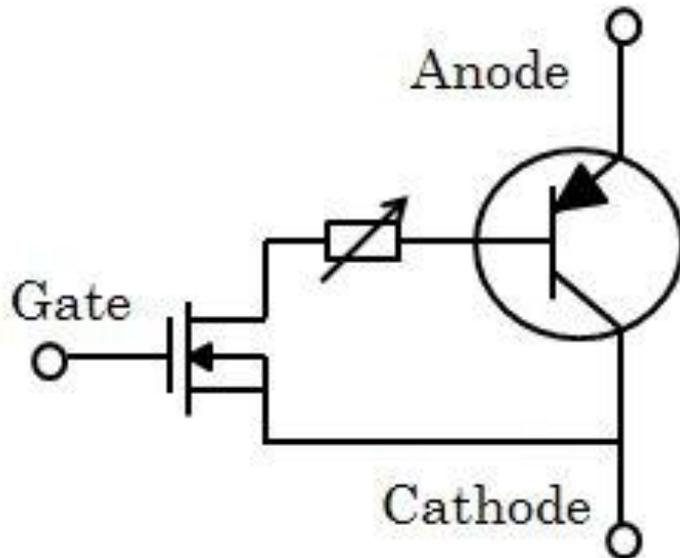
$$\alpha \approx \alpha_T \approx \frac{1}{\text{csch}(x_{nn}/L_n)} \quad (3)$$



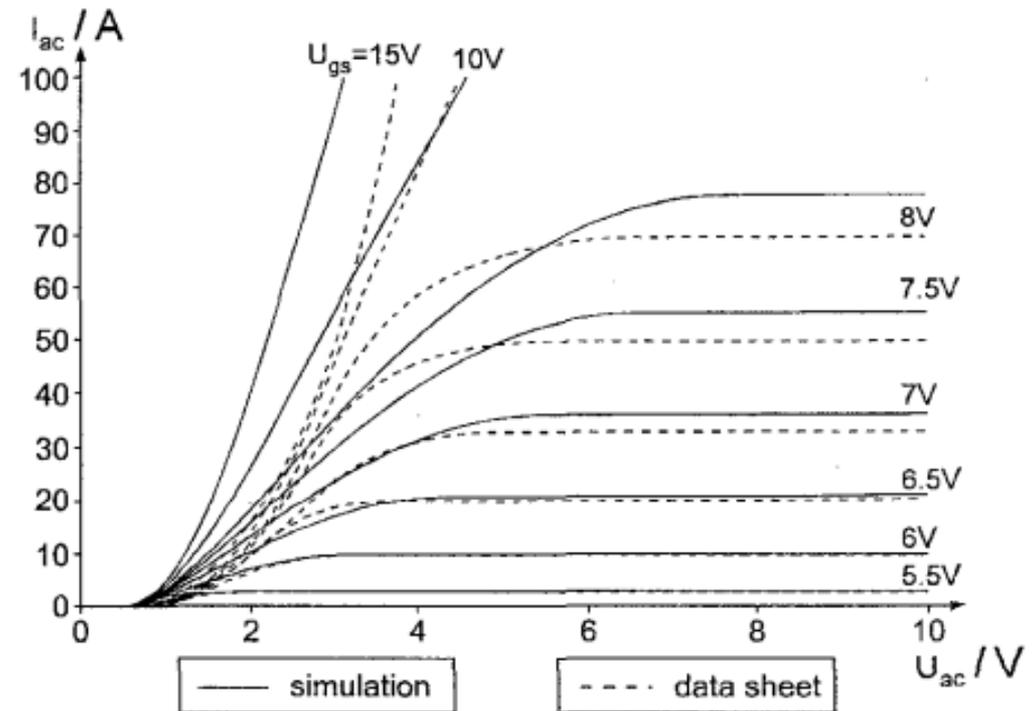
IGBTの出力電流・電圧特性



$V_{AK} > 0.7 \text{ V}$ の時IGBTの等価回路

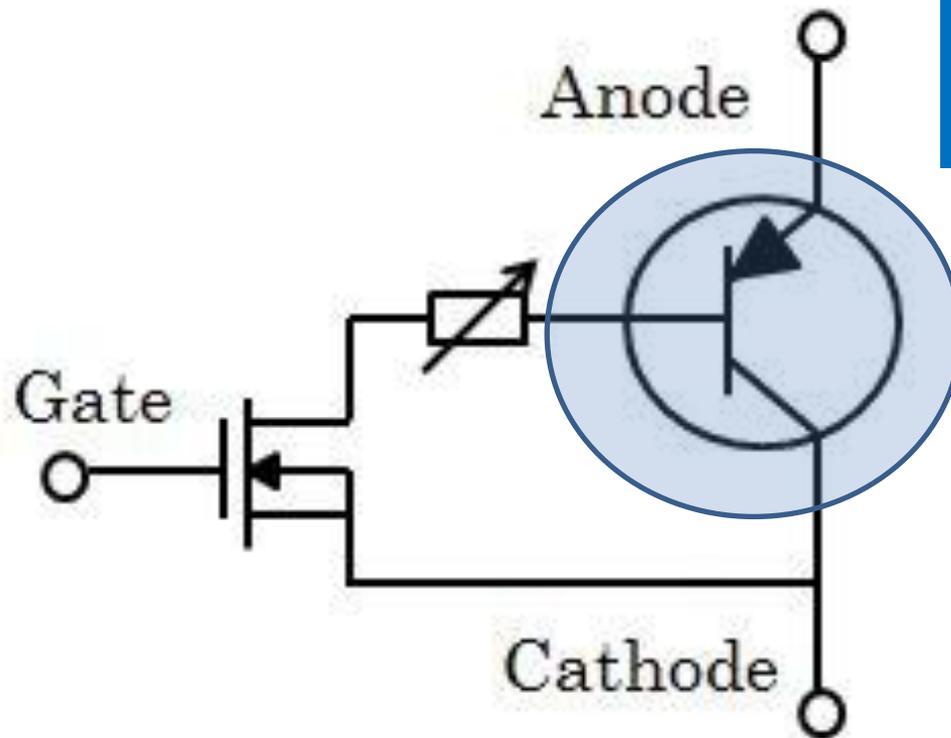


従来のIGBTのマクロモデル



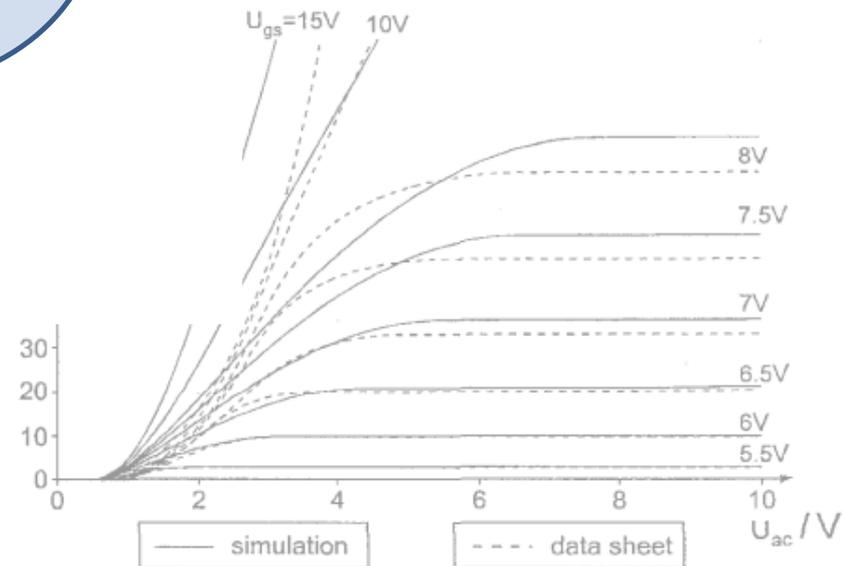
従来のIGBTの静特性と測定データの比較

O. Apeldoorn, S. Schmitt, and R.W. De Doncker: "An Electrical Model of a NPT-IGBT Including Transient Temperature Effects Realized with PSpice Device Equations Modeling", IEEE Catalog, No. 97TH8280 pp.223-228 (1997)

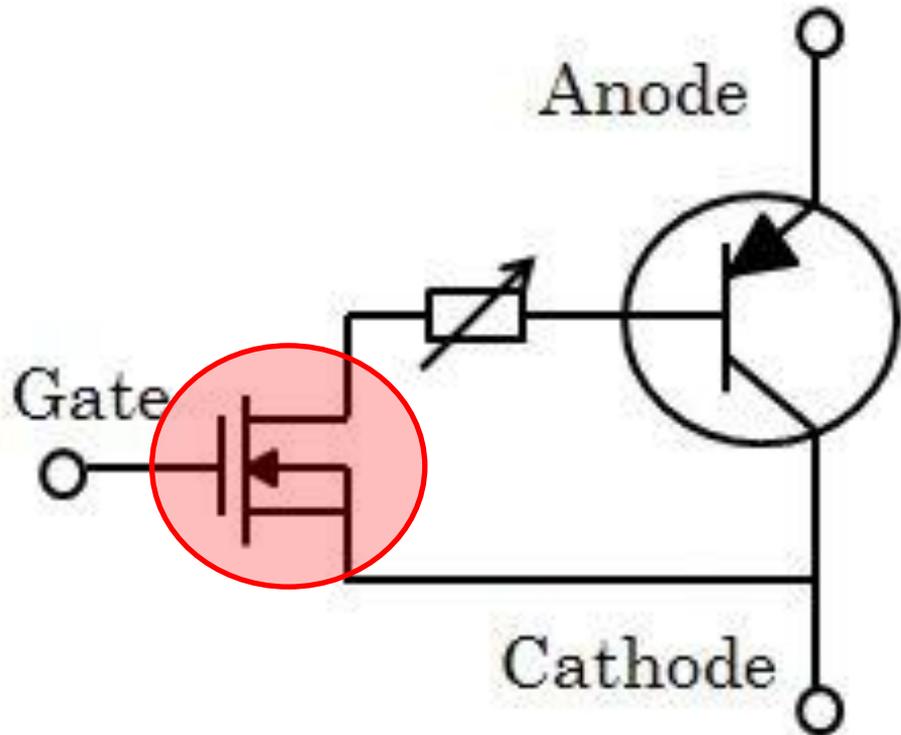


従来のIGBTのマクロモデル

pnpバイポーラトランジスタ:
Gummel-Poonモデル

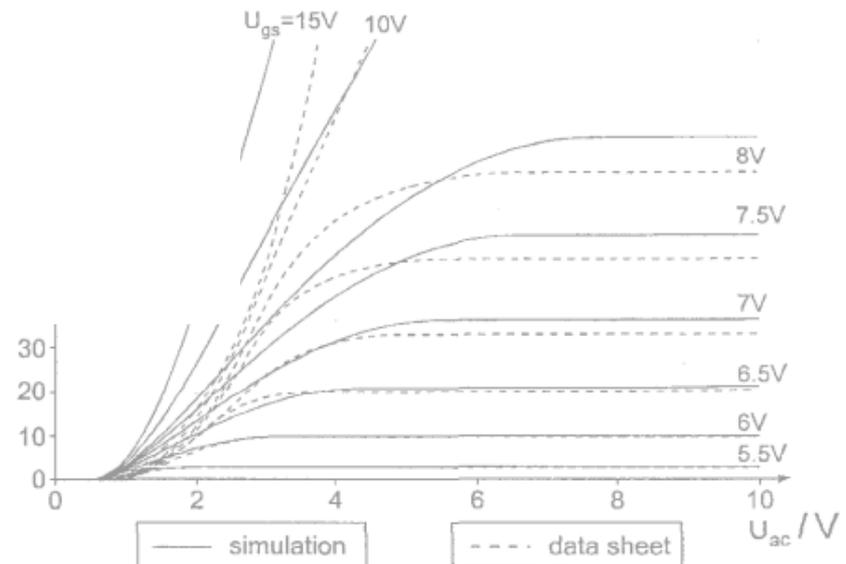


従来のIGBTの静特性と測定データの比較

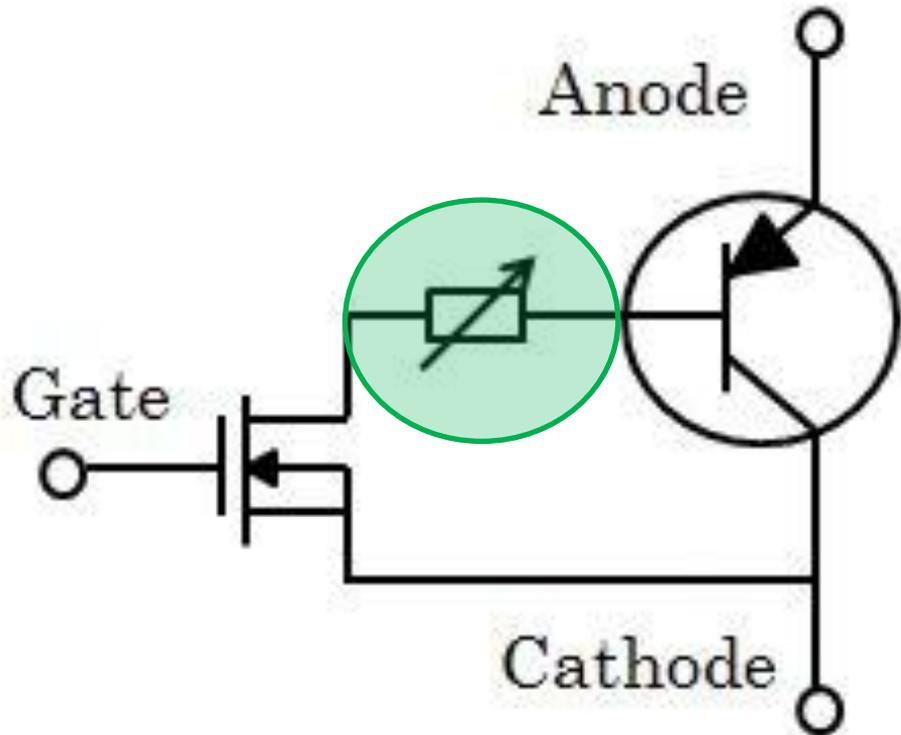


従来のIGBTのマクロモデル

MOSFET:
UCB MOSモデル level 3



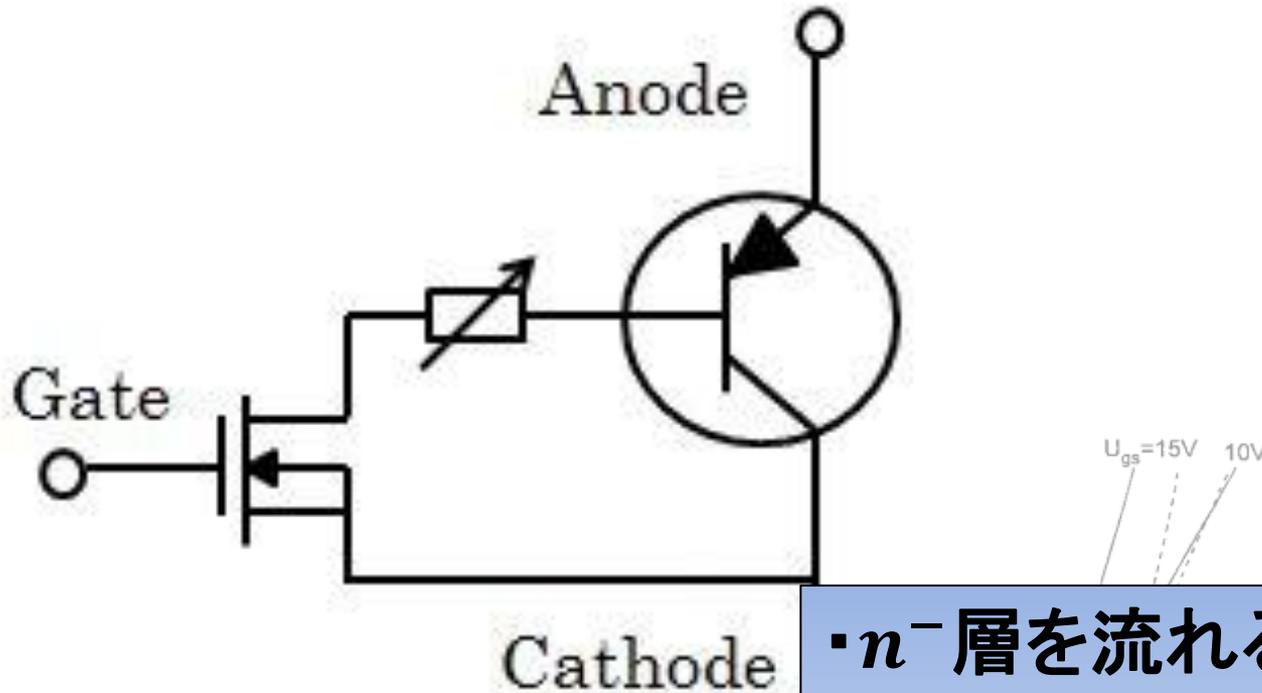
従来のIGBTの静特性と測定データの比較



従来のIGBTのマクロモデル

MOSFETのドレインとなる
n-エピ層に、ゲート・ソース
電圧によって制御される
電流源 (VCCS) により
可変抵抗を表現

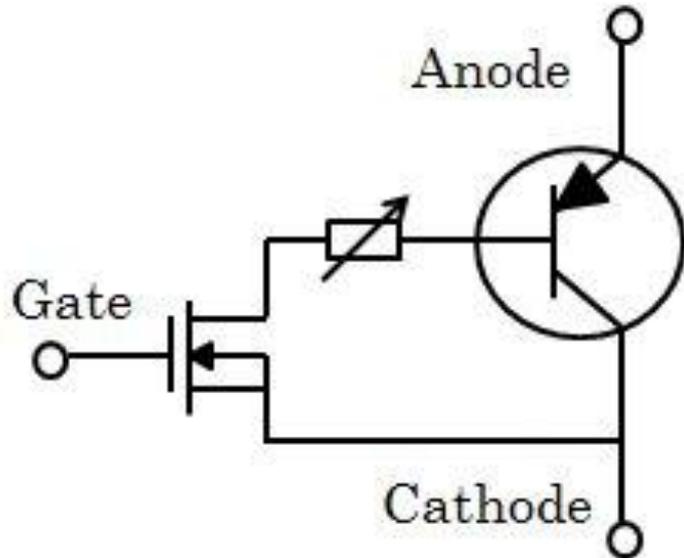
従来のIGBTの静特性と測定データの比較



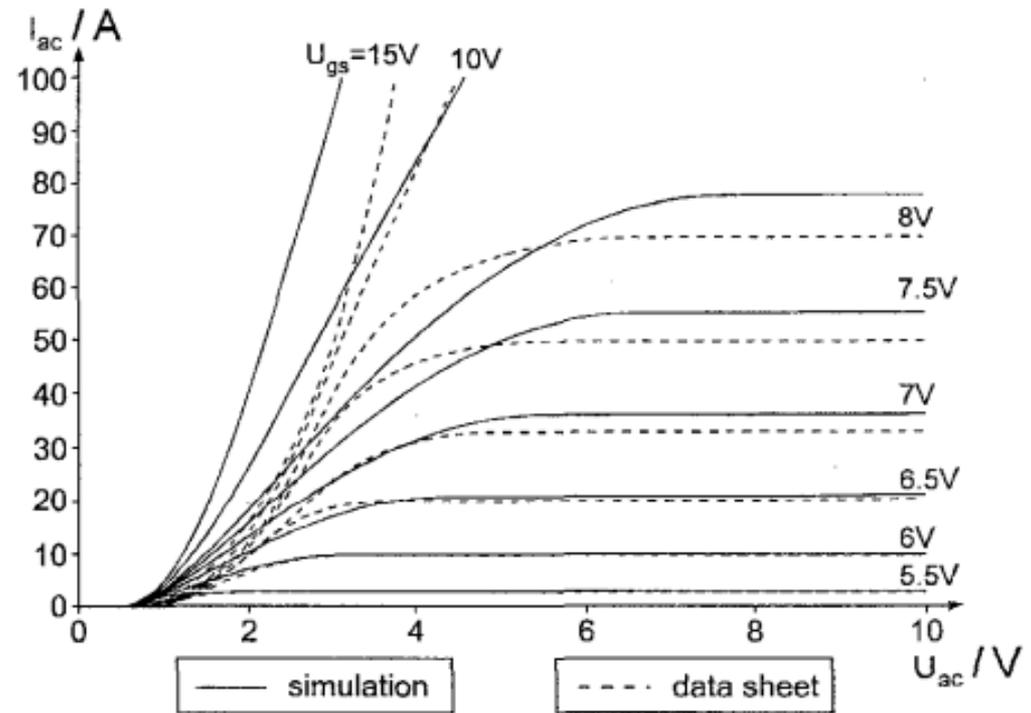
従来のIGBTのマクロモデル

- ・ n^- 層を流れるドリフト電流のモデル化不可
- ・DMOS出力抵抗が一定
- ・フリーホイールダイオードのシミュレーション不可



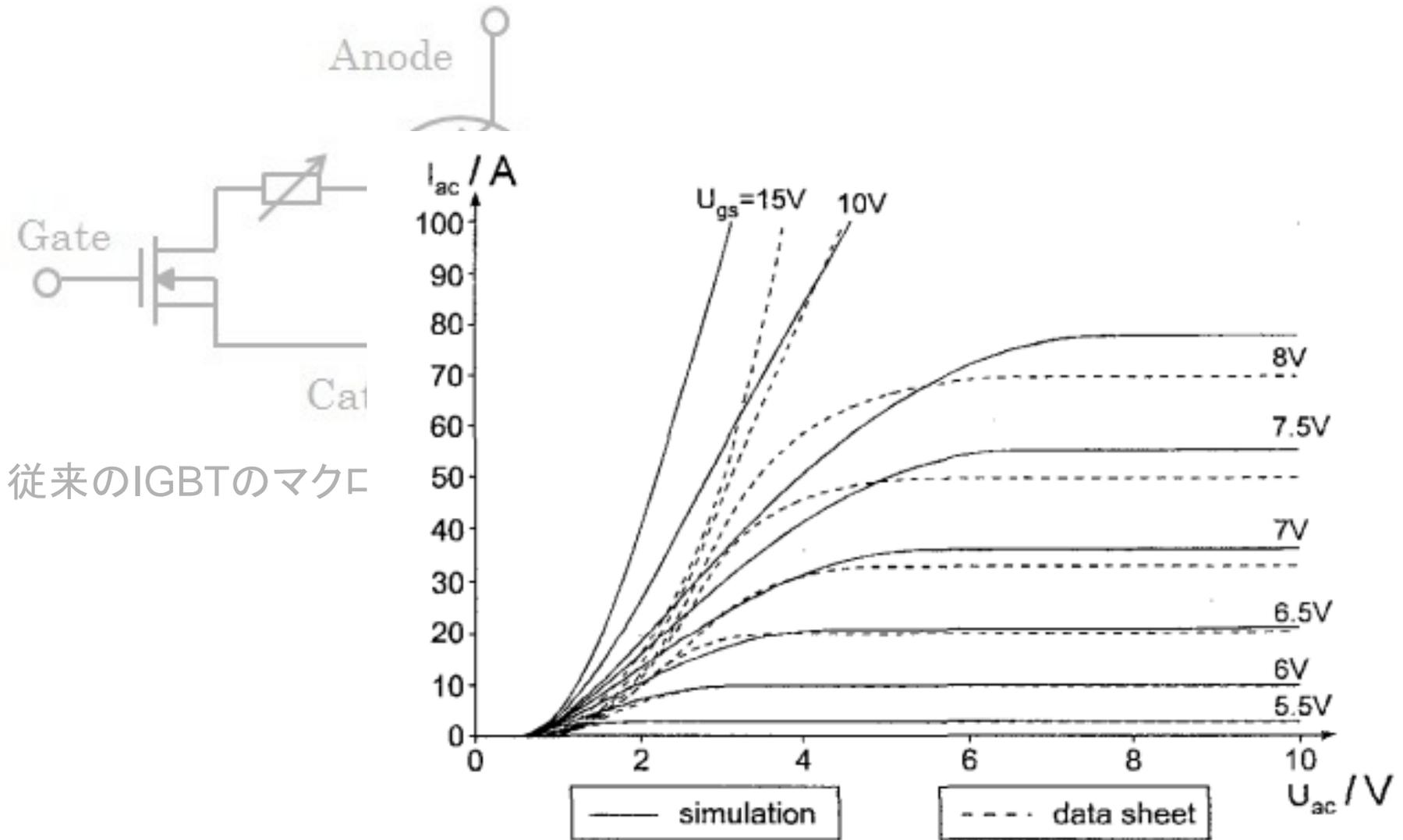


従来のIGBTのマクロモデル



従来のIGBTの静特性と測定データの比較

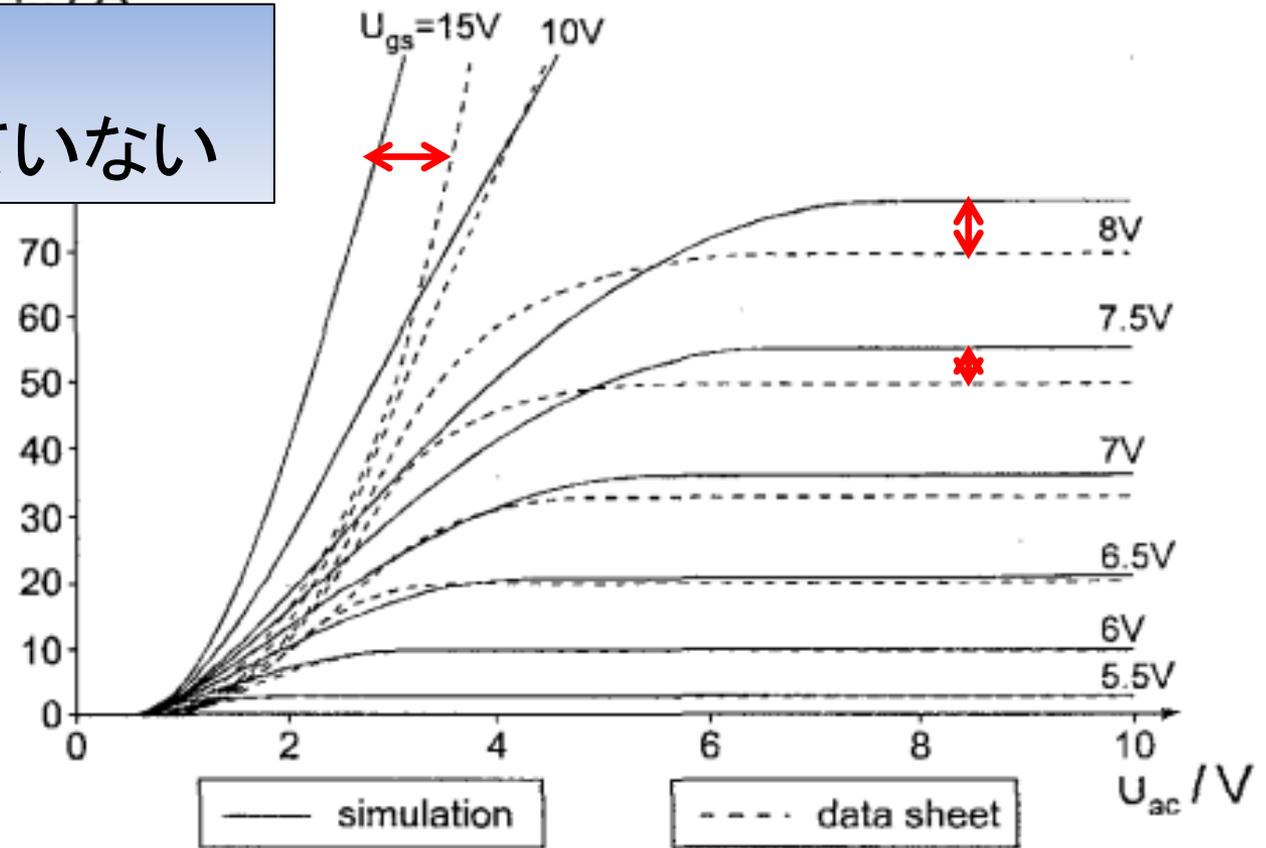
IGBTのマクロモデル



従来のIGBTの静特性と測定データの比較

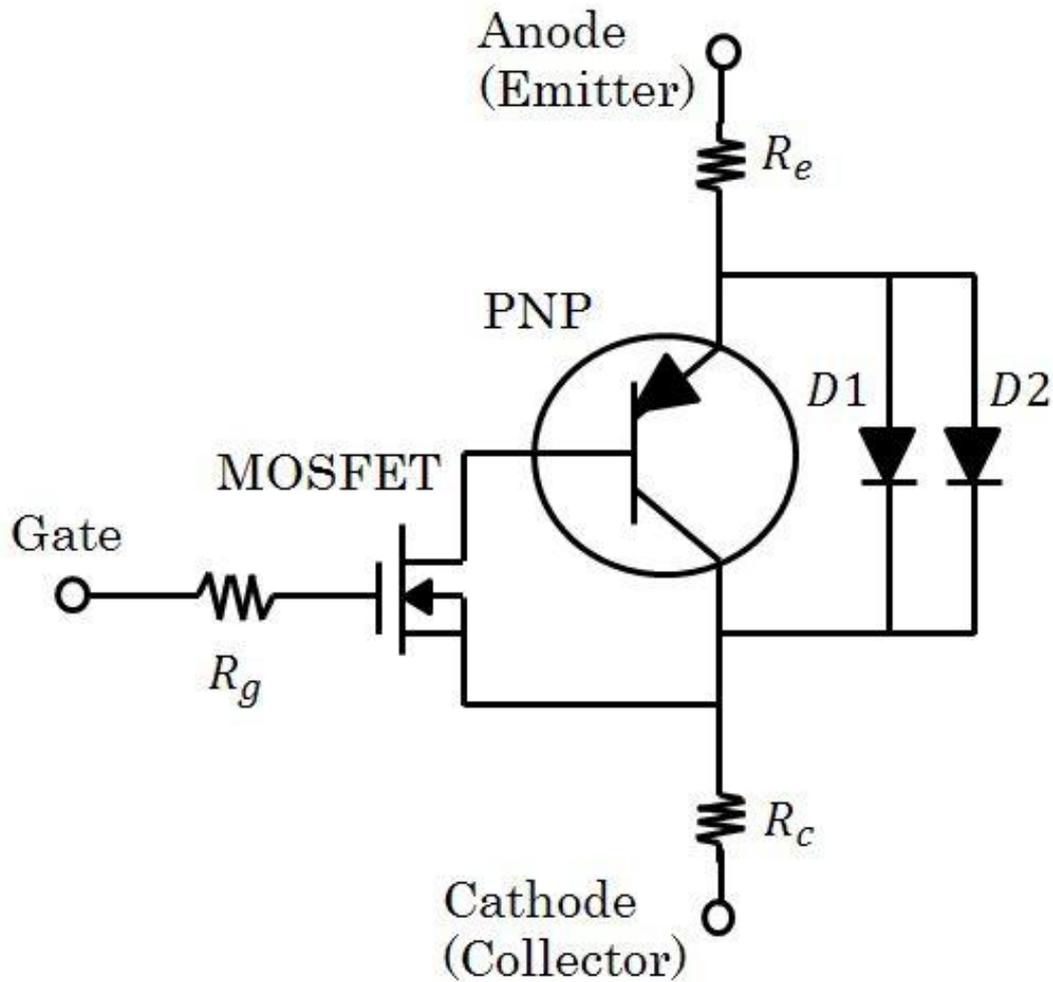
IGBTの静特性を
正確に表現できていない

従来のIGBTのマクロ

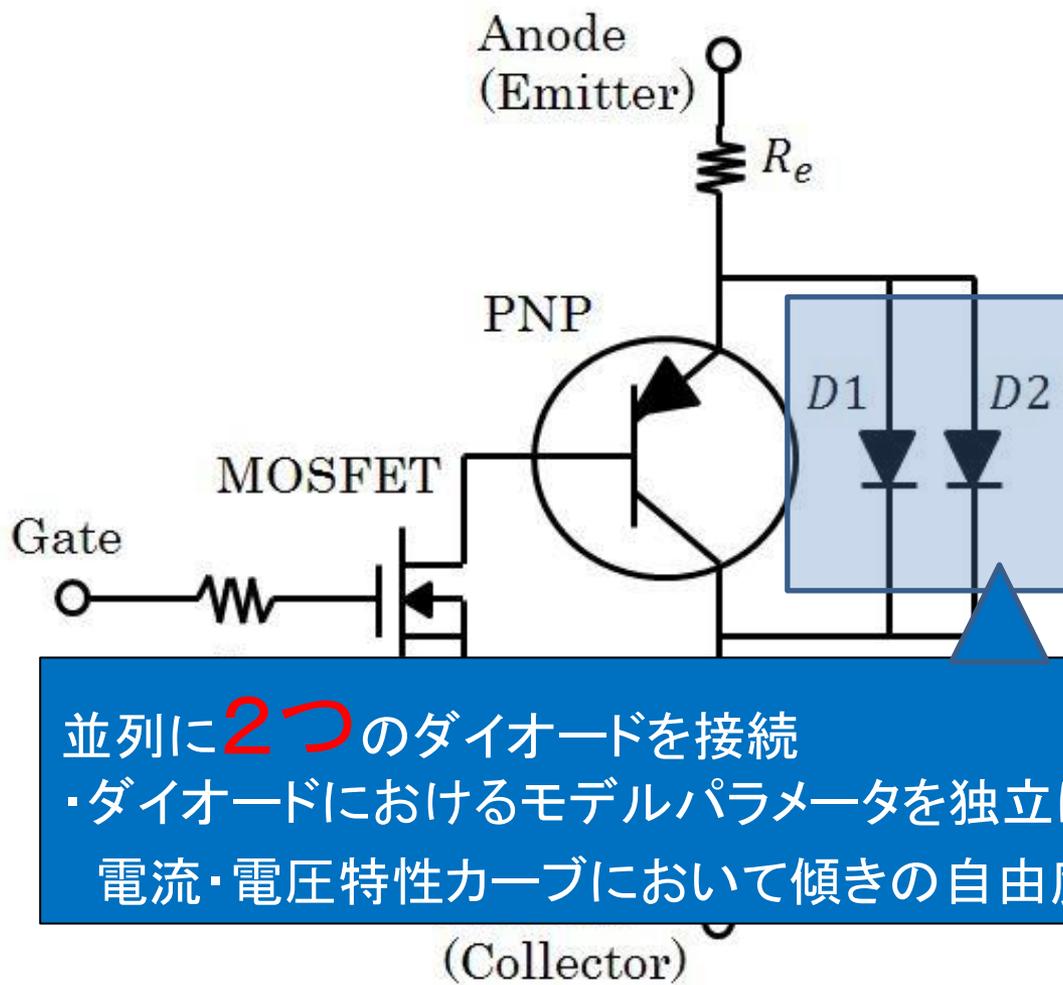


従来のIGBTの静特性と測定データの比較

- はじめに
- IGBTの基本原理
- **マクロモデルの作成**
- モデルパラメータの
抽出・最適化とシミュレーション
- まとめ



提案するIGBTのマクロモデル(A-IGBT)

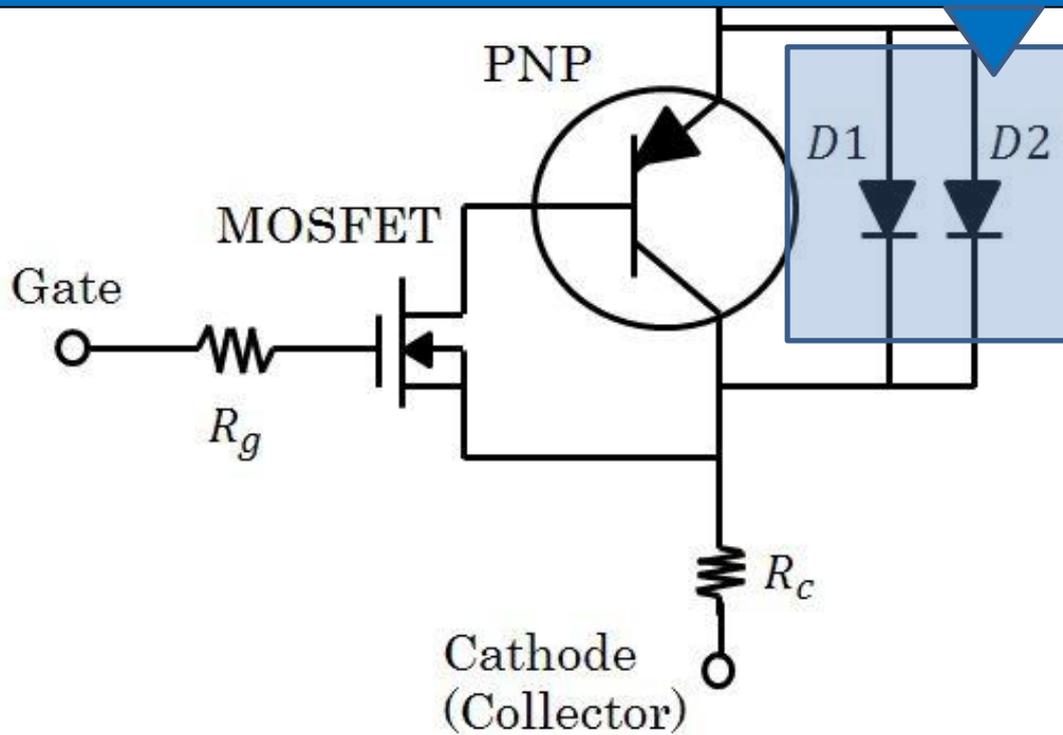


並列に**2つ**のダイオードを接続
・ダイオードにおけるモデルパラメータを独立に変化させて、
電流・電圧特性カーブにおいて傾きの自由度を上げる役割

提案するIGBTのマクロモデル(A-IGBT)

並列に2つのダイオードを接続

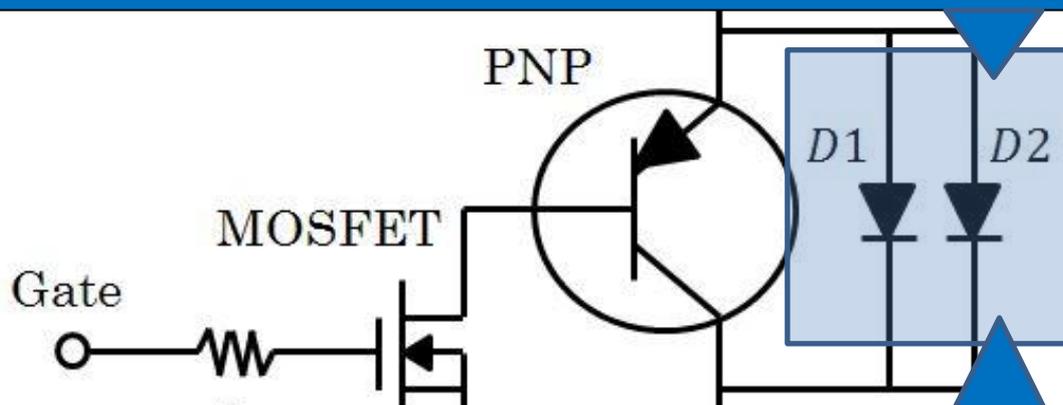
- ・ n^- の逆方向Breakdown電圧をコントロール
- ・フリーホイールダイオードの順方向電流特性のシミュレーションを行う役割
- ・接合容量により過渡シミュレーション時のターンオフを表現



提案するIGBTのマクロモデル(A-IGBT)

並列に2つのダイオードを接続

- ・ n^- の逆方向Breakdown電圧をコントロール
- ・フリーホイールダイオードの順方向電流特性のシミュレーションを行う役割
- ・接合容量により過渡シミュレーション時のターンオフを表現



並列に**2つ**のダイオードを接続

- ・ダイオードにおけるモデルパラメータを独立に変化させて、電流・電圧特性カーブにおいて傾きの自由度を上げる役割

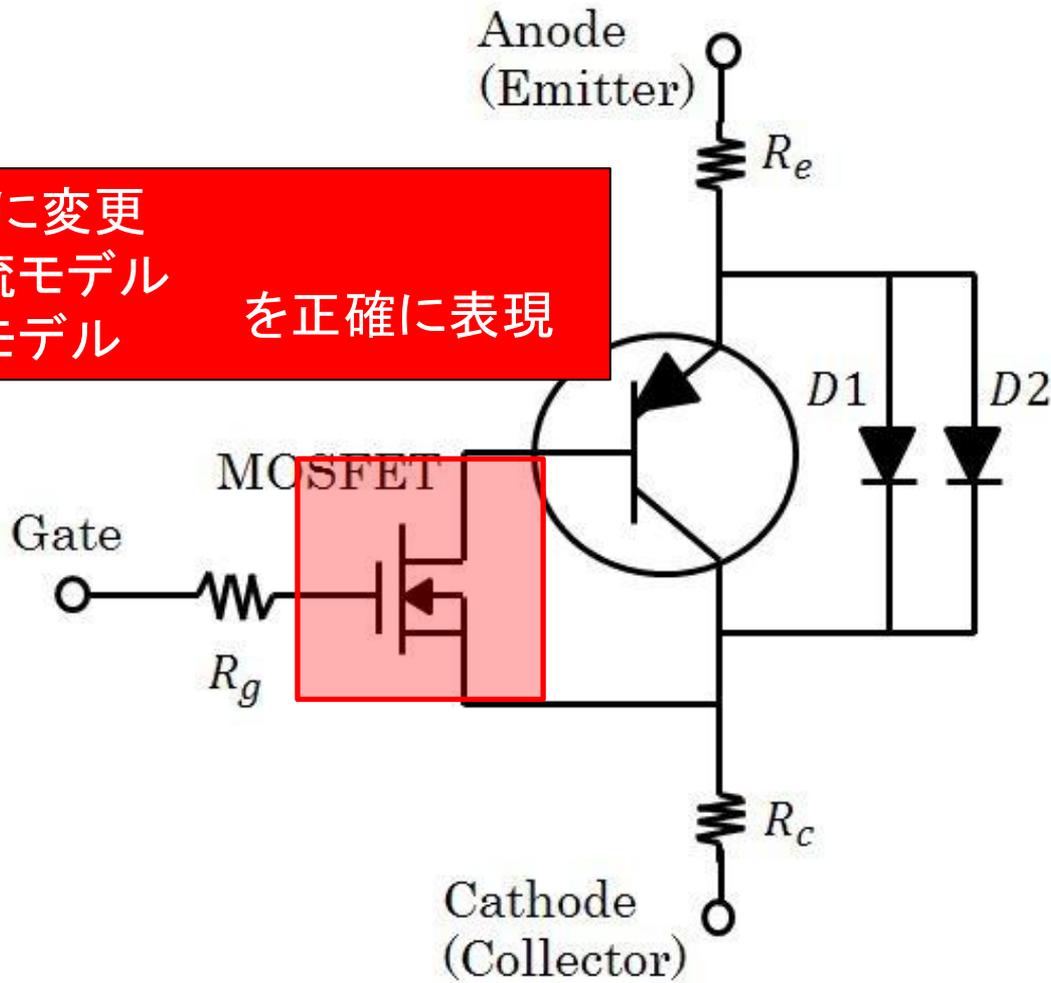
(Collector)

提案するIGBTのマクロモデル(A-IGBT)

BSIM3モデルに変更

- ・ドリフト電流モデル
- ・出力抵抗モデル

を正確に表現



提案するIGBTのマクロモデル(A-IGBT)

- はじめに
- IGBTの基本原理
- マクロモデルの作成
- **モデルパラメータの
抽出・最適化とシミュレーション**
- まとめ

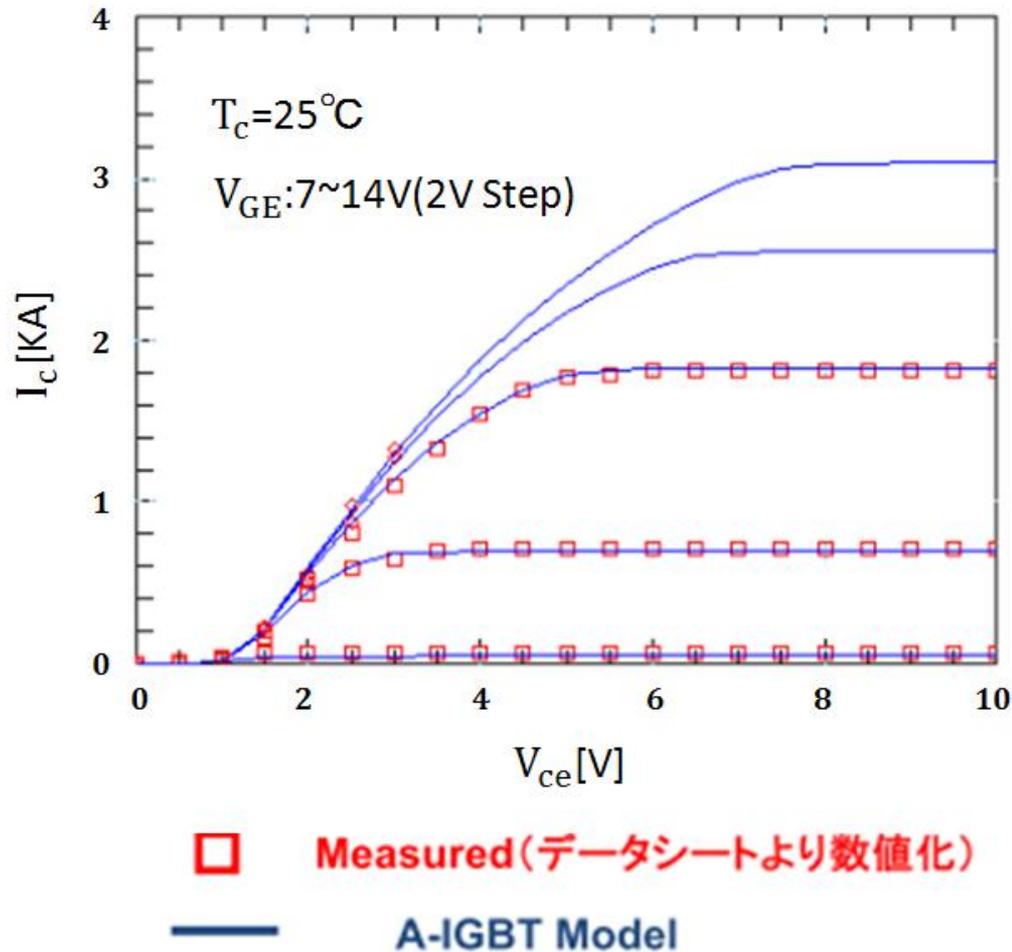
使用したDATA SHEET

日立製IGBT MBN1200E33E

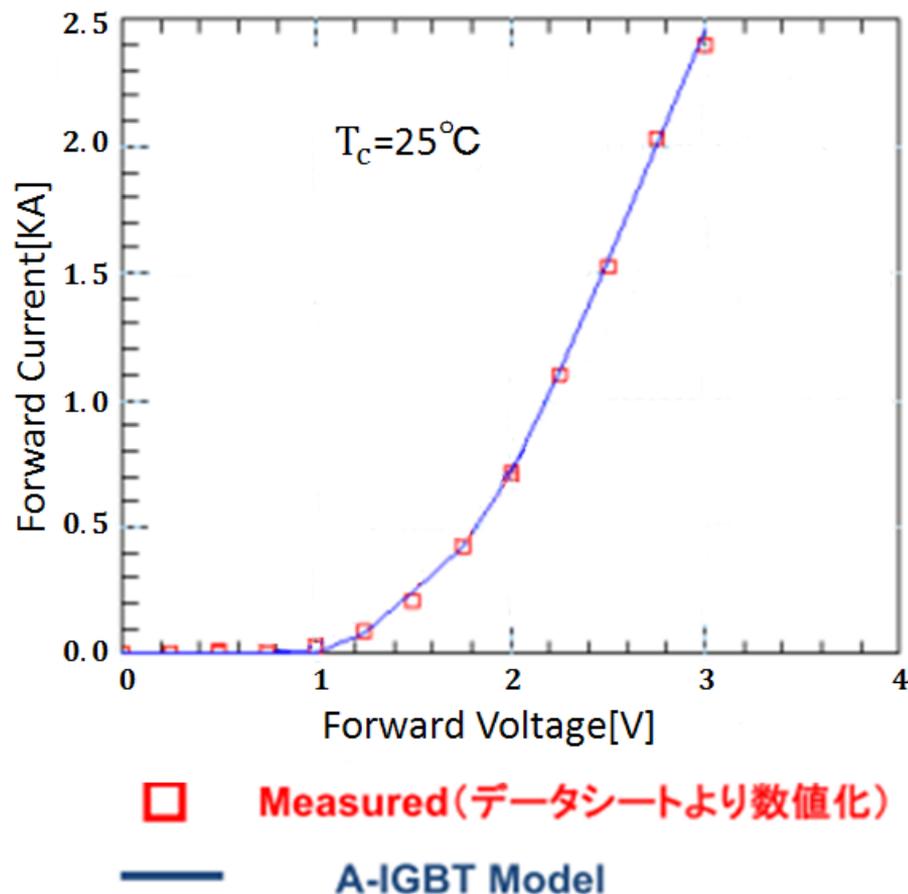
IGBTのマクロモデルをSPICEに実装

BSIM4モデル
Gummel-Poonモデル
PNダイオードモデル

パラメータを抽出
チューニング



ゲート抵抗の影響により、ドレイン電流が圧縮されたようなカーブになる様子を正確にシミュレート



フリーホイールダイオードの順方向電流・電圧特性における
シミュレーションと測定値との比較

- はじめに
- IGBTの基本原理
- マクロモデルの作成
- モデルパラメータの
抽出・最適化とシミュレーション
- まとめ

まとめ

- SPICEシミュレータ用のIGBTのマクロモデルを提案し
I-V特性測定値を使用してモデルパラメータを高精度に抽出した
- 従来のマクロモデルではDMOSのモデルがドリフト電流を
正確に表現できていなかったためBSIM3 に変更して表現した
- 提案したマクロモデルでIGBTの静特性を表現でき
IGBTの静特性の高精度マクロモデルが作成できた

課題

- 容量特性をマクロモデルで正確に表現し
IGBTのスイッチング特性のシミュレートを実行する

Q1.今回、温度25°Cでシミュレーションしたが、ダイオードは温度依存があると思います。

変化させても正確にシミュレートできますか？

A1.今回に関しては25°Cのみ行ったので、まだ変化については行っていませんが、これから恐らくは合わせらせると考えています。

Q2-1.どこまでがあなたのアイデアですか？

A2.現在、共同研究者の青木先生のご指導のもとモデリングの研究を進めております。

今回の内容に関しても青木先生に指針していただいたので、私自身のアイデアはほとんどないと思います。

Q2-2.じゃあ、この研究が進んでこのマクロモデルが実用に至った場合、あなたの名前は残りますか？

A2-2.残らないのではないのでしょうか？

Q3.フリーホイールダイオード...

A3.ここらへんで時間がきてゴタゴタして曖昧に終わったので、質問を今一つ覚えていません。すみません。