

電子回路研究発表会

ECT-14-077

IGBTの静特性における 複数のプロセス・デバイス特性を考慮した 高精度マクロモデルの研究

○香積 正基







青木均 KhatamiRamin 新井 薫子 轟俊一郎
戸塚拓也 安部文隆 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て開発
- ・2種類のモジュールの測定データからパラメータ抽出

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

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...

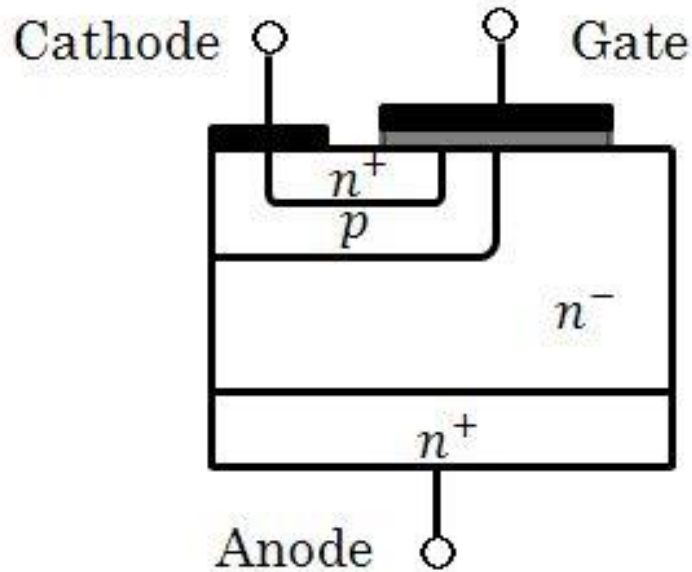
新しいシミュレーション環境

- ・2種類のモジュールの測定データからパラメータ抽出

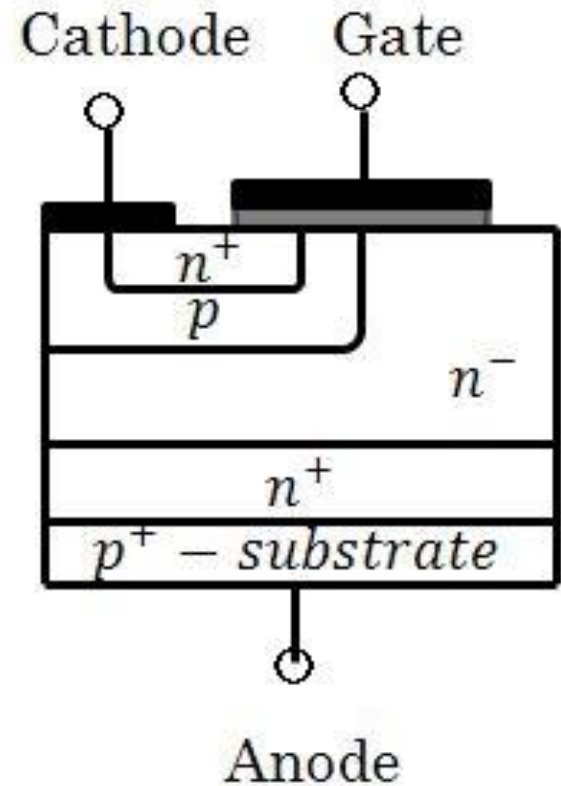
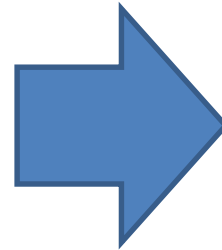
プロセスを考慮することを可能にする

- 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

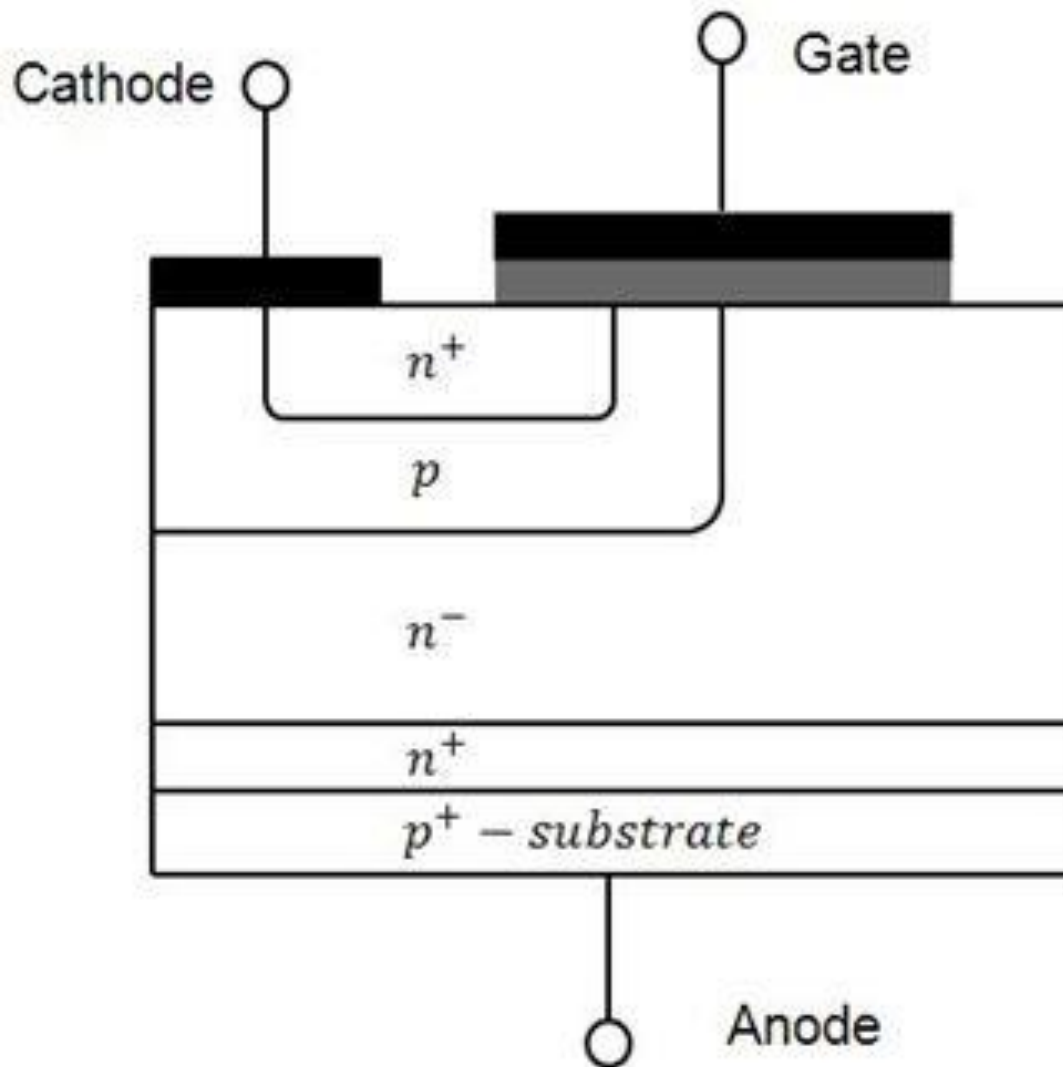


$p^+ - substrate$



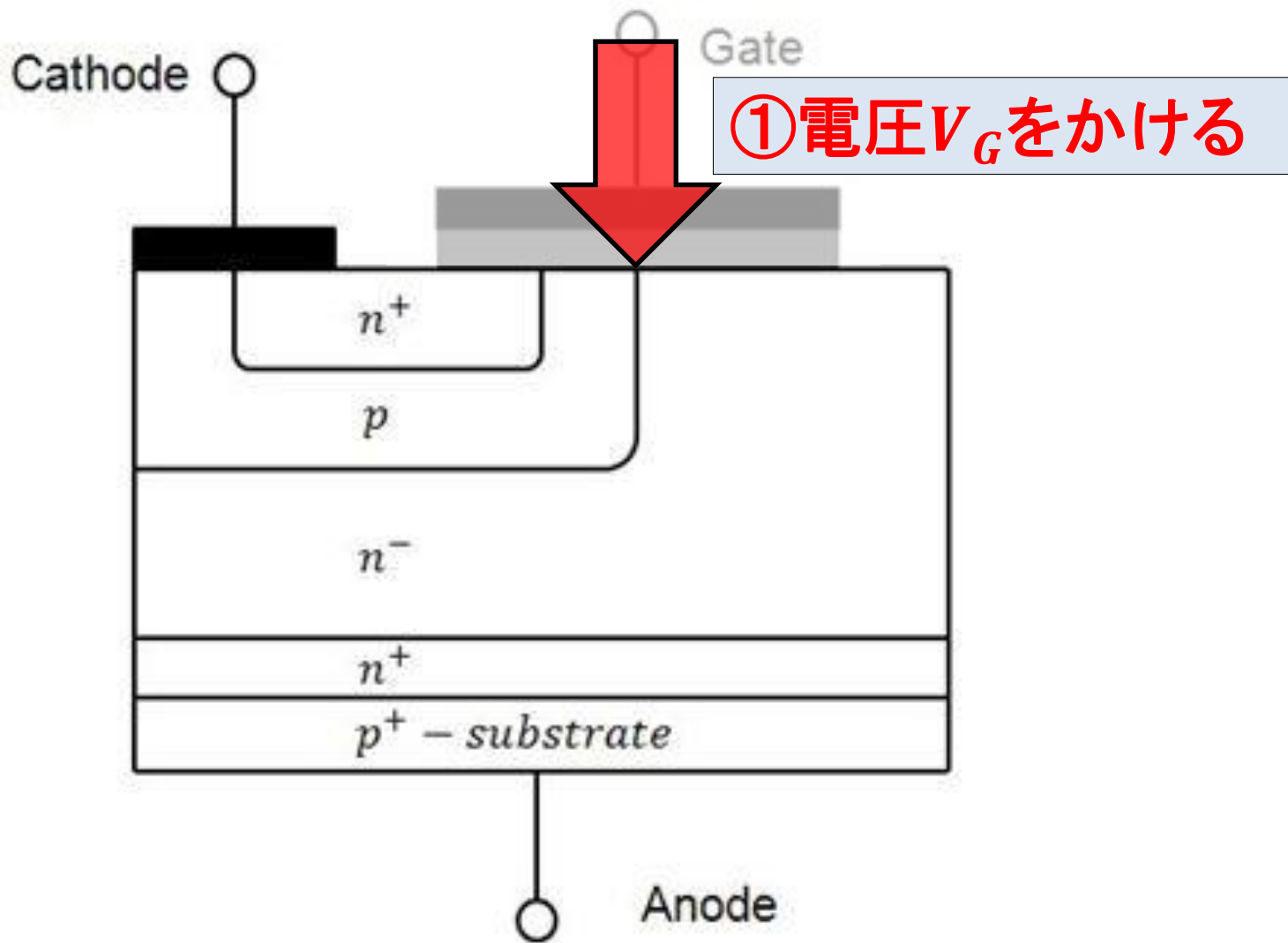
拡散レートの高い p^+ 層を
チャンネルドーパントとして付け加える

IGBTの断面図



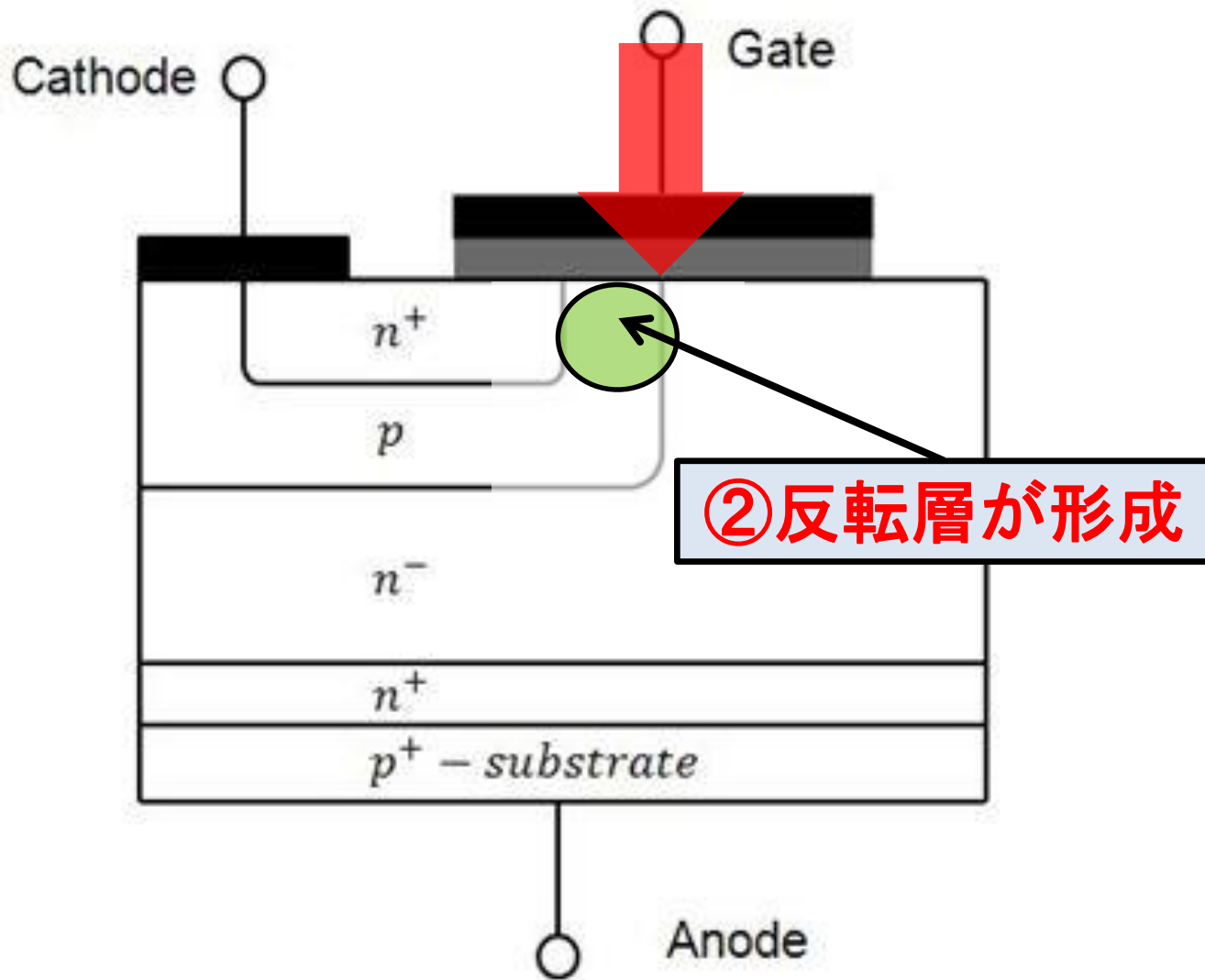
IGBTの簡易化デバイス構造

IGBTの導通



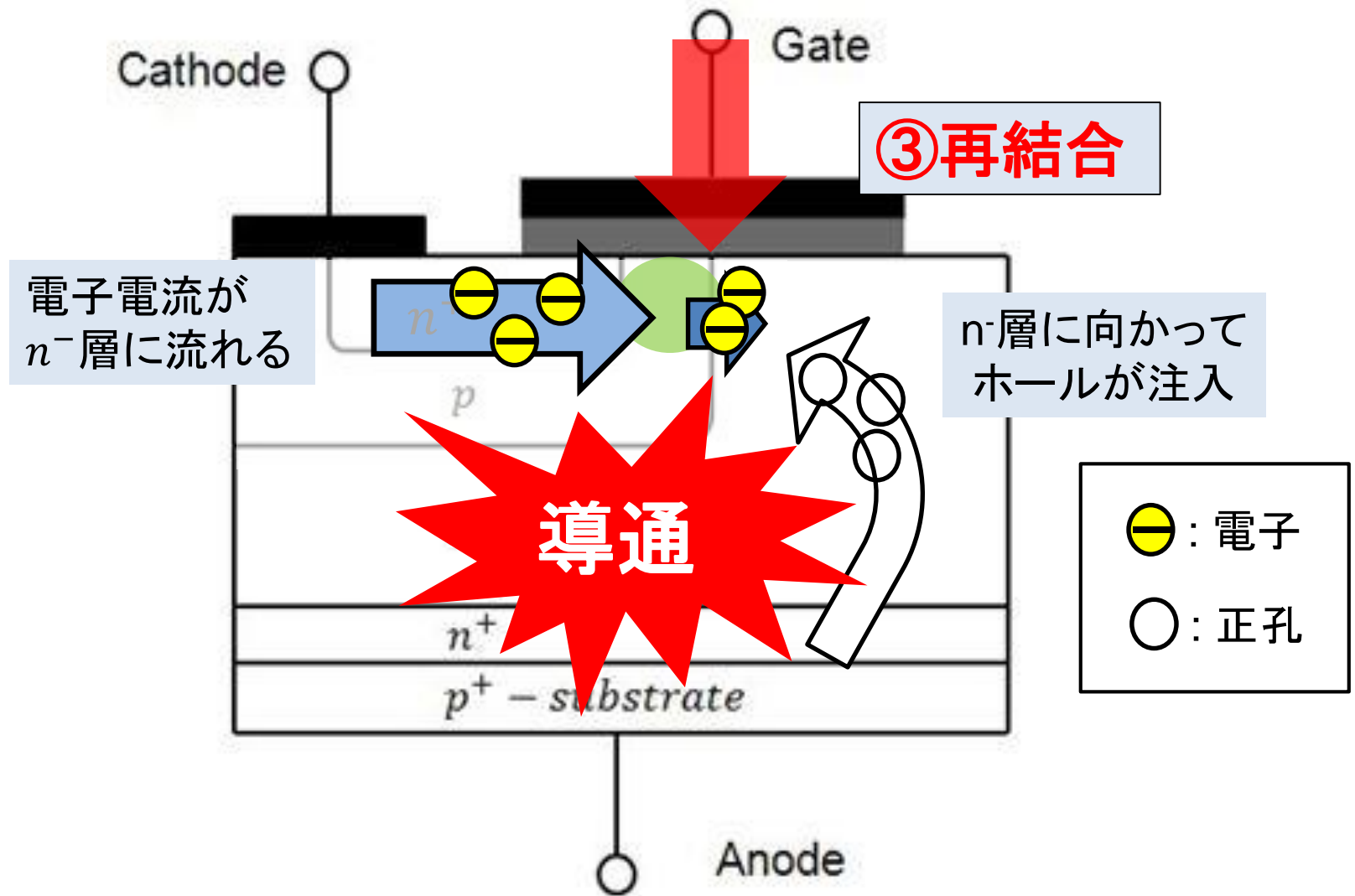
IGBTの簡易化デバイス構造

IGBTの導通



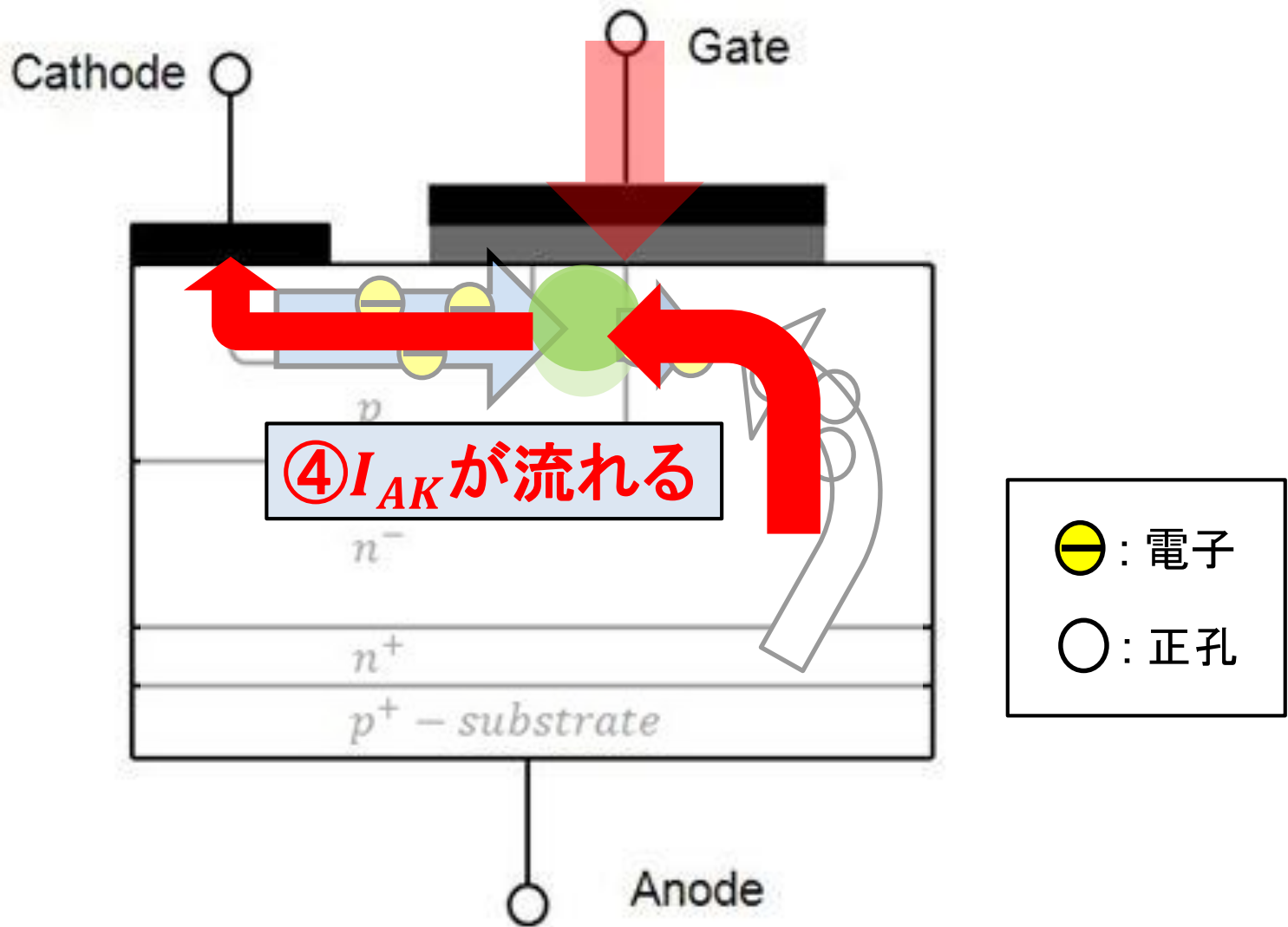
IGBTの簡易化デバイス構造

IGBTの導通

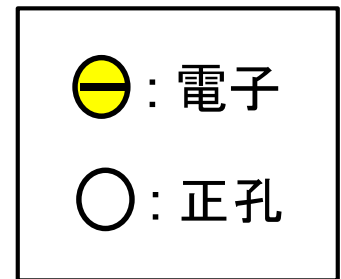
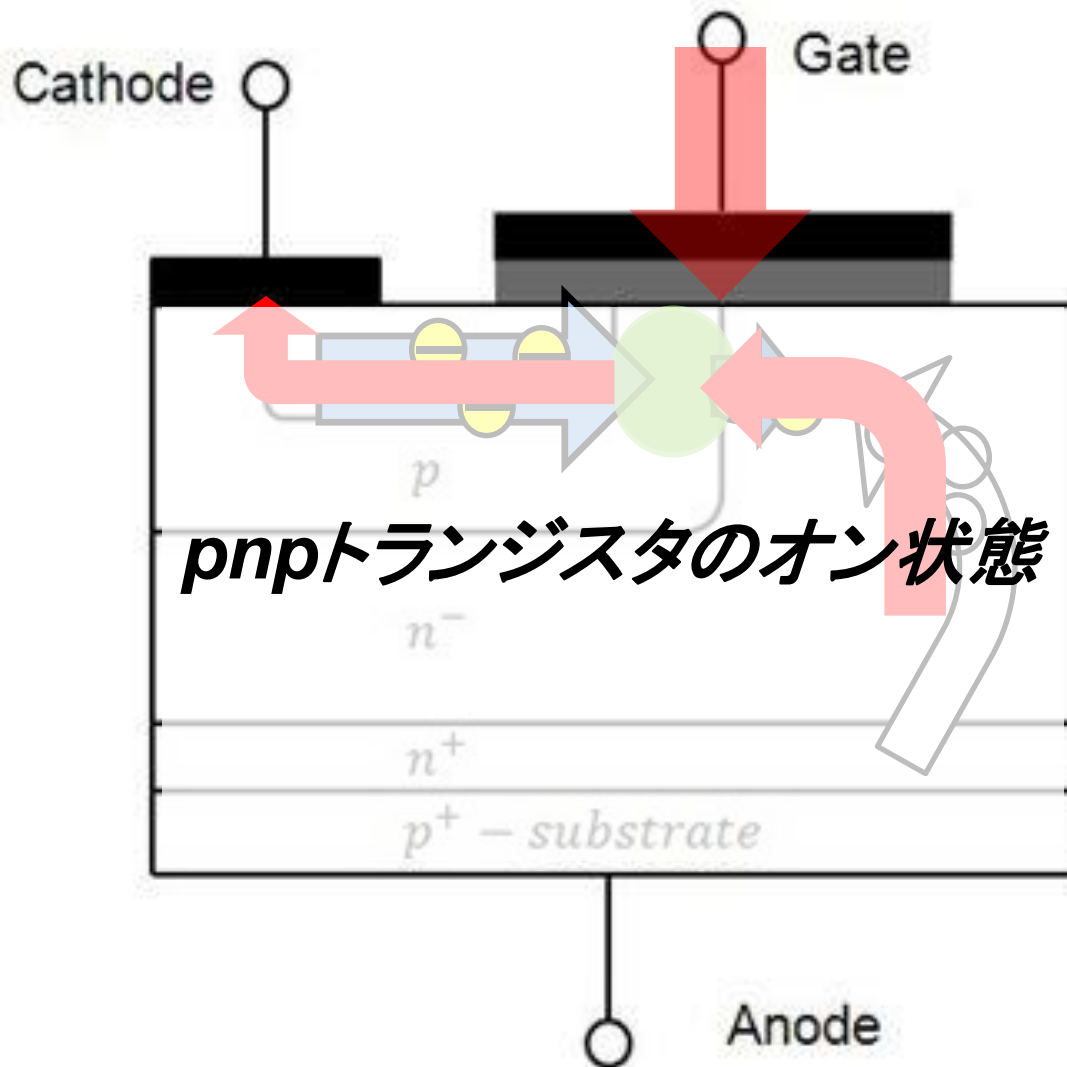


IGBTの簡易化デバイス構造

IGBTの導通

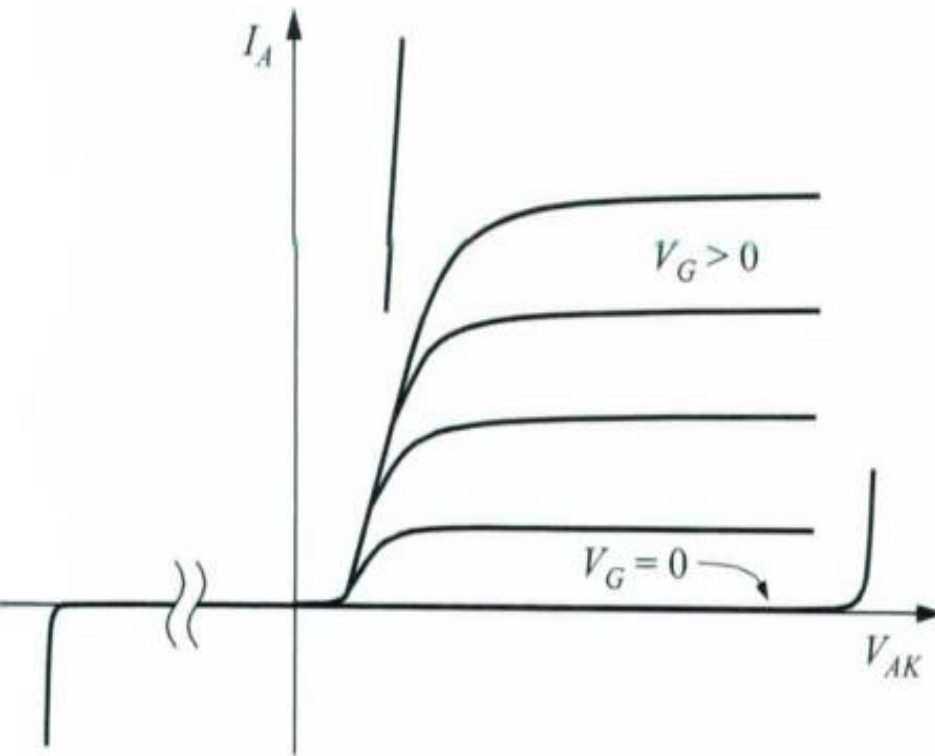


IGBTの簡易化デバイス構造



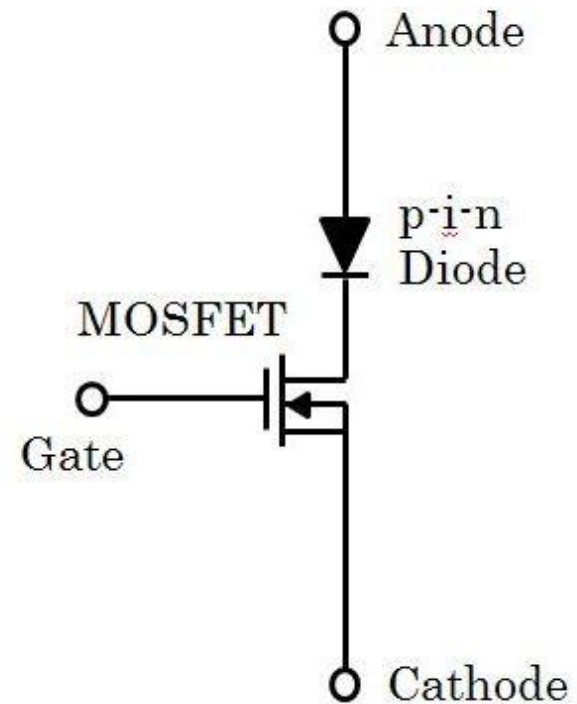
IGBTの簡易化デバイス構造

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 ($V_{AK} > 0.7 \text{ V}$)

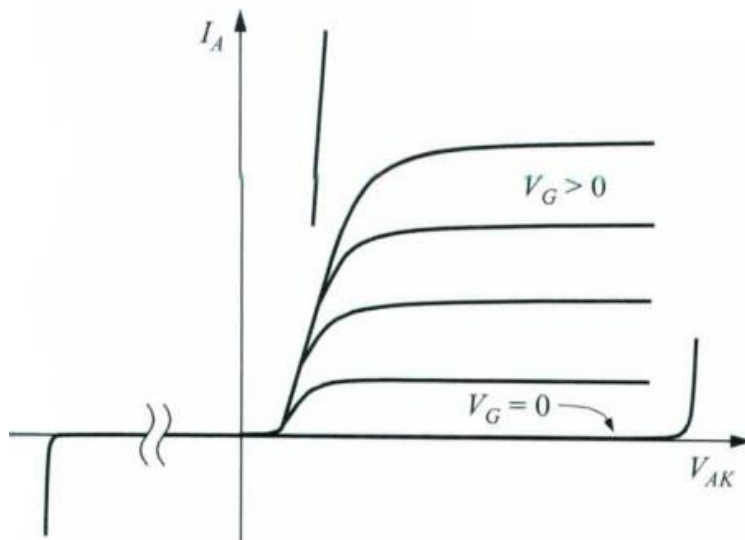
アノード電流：

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

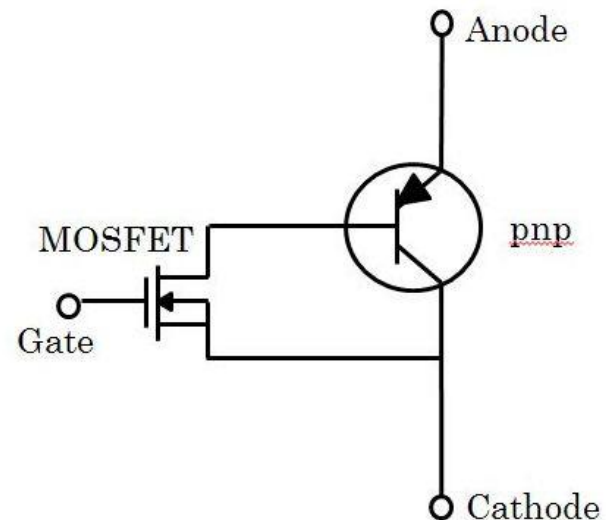
$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

ベースのトランスポート係数：

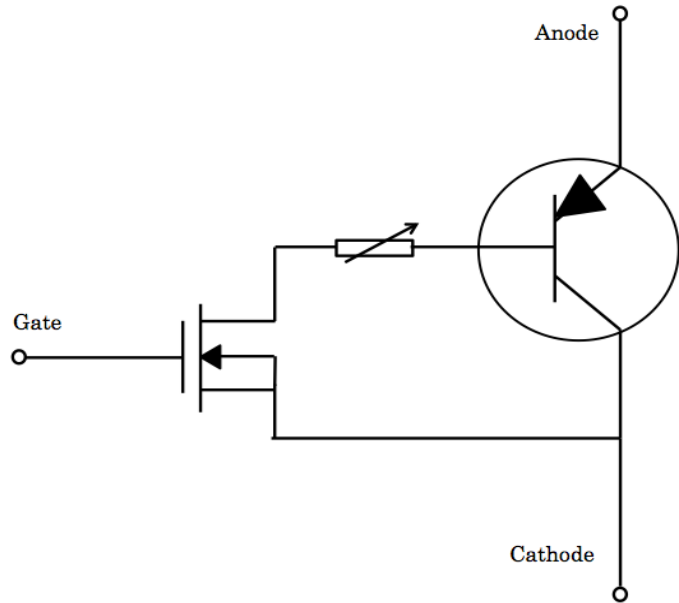
$$\alpha \approx \alpha_T \approx \frac{1}{\text{csch}(x_{nn}/L_n)}$$



IGBTの出力電流・電圧特性

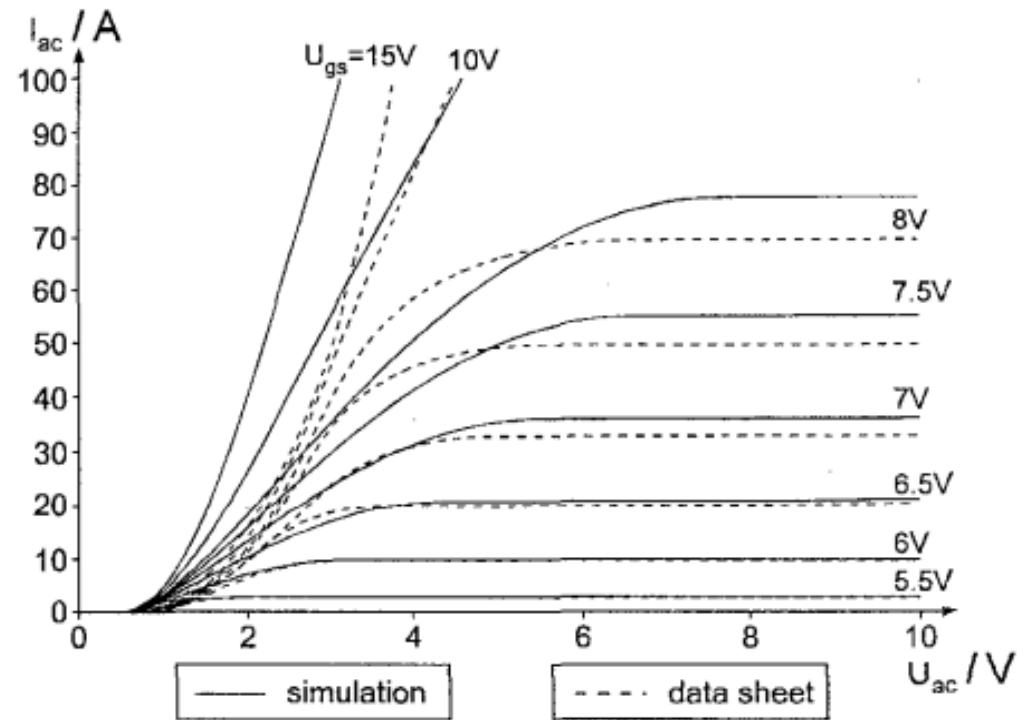


$V_{AK} > 0.7 \text{ V}$ の時IGBTの等価回路

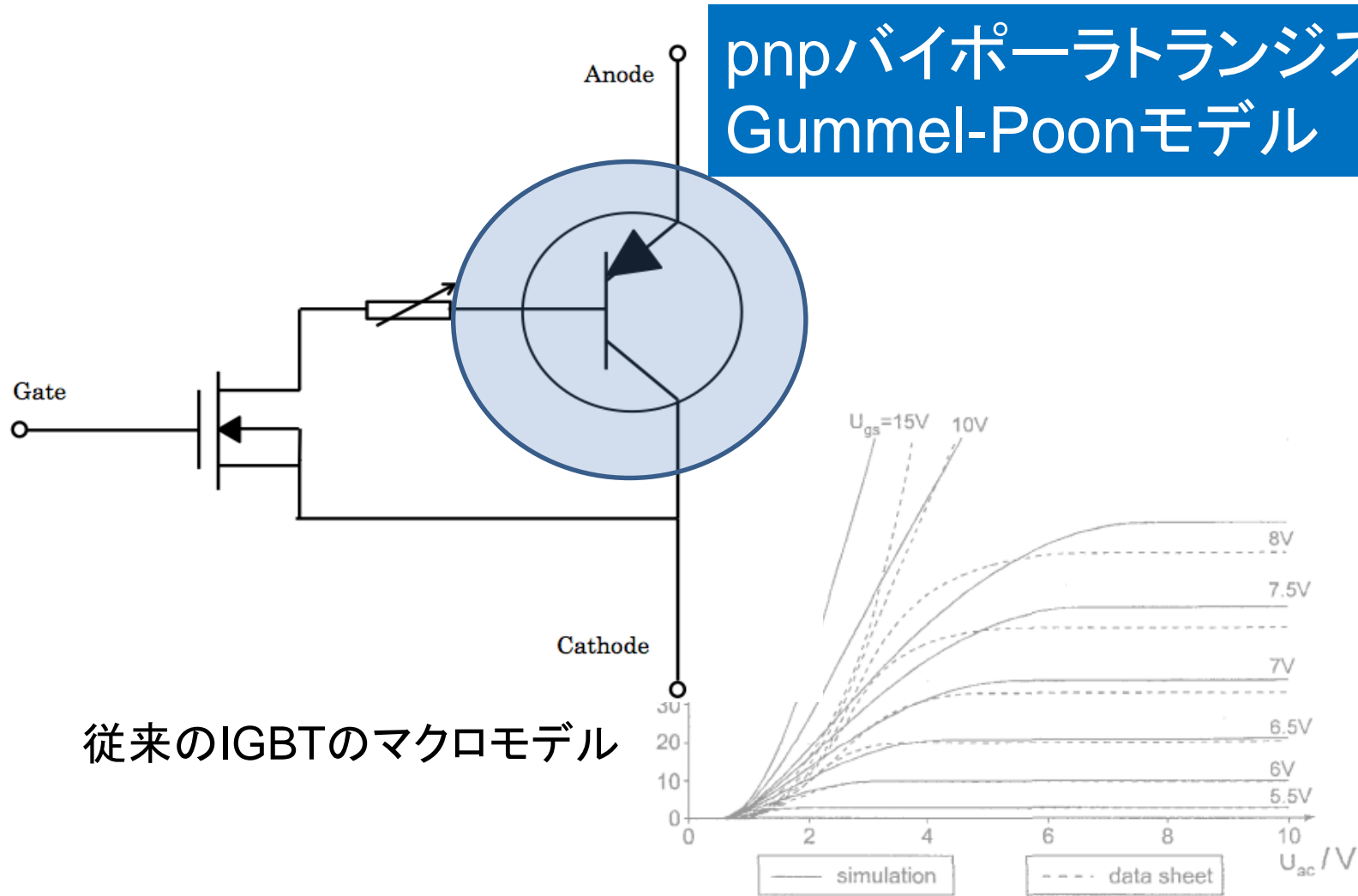


従来のIGBTのマクロモデル

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)

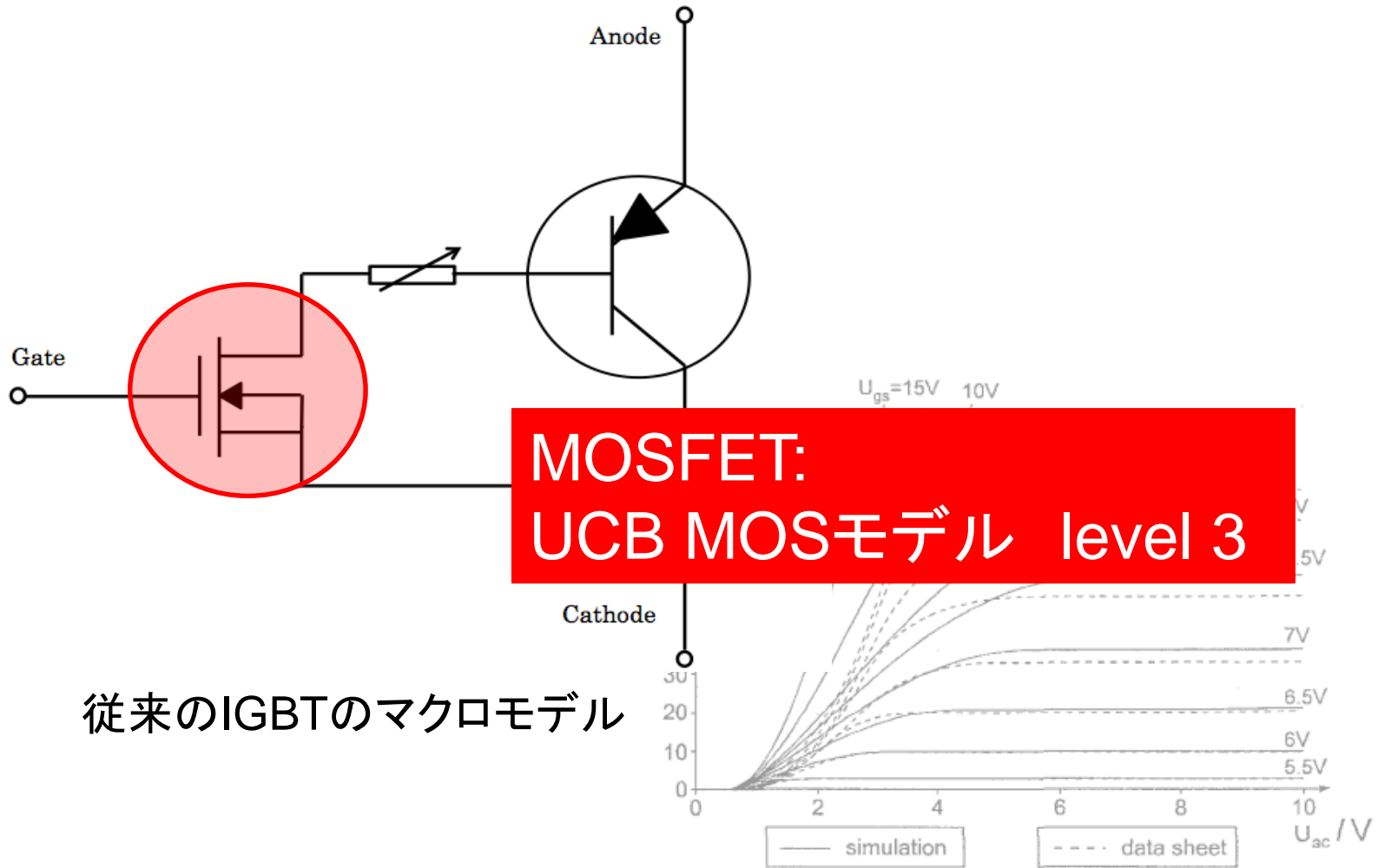


従来のIGBTの静特性と測定データの比較

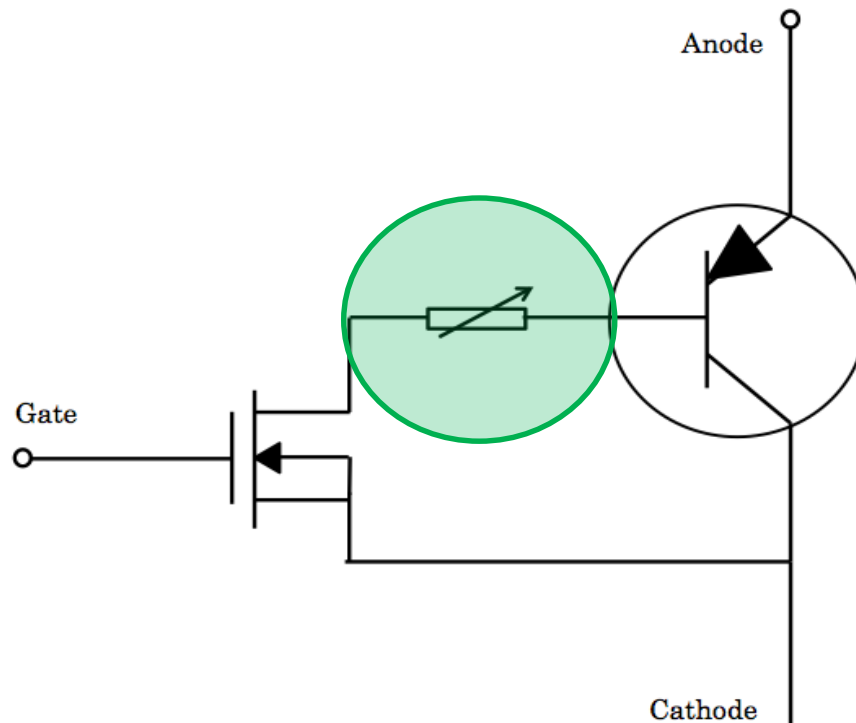


従来のIGBTの静特性と測定データの比較

従来のIGBTマクロモデル

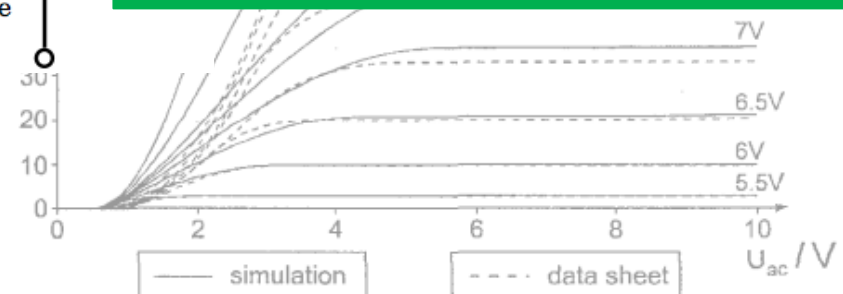


従来のIGBTマクロモデル

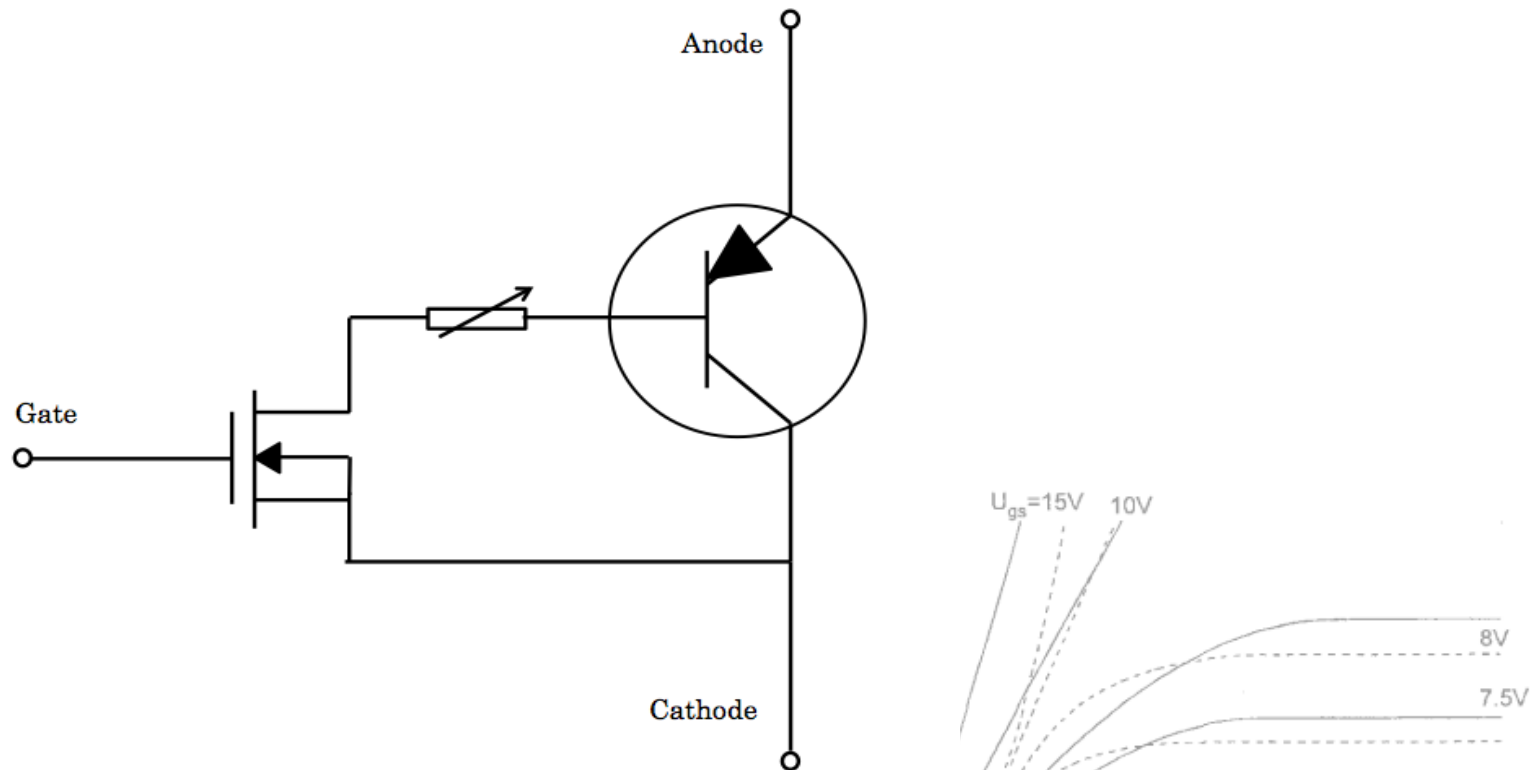


従来のIGBTのマクロモデル

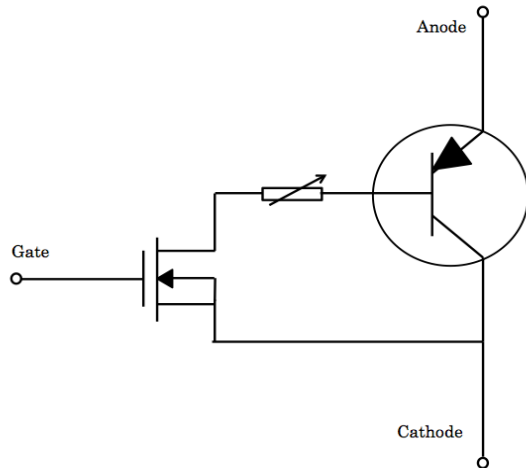
MOSFETのドレインとなるn-エピ層に、ゲート・ソース電圧によって制御される電流源(VCCS)により可変抵抗を表現



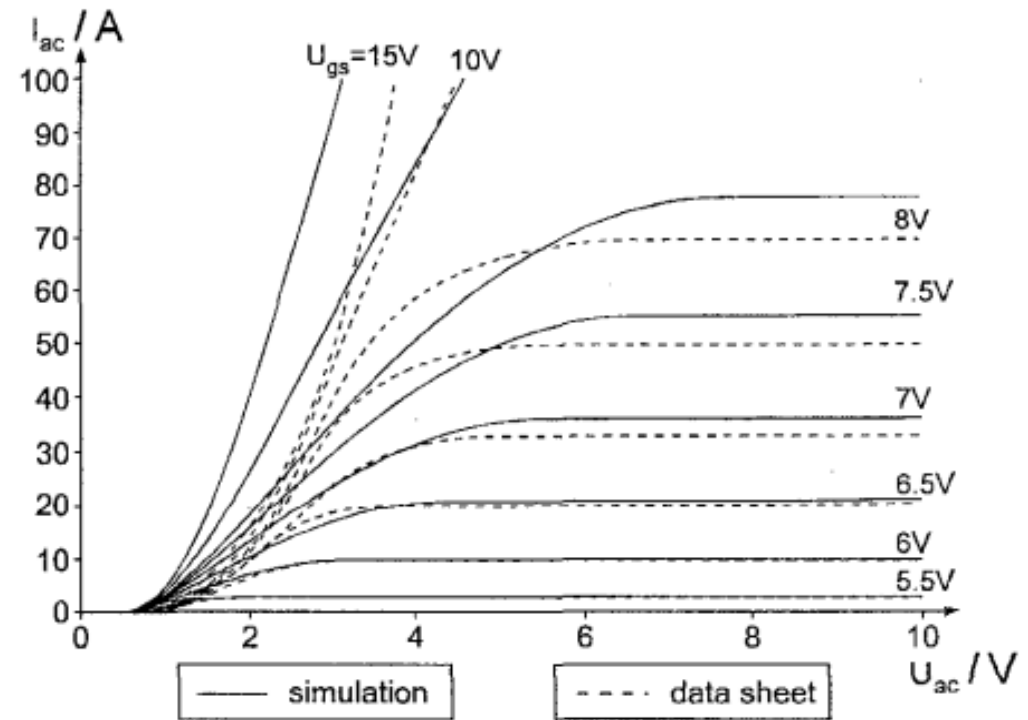
従来のIGBTの静特性と測定データの比較



- ・ 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

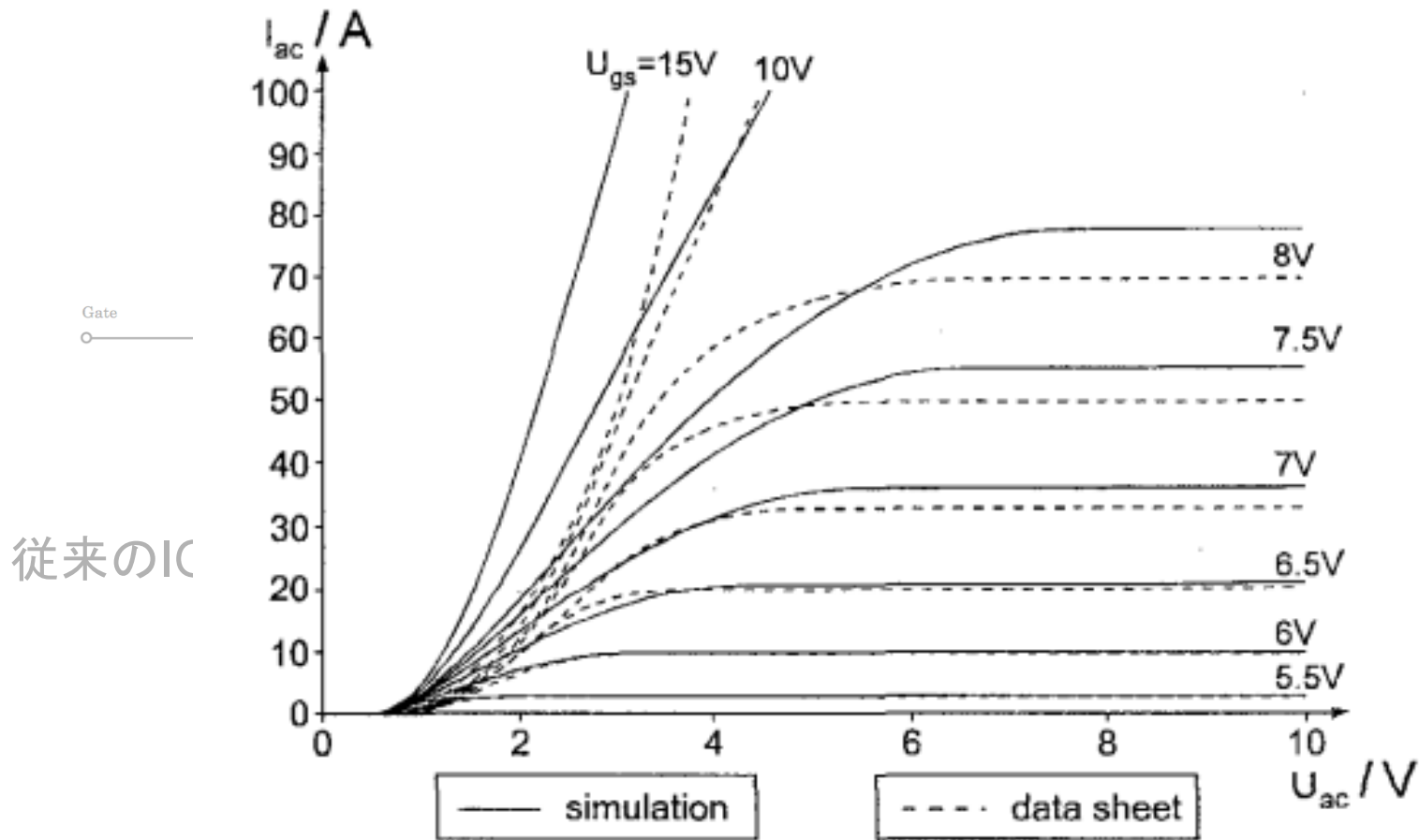


従来のIGBTのマクロモデル



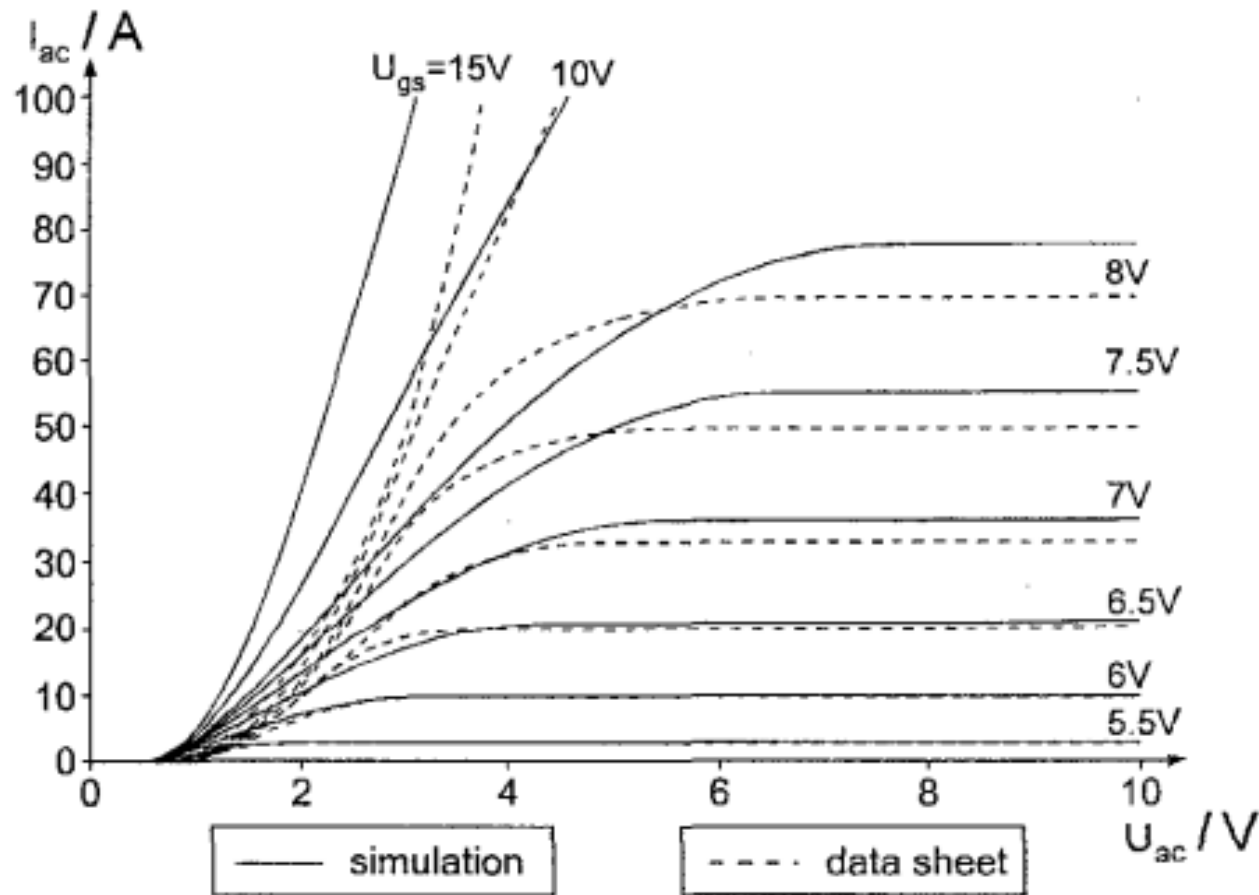
従来のIGBTの静特性と測定データの比較

従来のIGBTマクロモデル



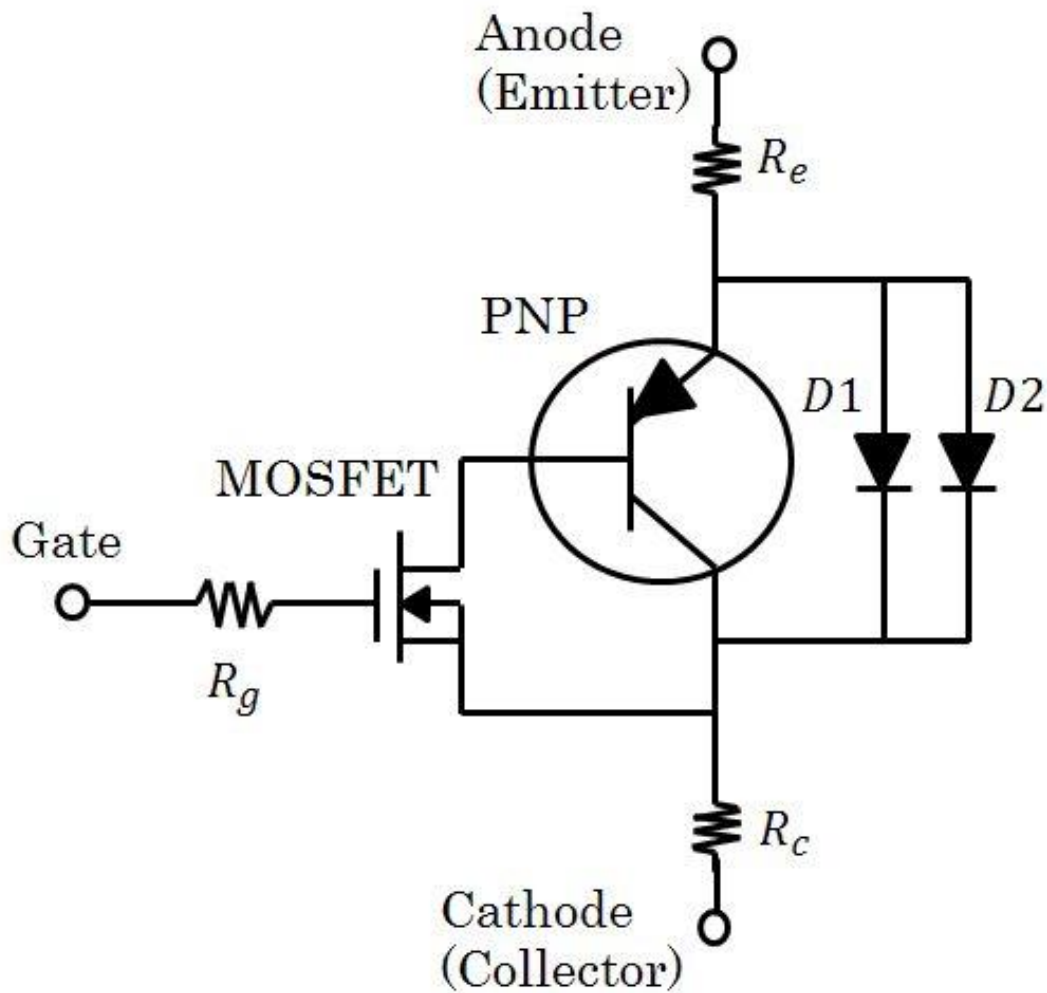
0. Apeldoorn, S. Schmitt, and R.W. De Doncker: "An Electrical Model of a NPT-IGBT Including Transient Temperature Effects Realized with PSpice Device Equations Modeling", IEEE Catalog, No. 97TH8280 pp.223-228 (1997)

従来の



**IGBTの静特性を
正確に表現できていない**

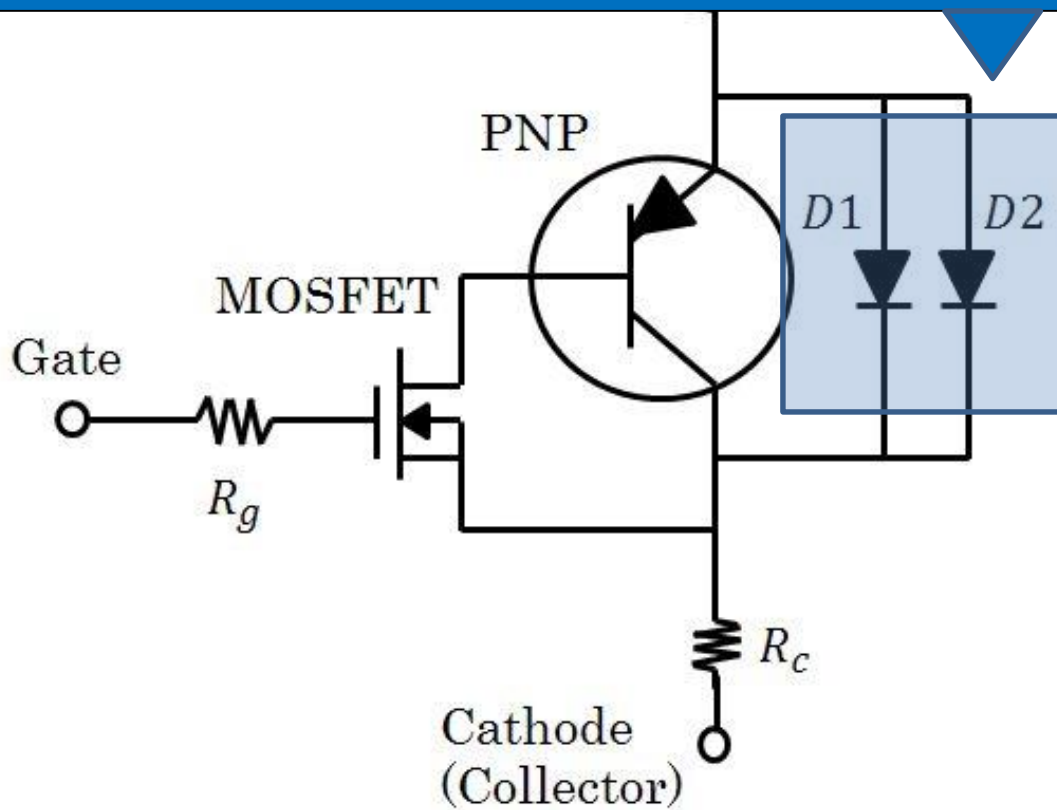
- はじめに
- IGBTの基本原理
- **マクロモデルの作成**
- モデルパラメータの
抽出・最適化とシミュレーション
- まとめ



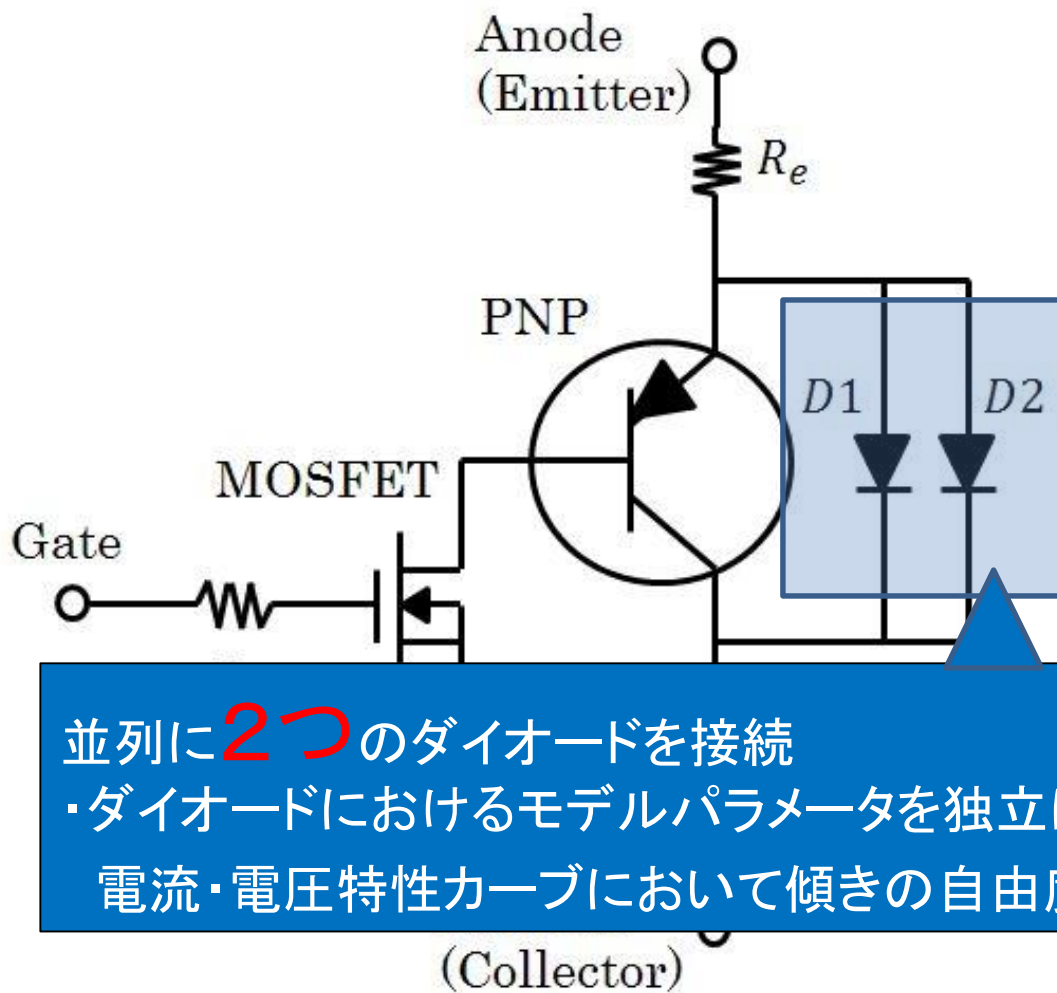
提案するIGBTのマクロモデル(A-IGBT)

並列に2つのダイオードを接続

- ・ 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



提案するIGBTのマクロモデル(A-IGBT)

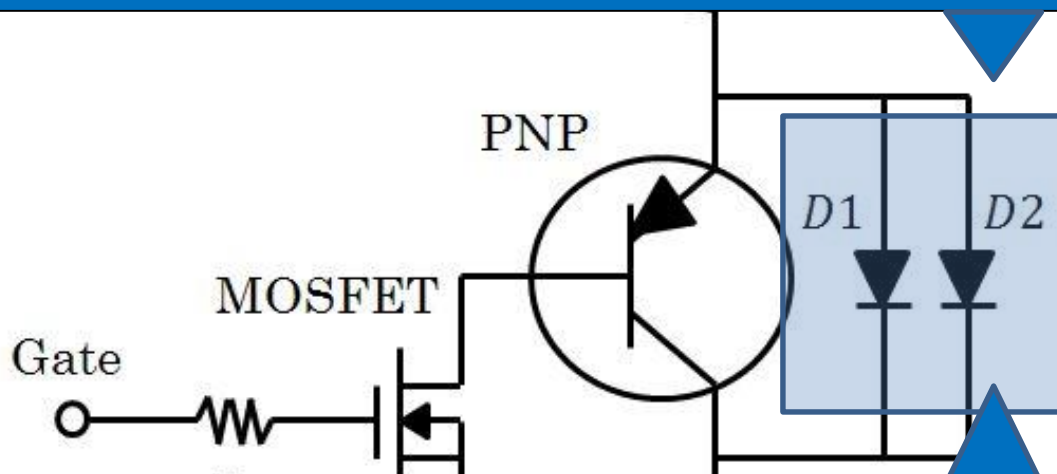


並列に**2つ**のダイオードを接続
・ダイオードにおけるモデルパラメータを独立に変化させて、
電流・電圧特性カーブにおいて傾きの自由度を上げる役割

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



並列に**2つ**のダイオードを接続

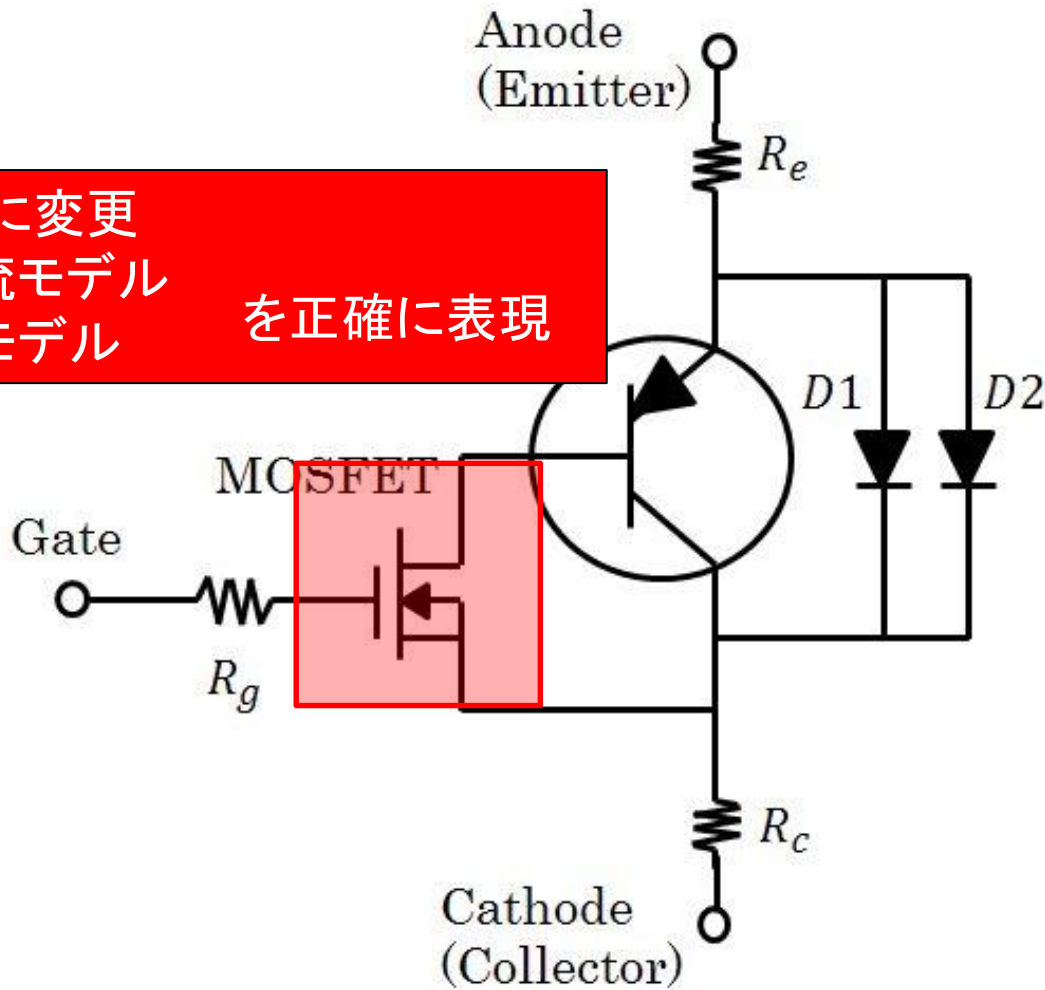
- ・ダイオードにおけるモデルパラメータを独立に変化させて、電流・電圧特性カーブにおいて傾きの自由度を上げる役割

(Collector)

提案するIGBTのマクロモデル(A-IGBT)

BSIM4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)

UCB MOS model level3

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_0}{1 + \frac{\mu_s \cdot V_{DS}}{V_{MAX} \times L_{eff}}}$$

$$\mu_s = \frac{U_0}{1 + THETA(V_{GS} - V_{TH})}$$

BSIM4

$$\mu_{eff} = \frac{U_0 \cdot f(L_{eff})}{1 + [UA(\frac{V_{gsteff} + 2V_{th}}{TOXE}) + UB(\frac{V_{gsteff} + 2V_{th}}{TOXE})^2] \dots}$$
$$\dots \frac{\dots}{(1 + UC \cdot V_{vseff}) + UD(\frac{V_{th} \cdot TOXE}{V_{gsteff} + 2V_{th}})^2}$$

UCB MOS model level3

$$R_d = const$$

BSIM4

出力抵抗を出力抵抗特性を含んだドレイン電流で表現
飽和領域における

- ・チャンネル長変調効果
- ・DIBL効果(ドレイン誘導障壁低下)
- ・ホットエレクトロン効果

の領域でモデルを考える

$$I_{ds} = \frac{I_{dso} \cdot NF}{1 + \frac{R_{ds} I_{dso}}{V_{dseff}}} \left[1 + \frac{1}{C_{clm} \log e \left(\frac{V_A}{V_{Asat}} \right)} \right] \cdot \left(1 + \frac{V_{ds} - V_{dseff}}{V_{ADIBL}} \right) \left(1 + \frac{V_{ds} - V_{dseff}}{V_{ADITS}} \right) \left(1 + \frac{V_{ds} - V_{dseff}}{V_{ASCBE}} \right)$$

- 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
- ・富士電機製1MBH75D-060S

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

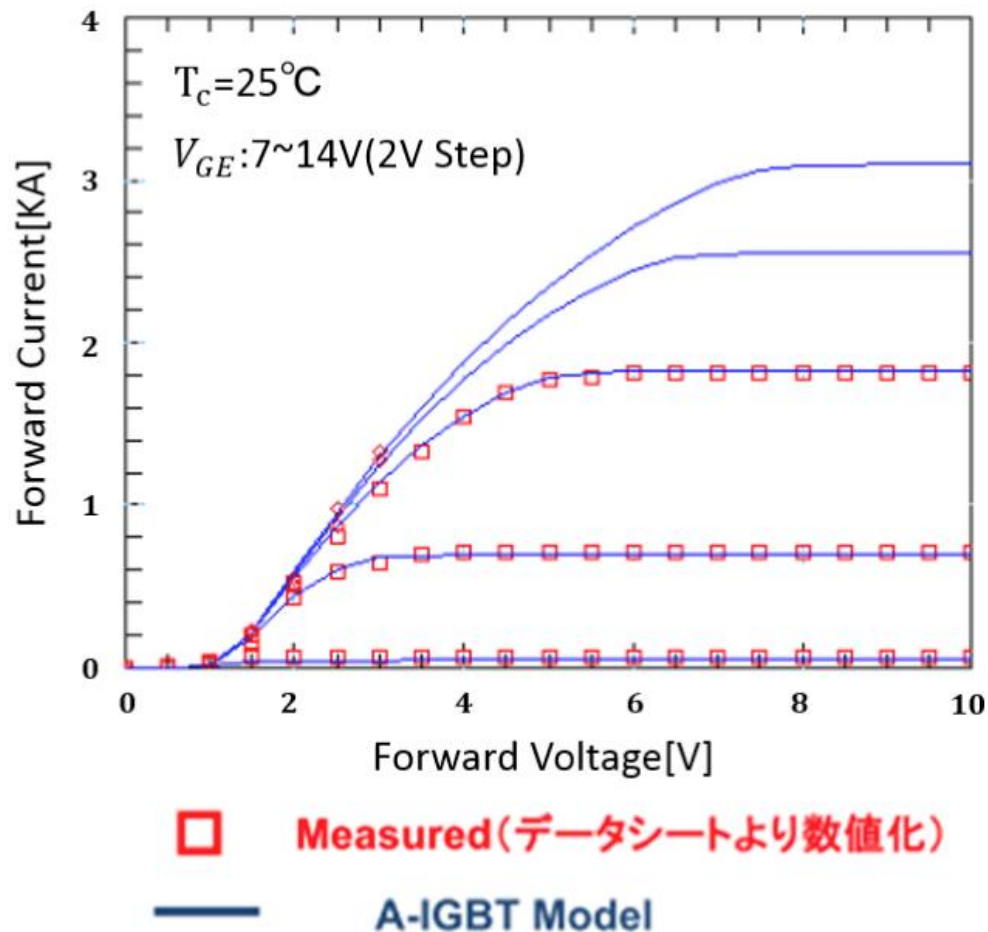
使用したDATA SHEET

- ・日立製IGBT MBN1200E33E
- ・富士電機製1MBH75D-060S

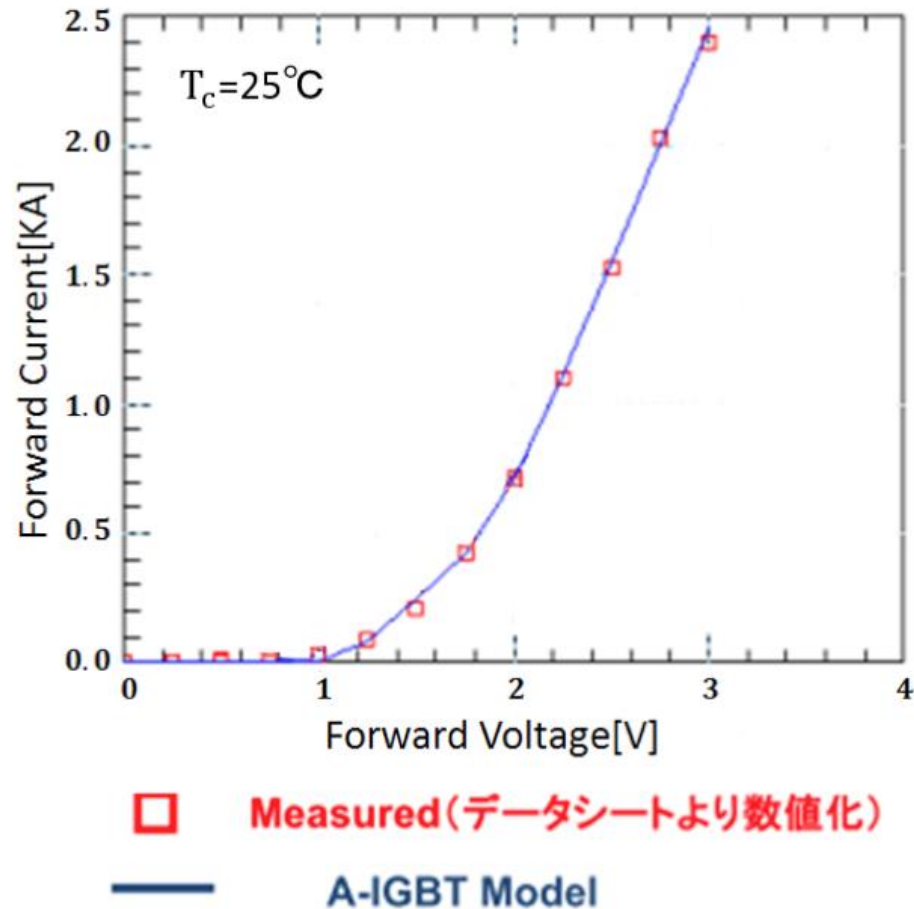
IGBTのマクロモデルをSPICEに実装

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

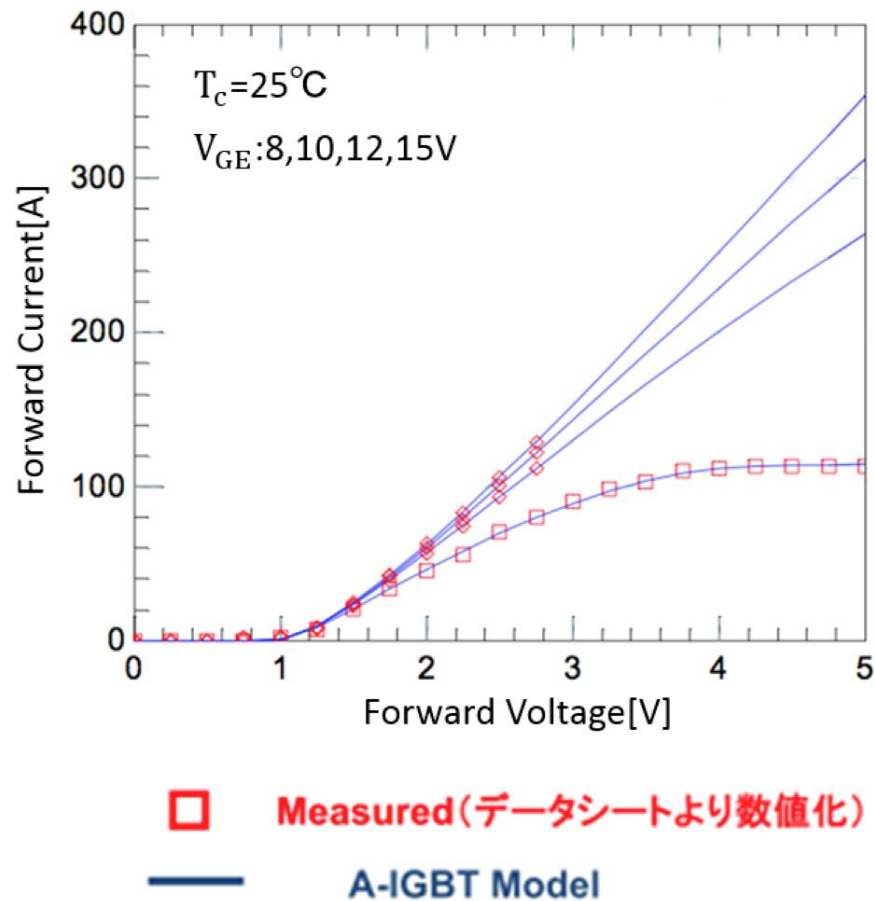
使用したDATA SHEET

- ・日立製IGBT MBN1200E33E
- ・富士電機製1MBH75D-060S

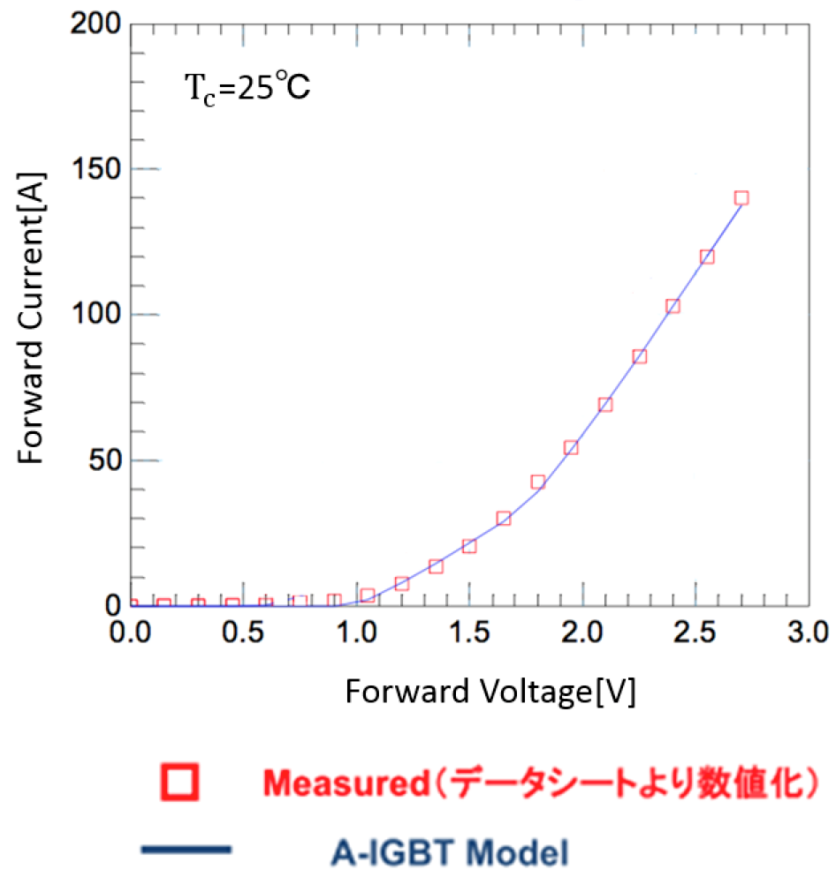
IGBTのマクロモデルをSPICEに実装

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



プロセス・デバイスが変わっても
正確にシミュレート可能



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
- 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BSIM4 に変更して表現
- 提案したマクロモデルでIGBTの静特性を表現でき
異なるプロセス・デバイス特性を考慮した
IGBTの静特性の高精度マクロモデルを作成

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