

栃木・群馬支所合同
電気学会研究発表会

ETT-16-71
ETG-16-71

IGBTのスイッチング特性における マクロモデルの研究

○香積 正基,
青木均, 戸塚拓也, 小林 春夫 (群馬大学)

群馬大学 理工学府 電子情報・数理教育プログラム
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
- シミュレーション比較
- 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
- シミュレーション比較
- まとめ

デバイスモデリングとは？

- デバイスモデル：
動作を方程式や等価回路により表現
- デバイスモデリング：
方程式の中には多くの変数がありデバイスに応じて変化
その変数を最適化し、高精度化

デバイスモデリングの重要性

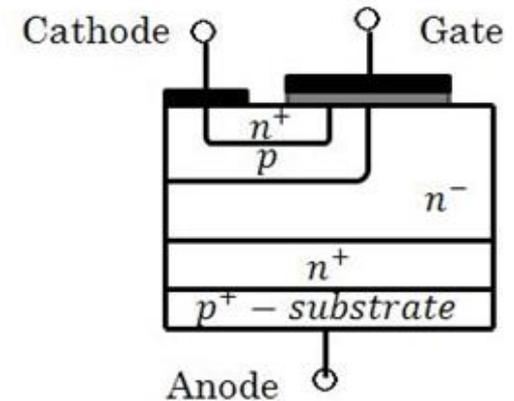
- ・回路シミュレーションを行う際、
測定値とシミュレーション値の差による過剰なマージン
- ・信頼性試験：コストや時間がかかる



シミュレーション環境を開発することで回避可能

絶縁ゲートバイポーラトランジスタ Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)

- ・高耐圧・大電流に適したパワー半導体
- ・絶縁ゲートによる電圧制御型

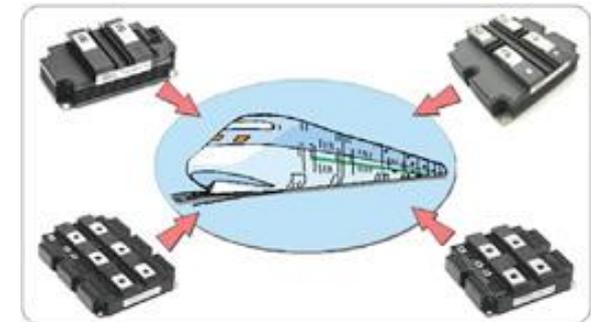


IGBTの簡易構造図

	Bipolar Transistor	MOSFET	IGBT
High voltage			
High speed switching			

IGBTの使用用途:

車載用高耐圧素子や鉄道車両制御など



高信頼性が求められるアプリケーションに使用

➡ 多くの回路シミュレーションソフトでの事前解析における高精度化は重要

現在のIGBT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IGBTシミュレーション環境

- ・SPICEの基本エレメントを組み合わせて開発
- ・動作温度を考慮
- ・スイッチング解析のための寄生容量を考慮

現在のIGBTシミュレーション環境

課題多

○実測の差が大きい

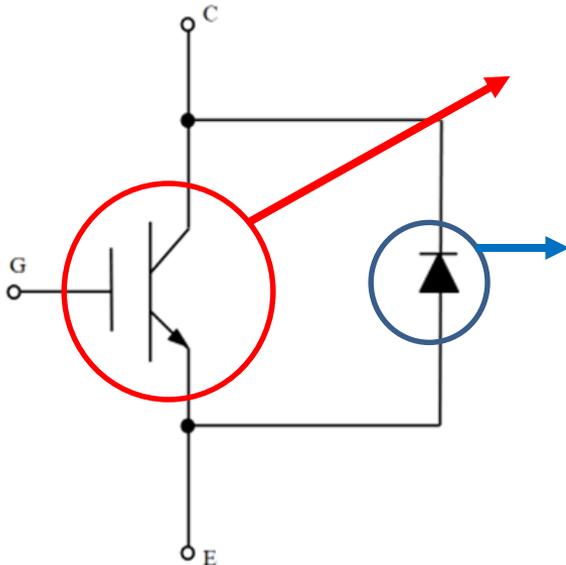
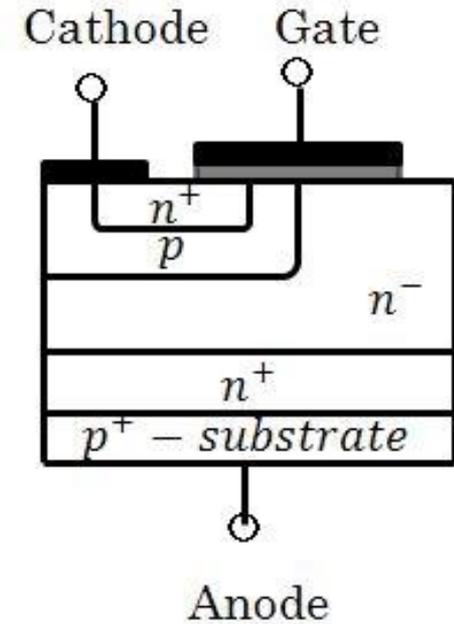
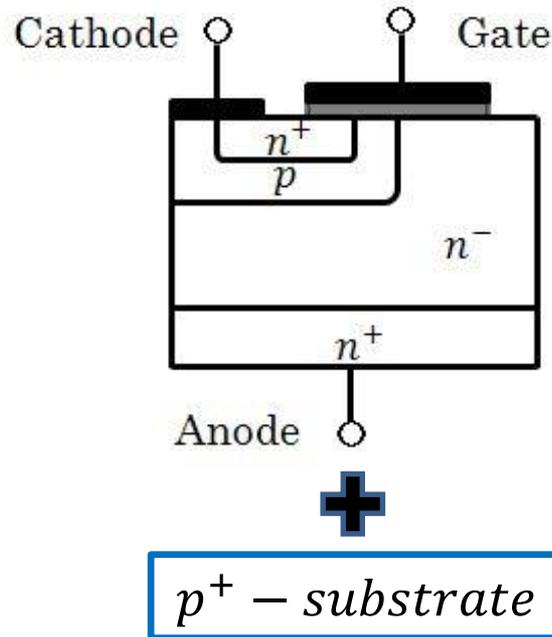
- ・n-層を流れるドリフト電流のモデル化不可
- ・DMOS出力抵抗が一定
- ・フリーホイールダイオードのシミュレーション不可 etc...

新しいIGBTシミュレーション環境

- ・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

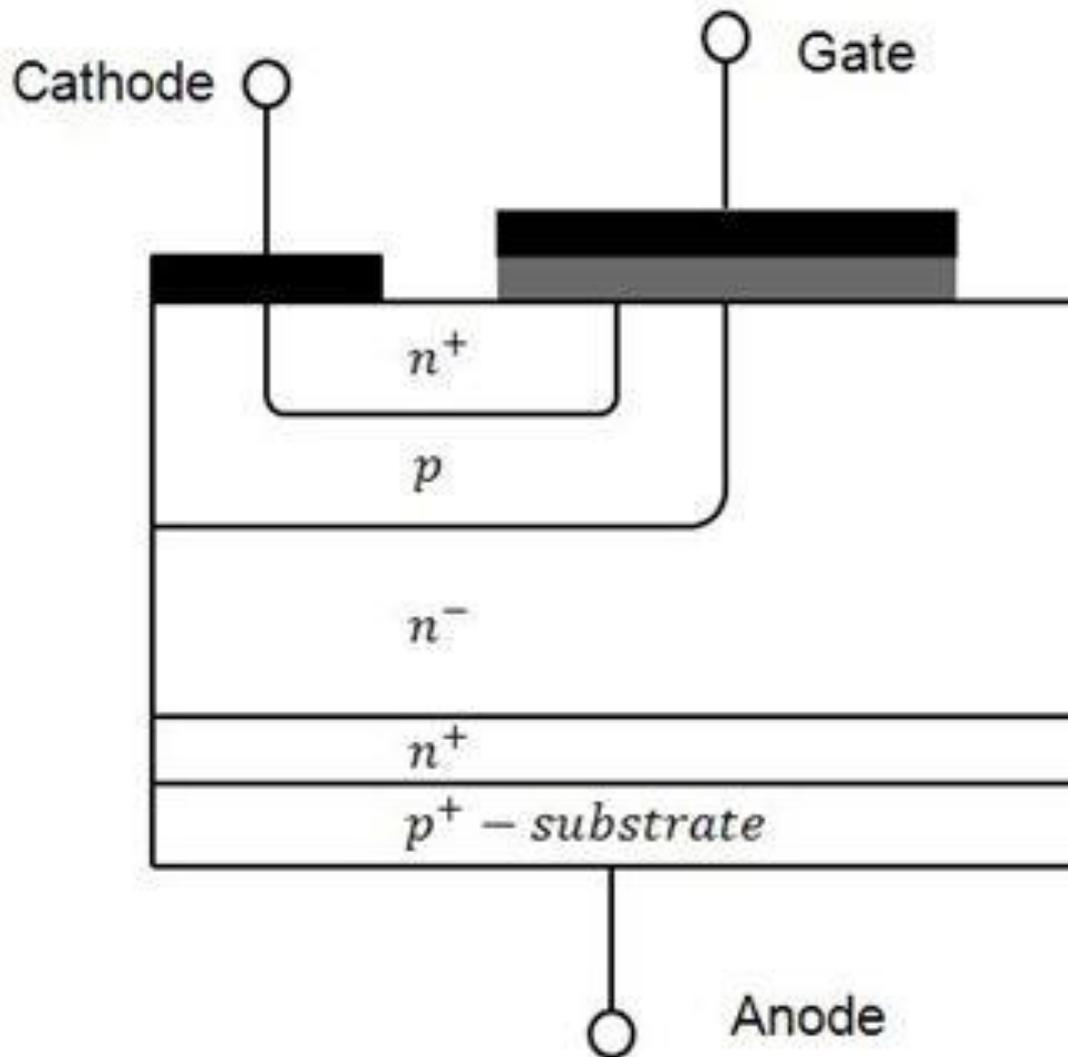
IGBTの構造



フリーホイールダイオード：

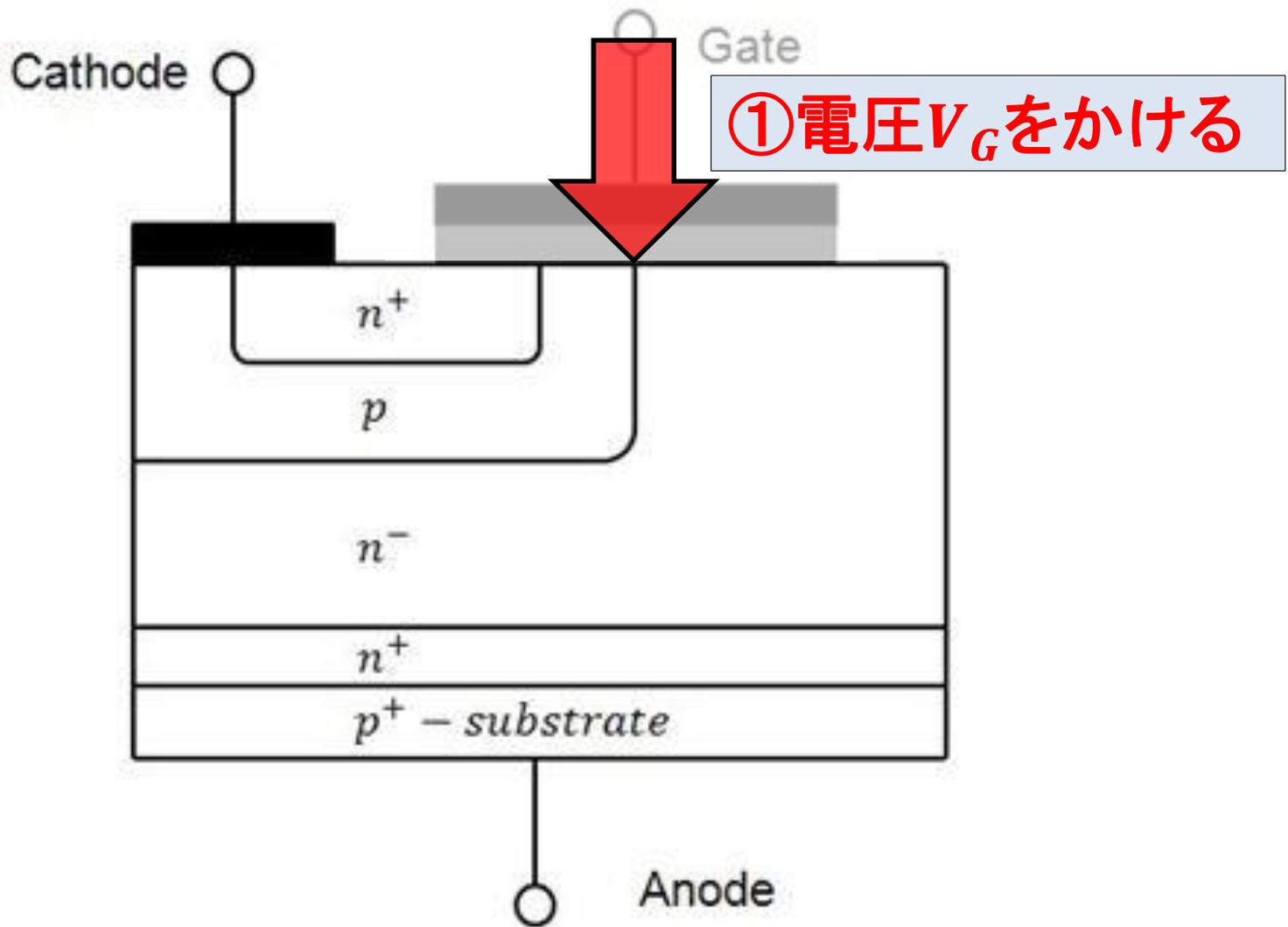
- ・コイル負荷に起きる起電力を放出される役割
- ・空乏層容量がターンオフ特性に影響

IGBTの断面図



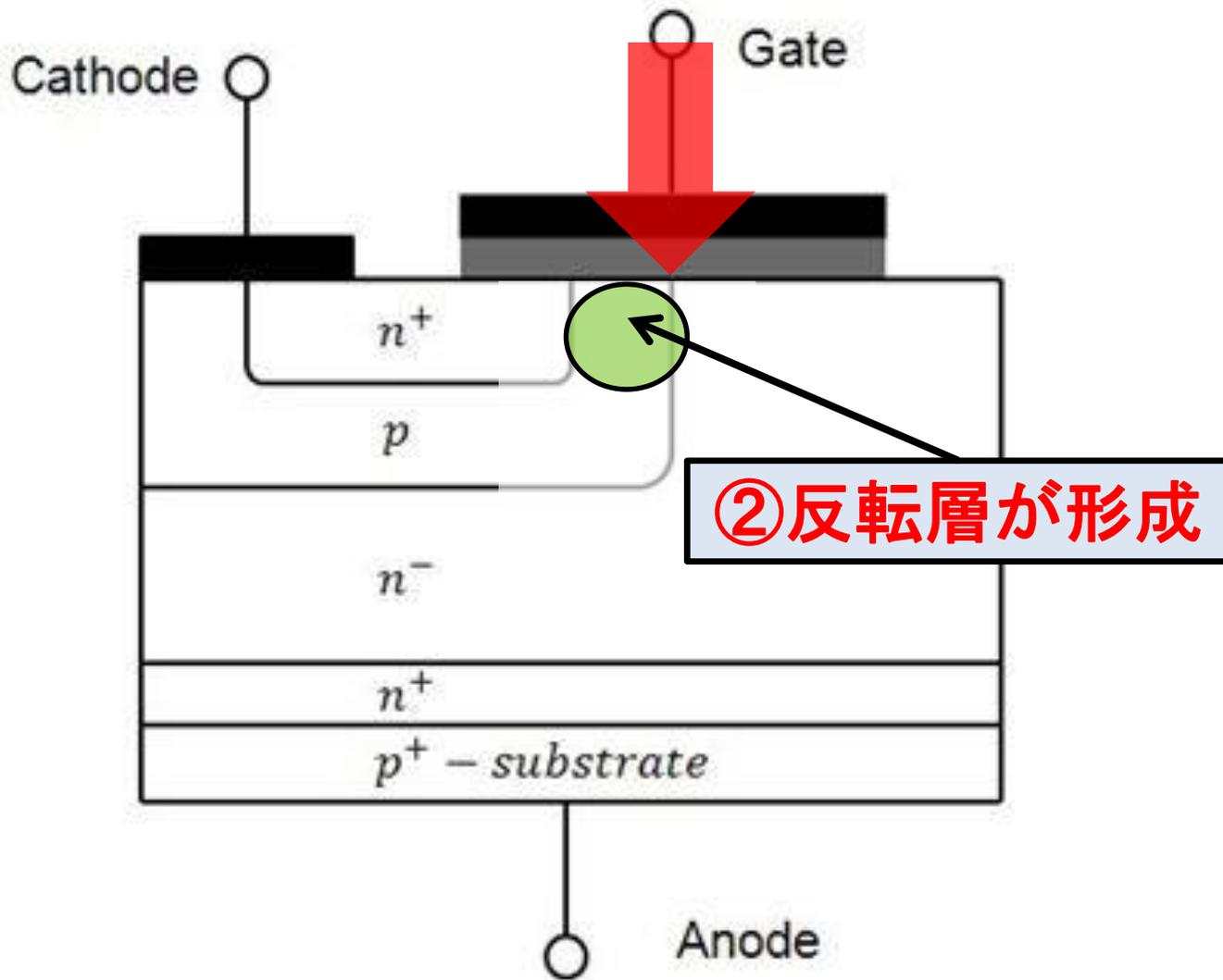
IGBTの簡易化デバイス構造

IGBTの導通



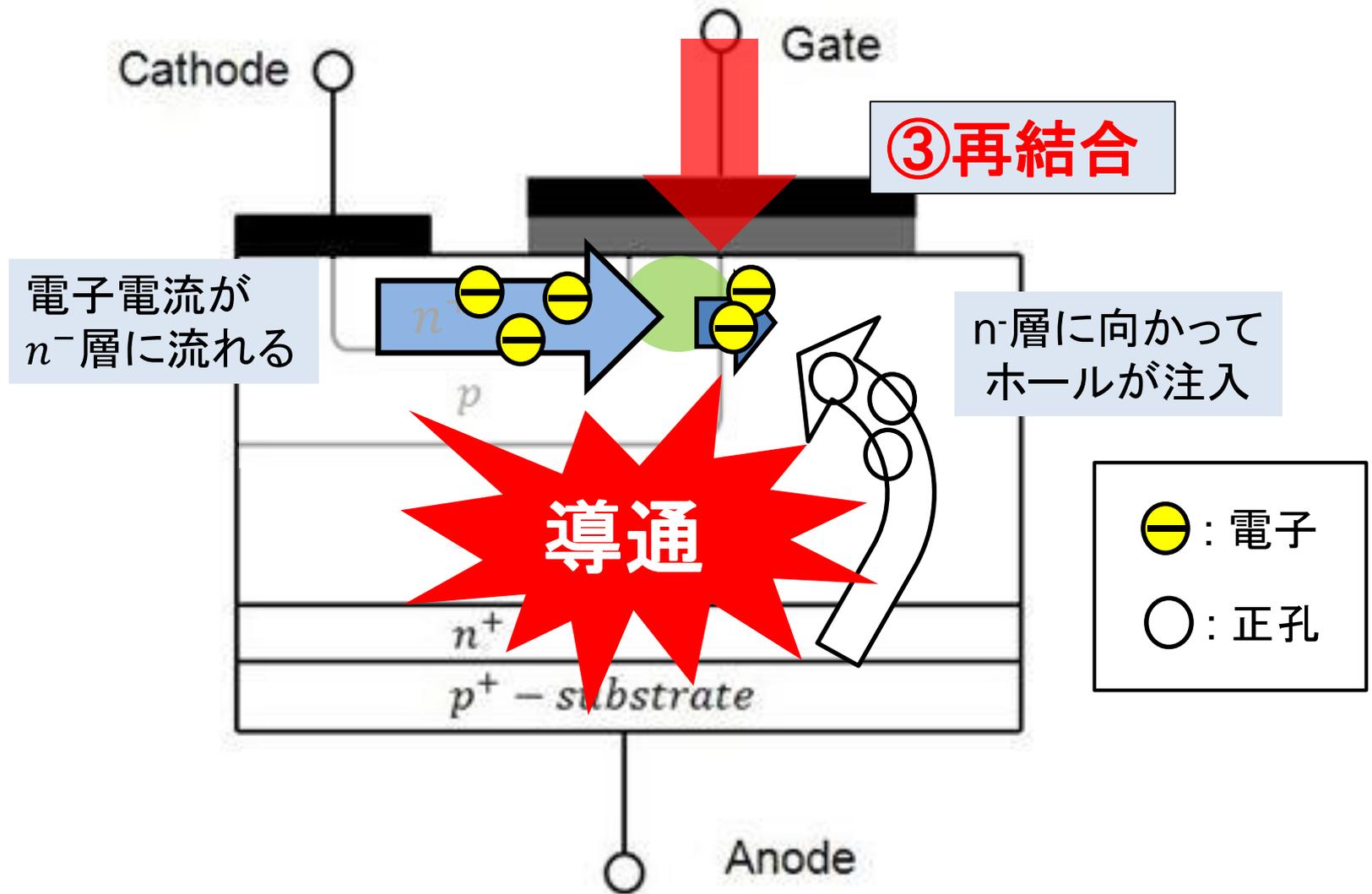
IGBTの簡易化デバイス構造

IGBTの導通



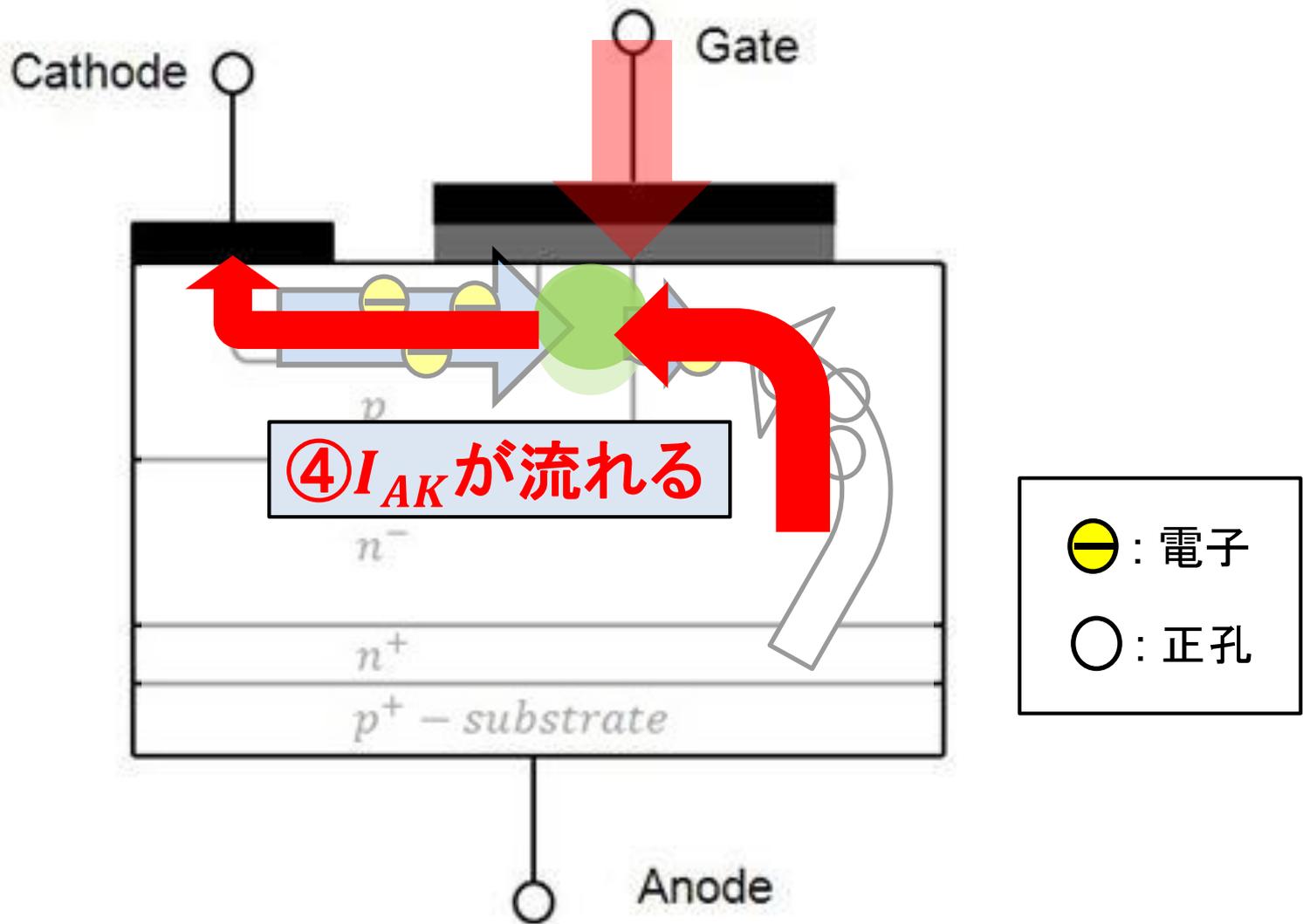
IGBTの簡易化デバイス構造

IGBTの導通

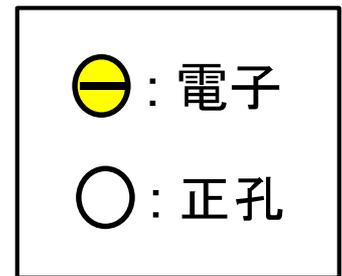
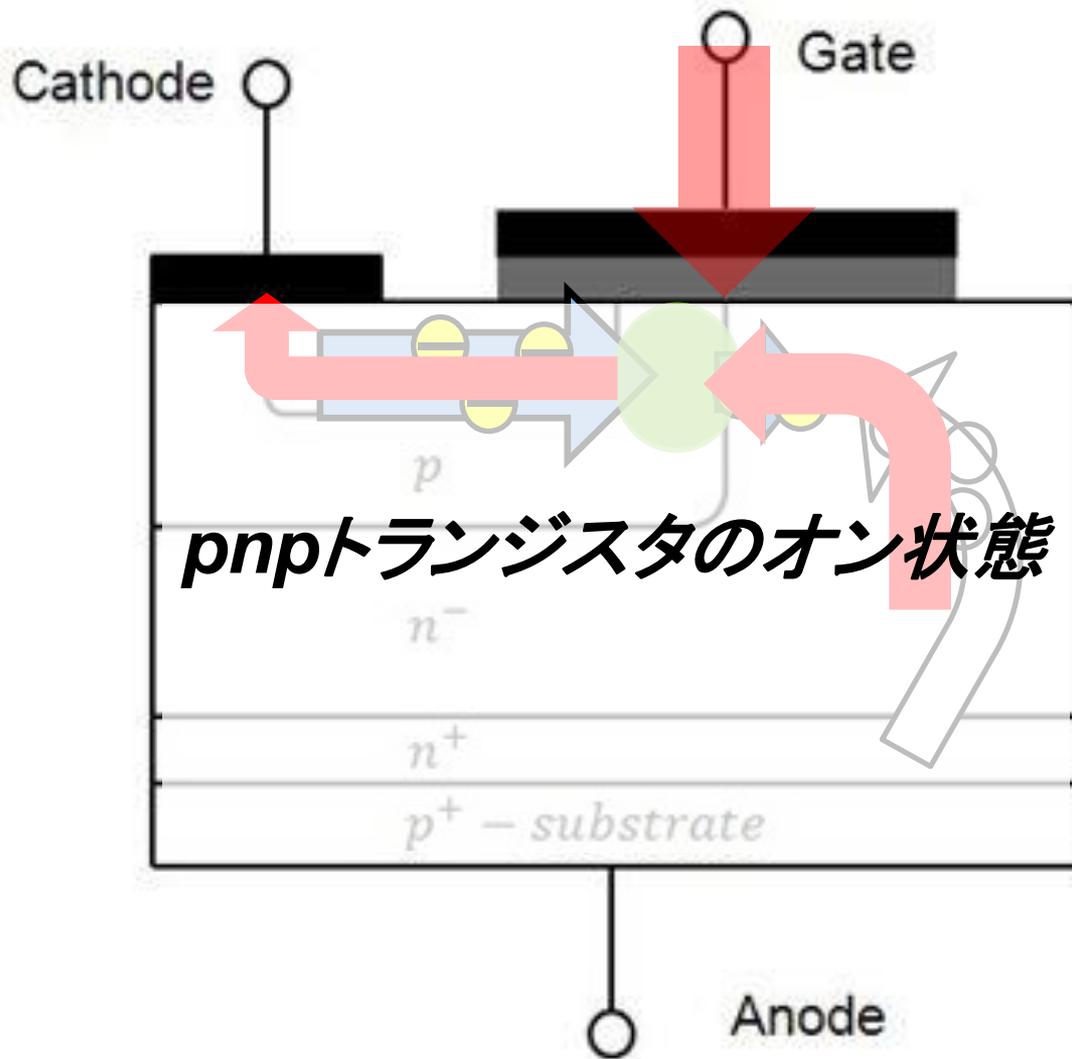


IGBTの簡易化デバイス構造

IGBTの導通

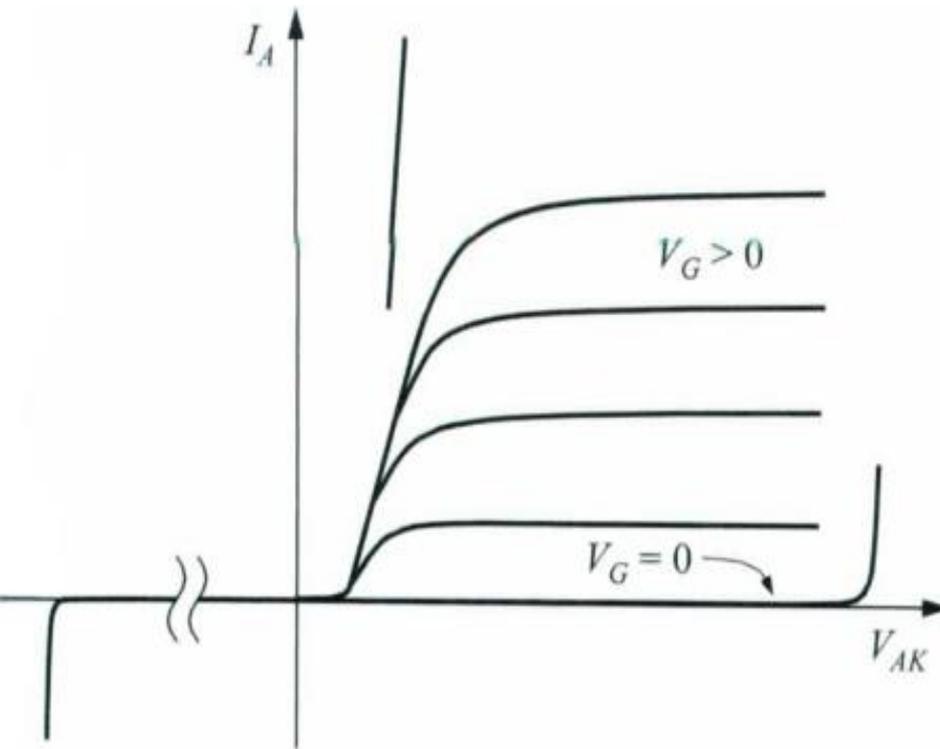


IGBTの簡易化デバイス構造

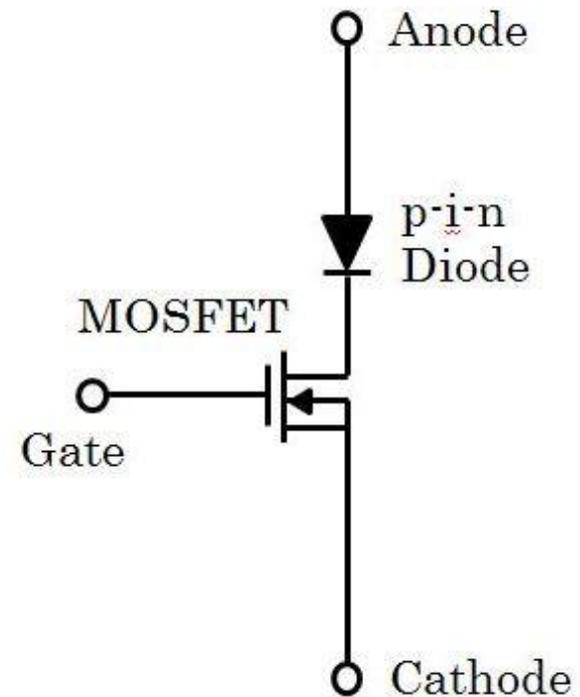


IGBTの簡易化デバイス構造

IGBTの静特性 ($V_{AK} < 0.7 \text{ V}$)



IGBTの出力電流・電圧特性



$V_{AK} < 0.7 \text{ V}$ の時IGBTの等価回路

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

IGBTの静特性 ($V_{AK} > 0.7 \text{ V}$)

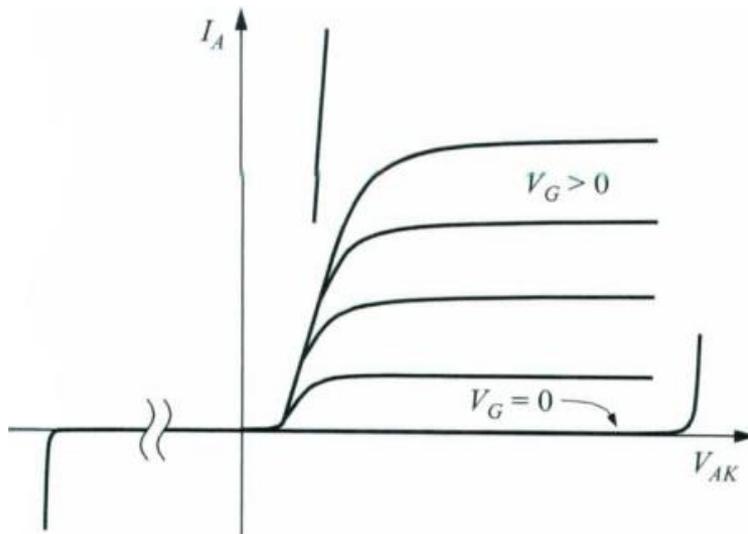
アノード電流：

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

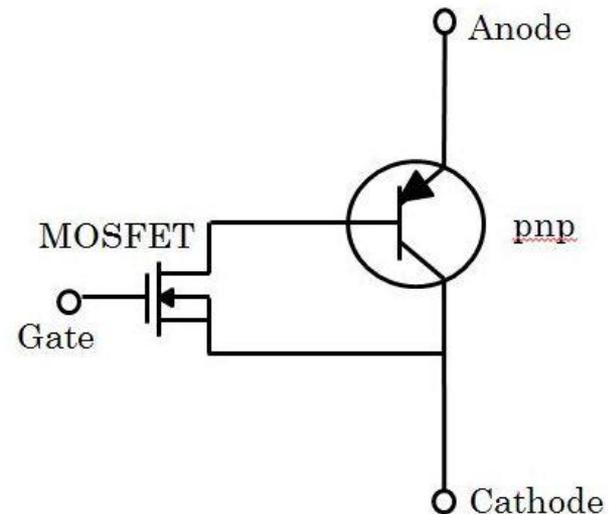
$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

ベースのトランスポート係数：

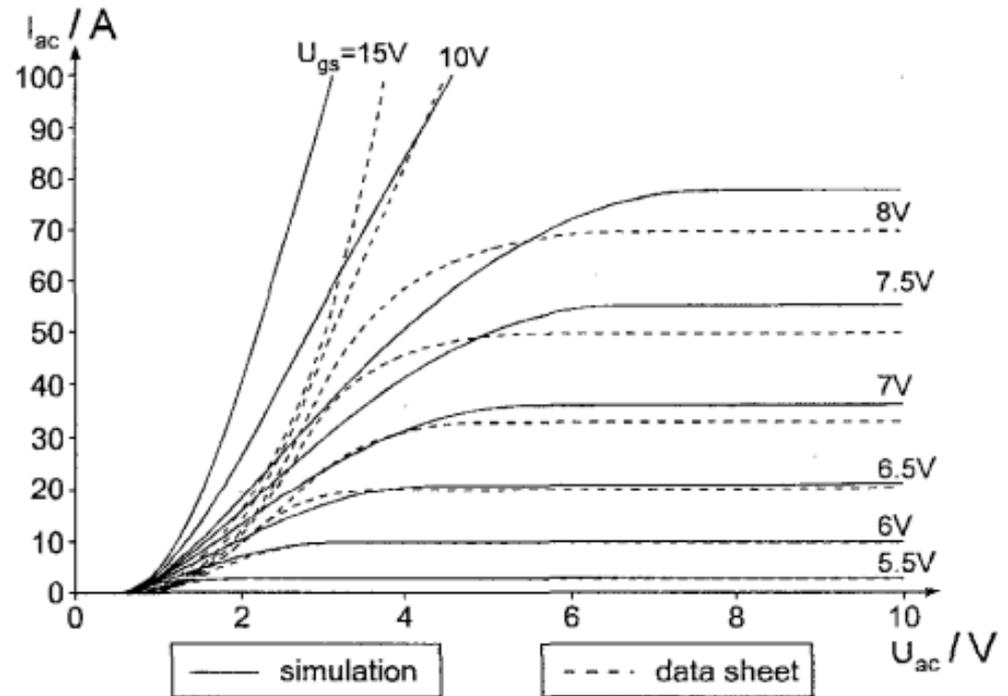
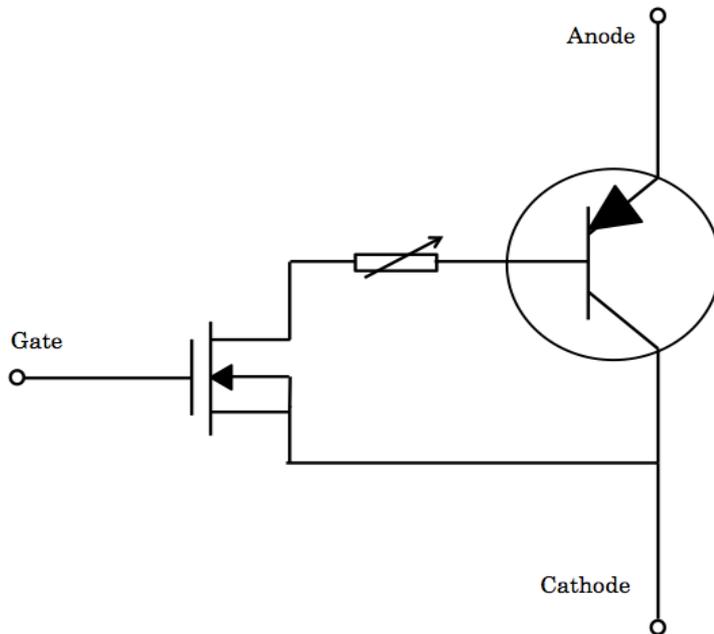
$$\alpha \approx \alpha_T \approx \frac{1}{\cosh(x_{nn}/L_n)}$$



IGBTの出力電流・電圧特性



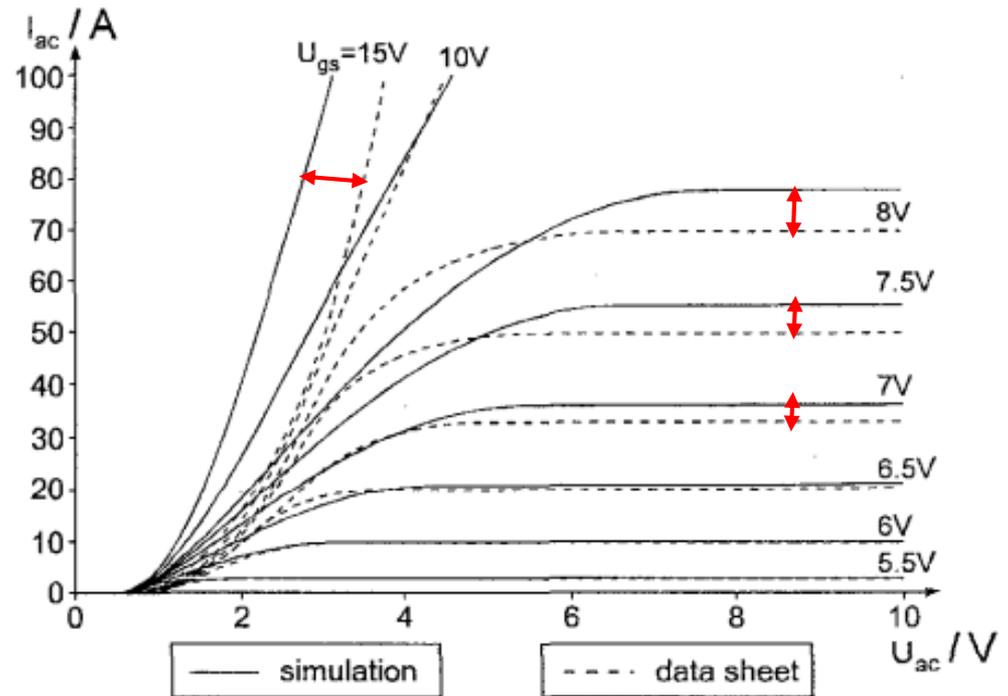
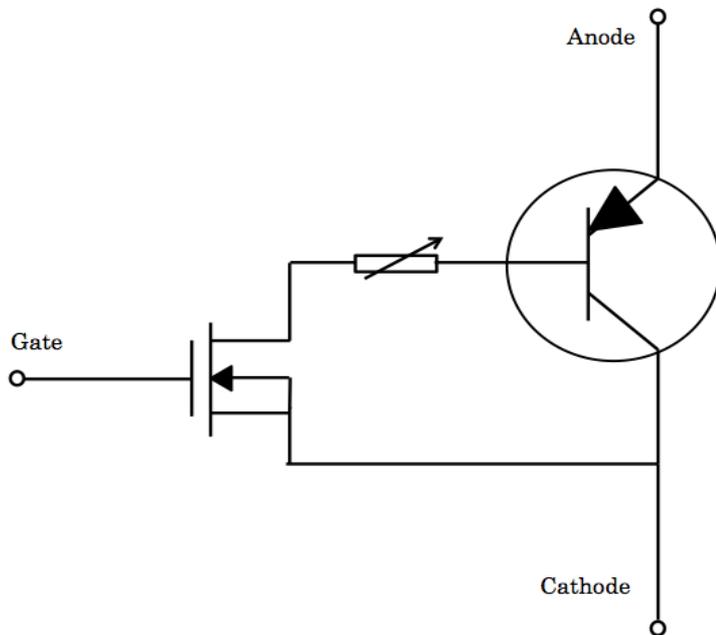
$V_{AK} > 0.7 \text{ V}$ の時IGBTの等価回路



従来のIGBTのマクロモデル

従来のIGBTの静特性と測定データの比較

0. Apeldoorn, S. Schmitt, and R.W. De Doncker, Department for Power Electronics and Electrical Drives: "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)



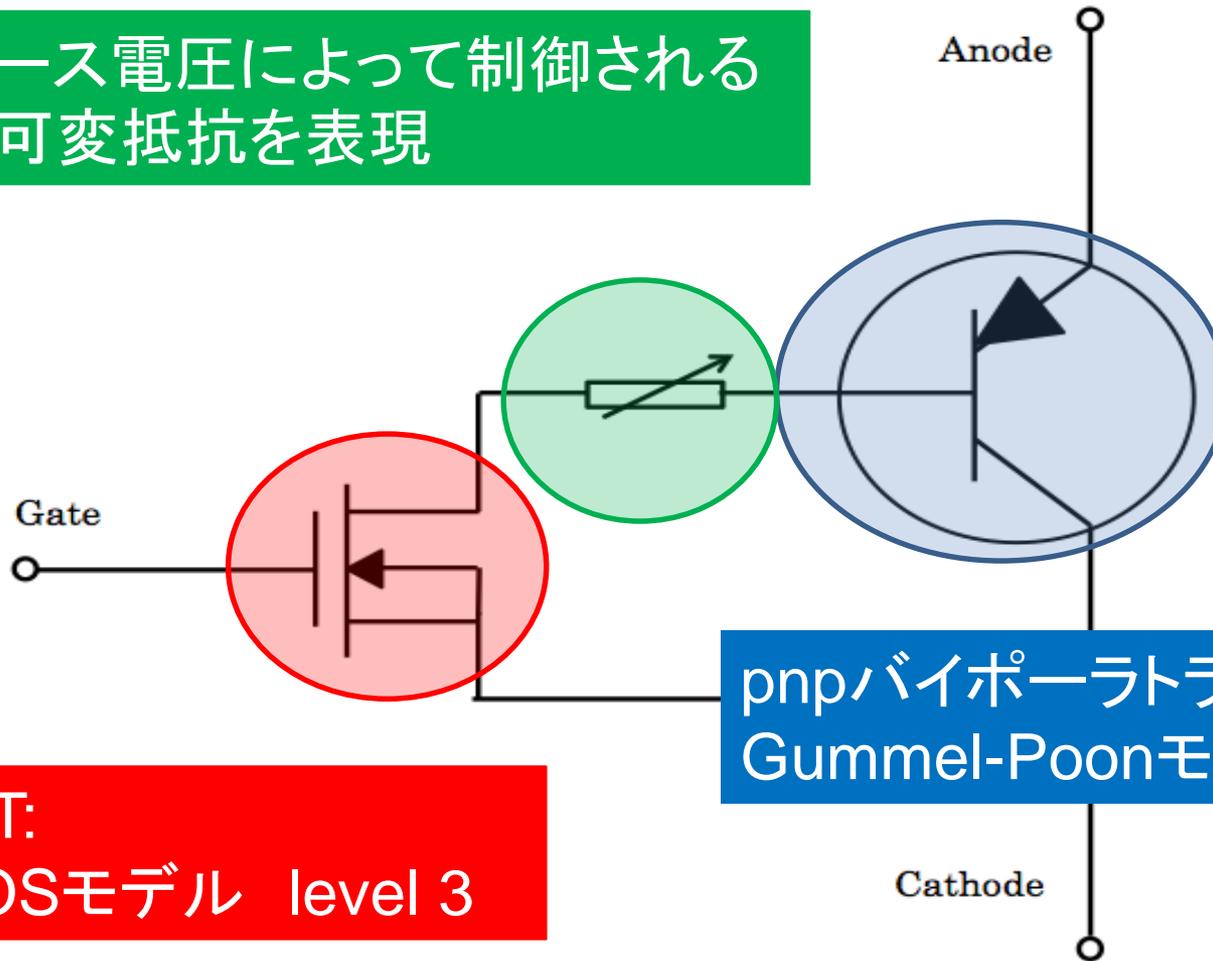
従来のIGBTのマクロモデル

従来のIGBTの静特性と測定データの比較

測定値とシミュレーション値の差が大きく
実用的ではない

従来のIGBTマクロモデル

ゲート・ソース電圧によって制御される
電流源で可変抵抗を表現

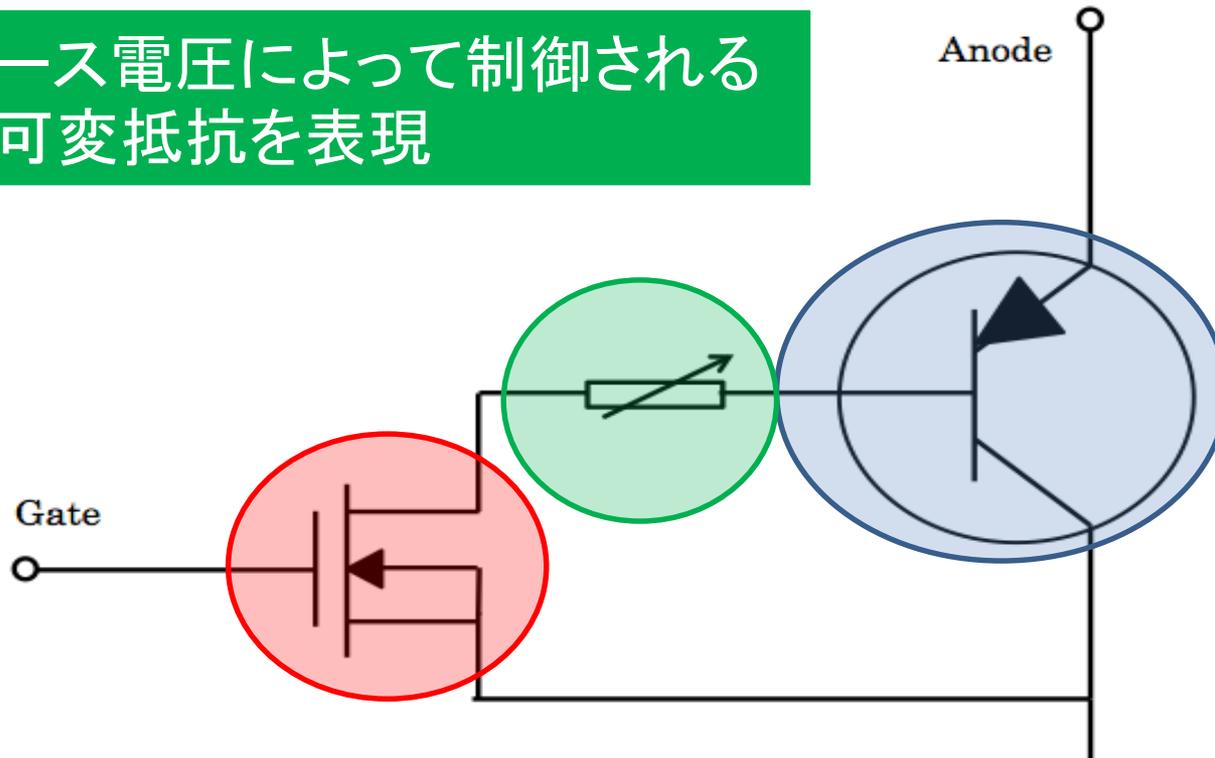


MOSFET:
UCB MOSモデル level 3

pnpバイポーラトランジスタ:
Gummel-Poonモデル

従来のIGBTマクロモデル

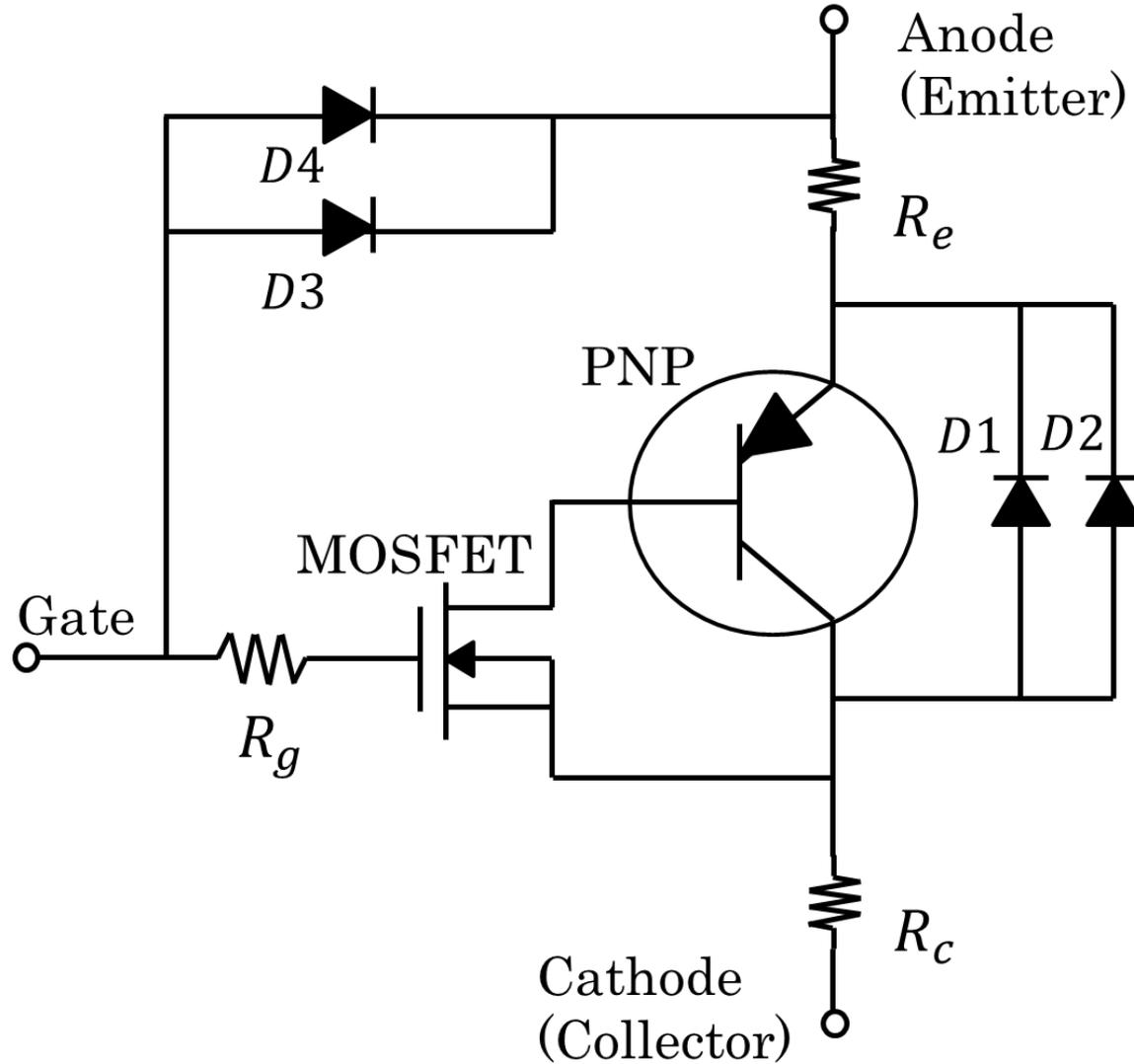
ゲート・ソース電圧によって制御される
電流源で可変抵抗を表現



- ・ 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
- ・トランジェント特性は考慮していない

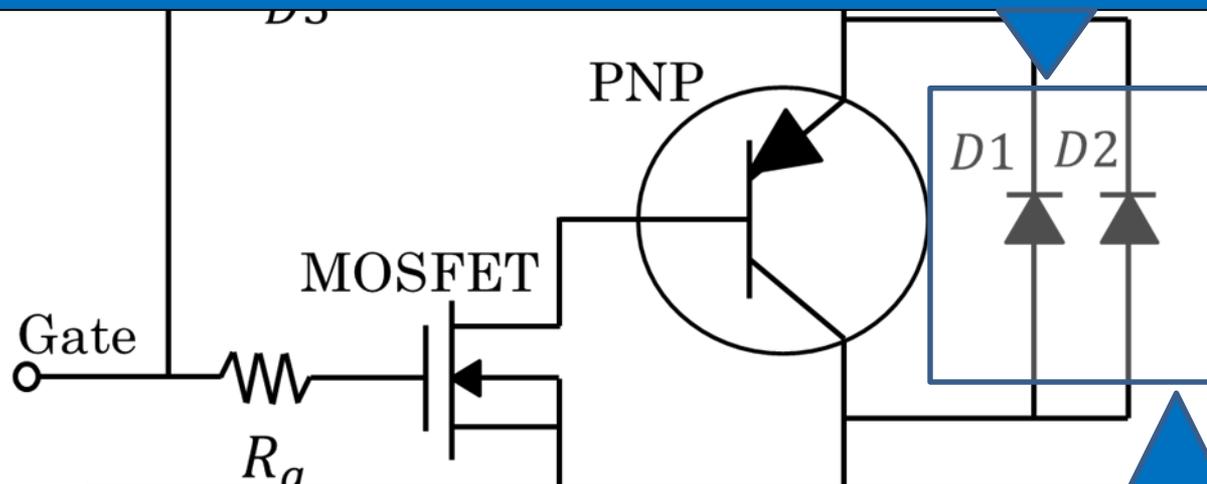
- はじめに
- IGBTの基本原理
- **マクロモデルの作成**
- モデルパラメータの
抽出・最適化とシミュレーション
- まとめ

提案するモデル(A-IGBT model)



並列に2つのダイオードを接続

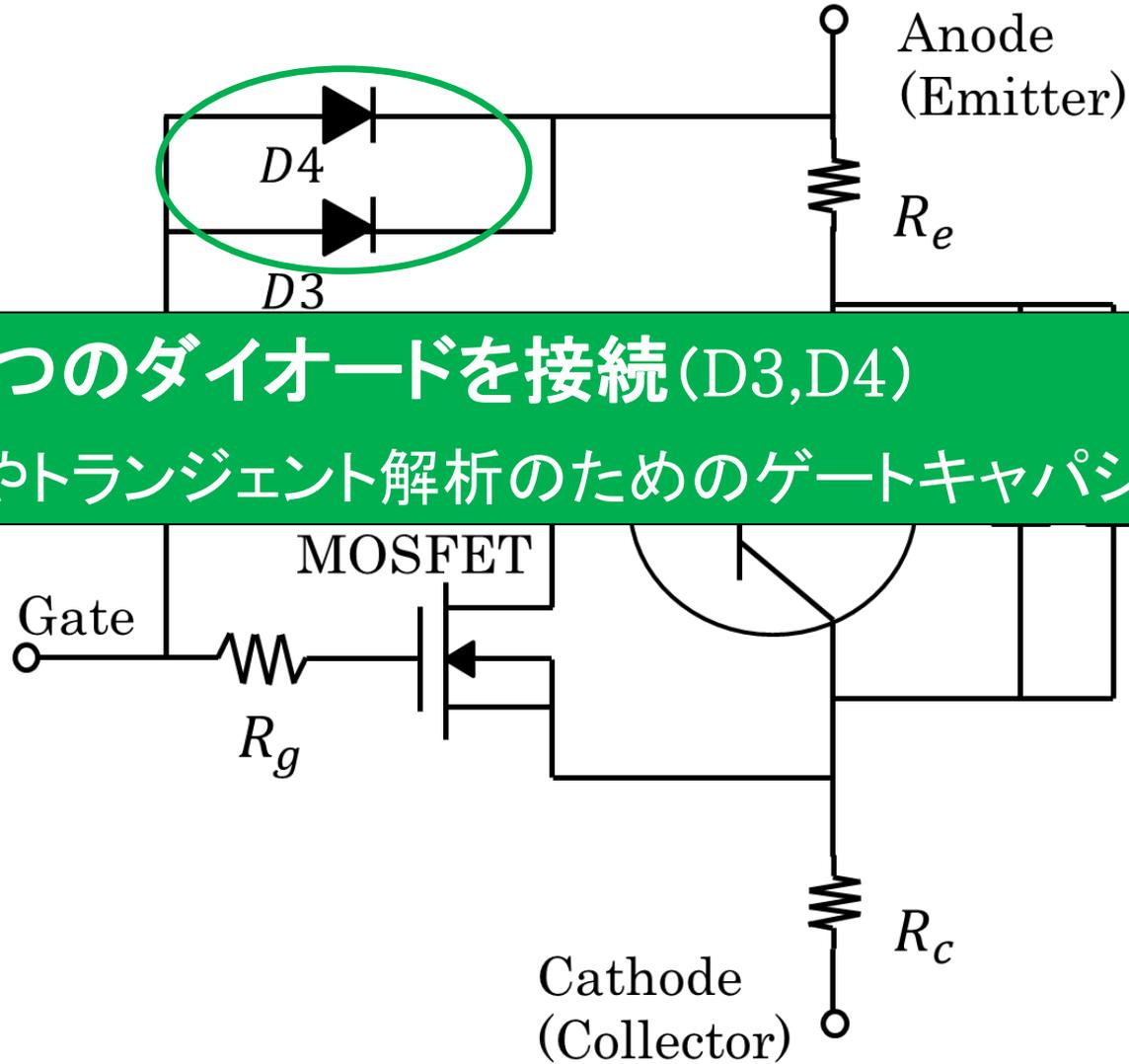
- ・ n^- の逆方向Breakdown電圧をコントロール
- ・ フリーホイールダイオードの順方向電流特性のシミュレーションを行う役割



並列に**2つ**のダイオードを接続

- ・ 電流・電圧特性カーブの傾き自由度を上げる役割

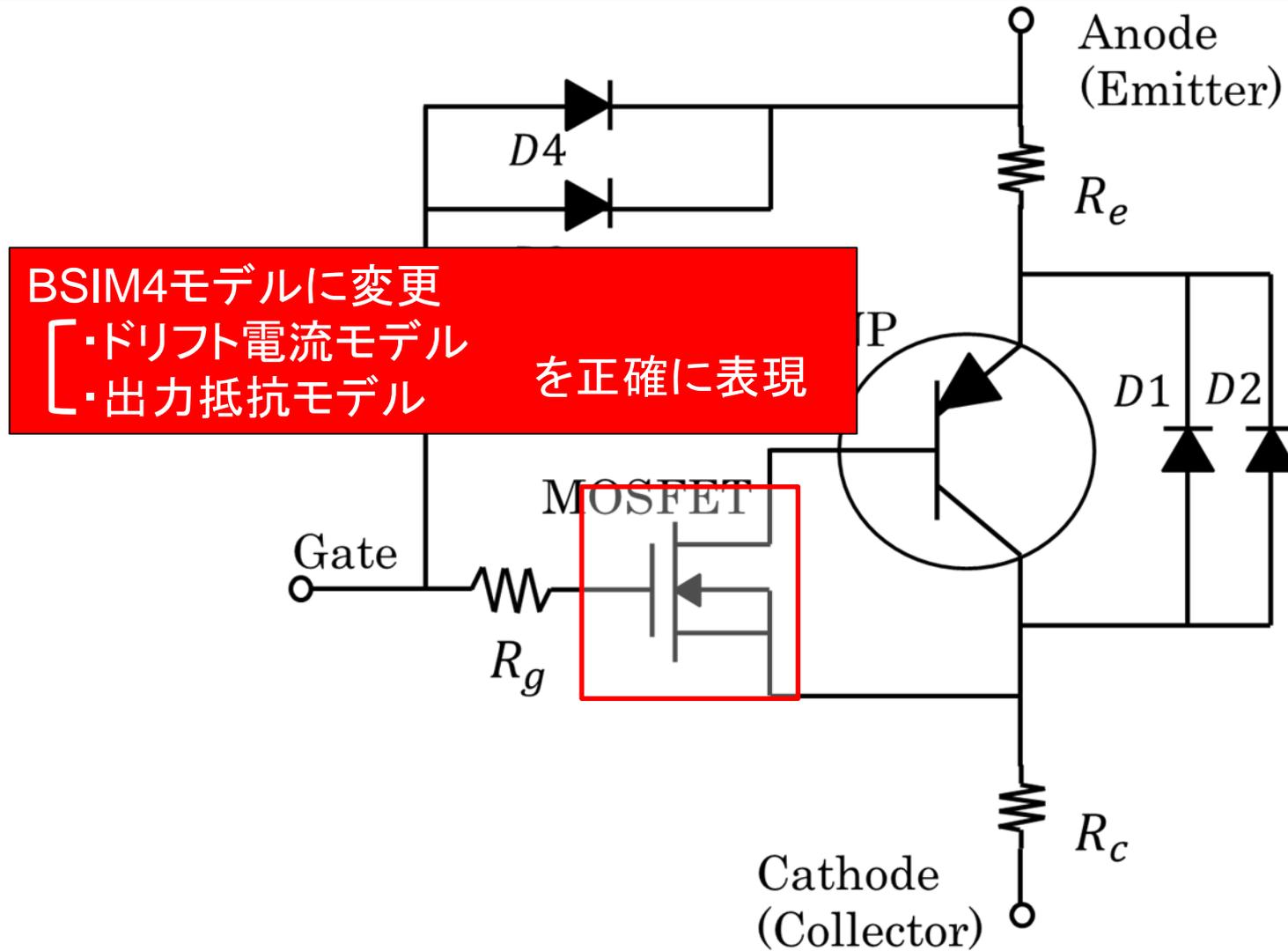
(Collector)



並列に2つのダイオードを接続(D3,D4)

・AC解析やトランジェント解析のためのゲートキャパシタを表現

A-IGBT model



- 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

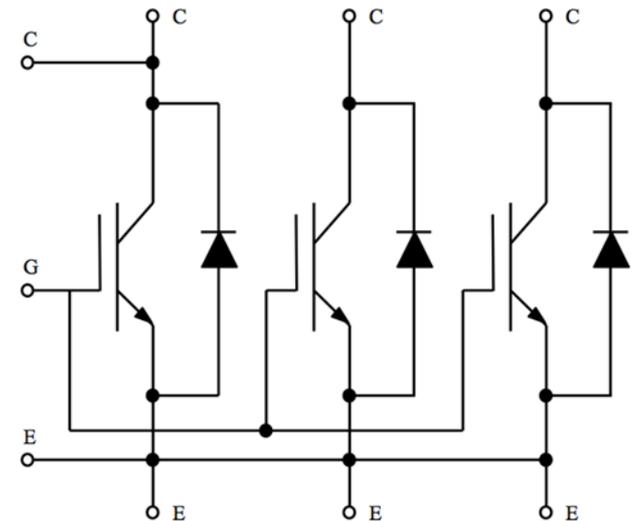
IGBTのマクロモデルをSPICEに実装

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



回路ダイアグラム

実測値とシミュレーション値の平均二乗誤差 (RMSエラー) で評価

$$(\text{RMSエラー}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X - x_i)^2}{n}}$$

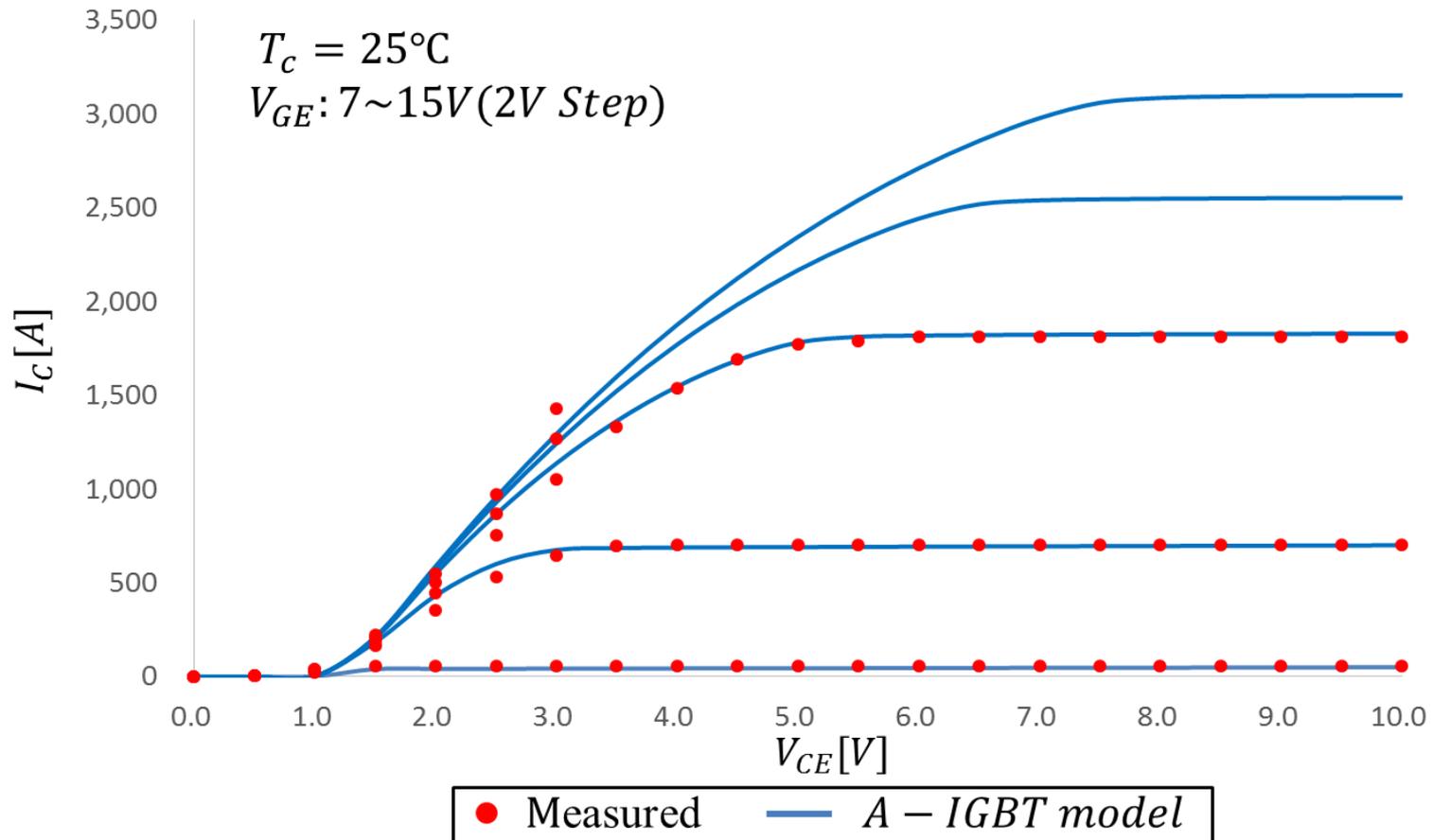
X : 測定値

x_i : シミュレーション値

半導体モデリング評価基準

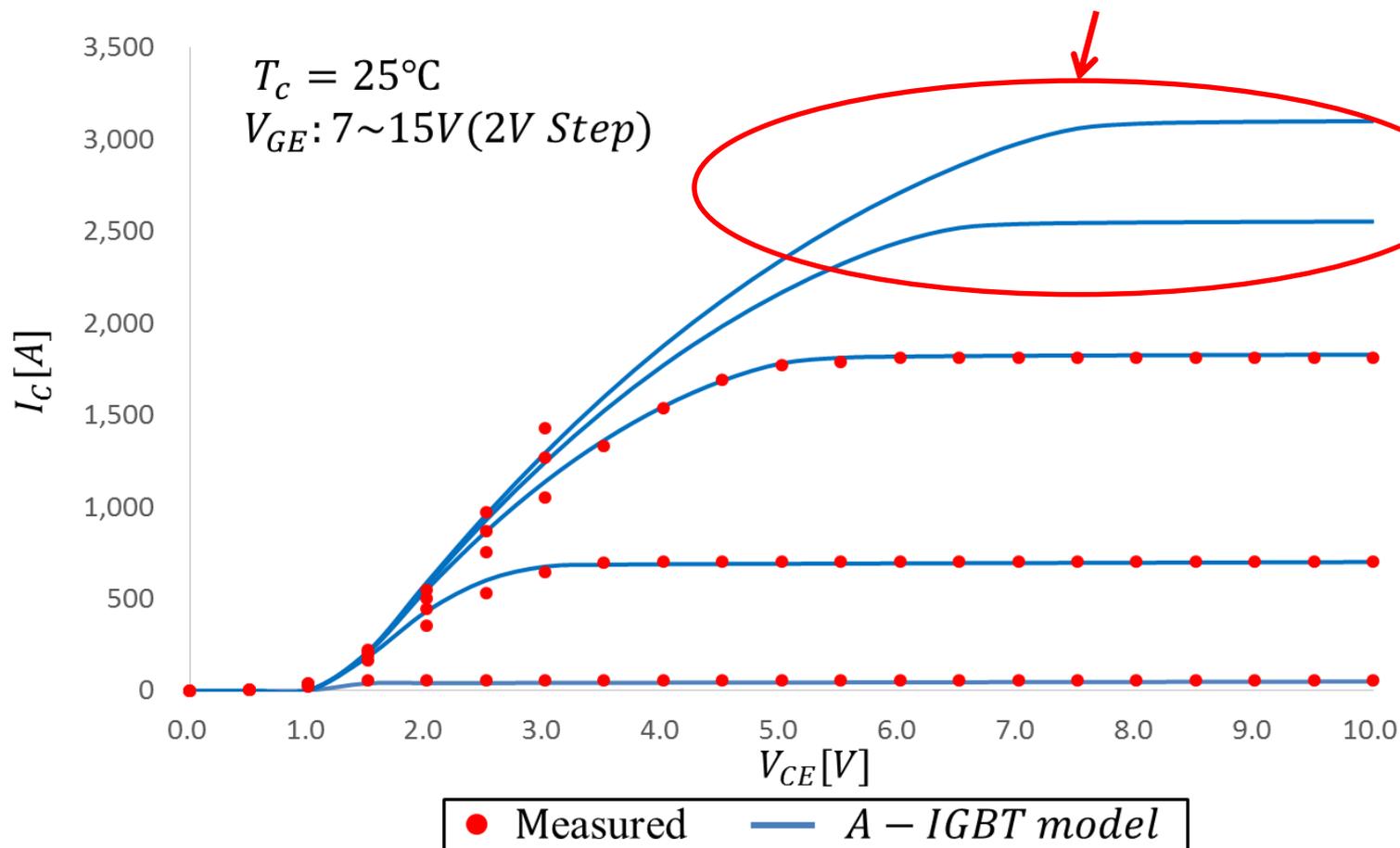
RMSエラー ≤ 5%

実用的なモデル



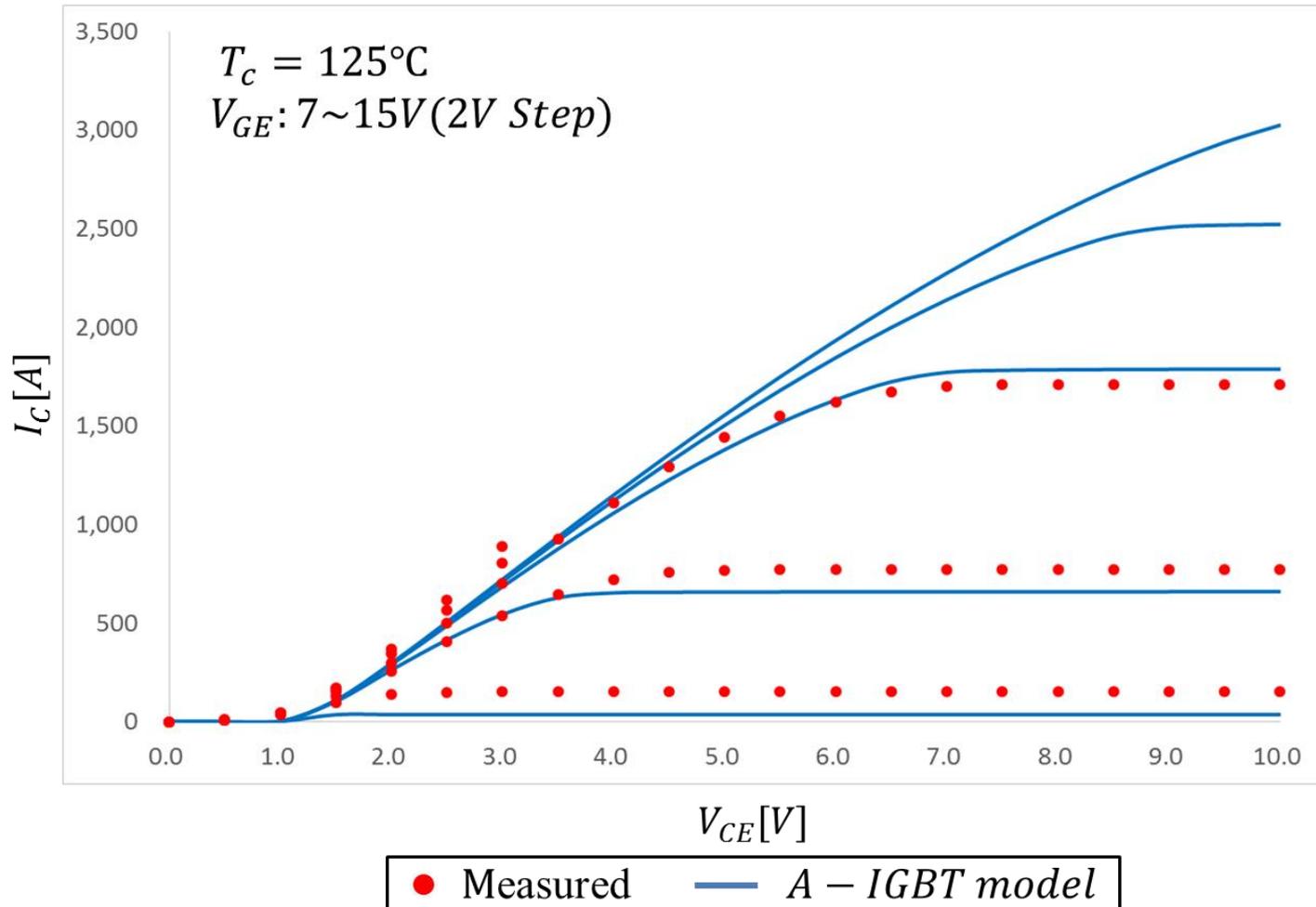
ゲート抵抗の影響により、ドレイン電流が
圧縮されたようなカーブになる様子を正確にシミュレート

シミュレーションの整合性を確認するためシミュレート

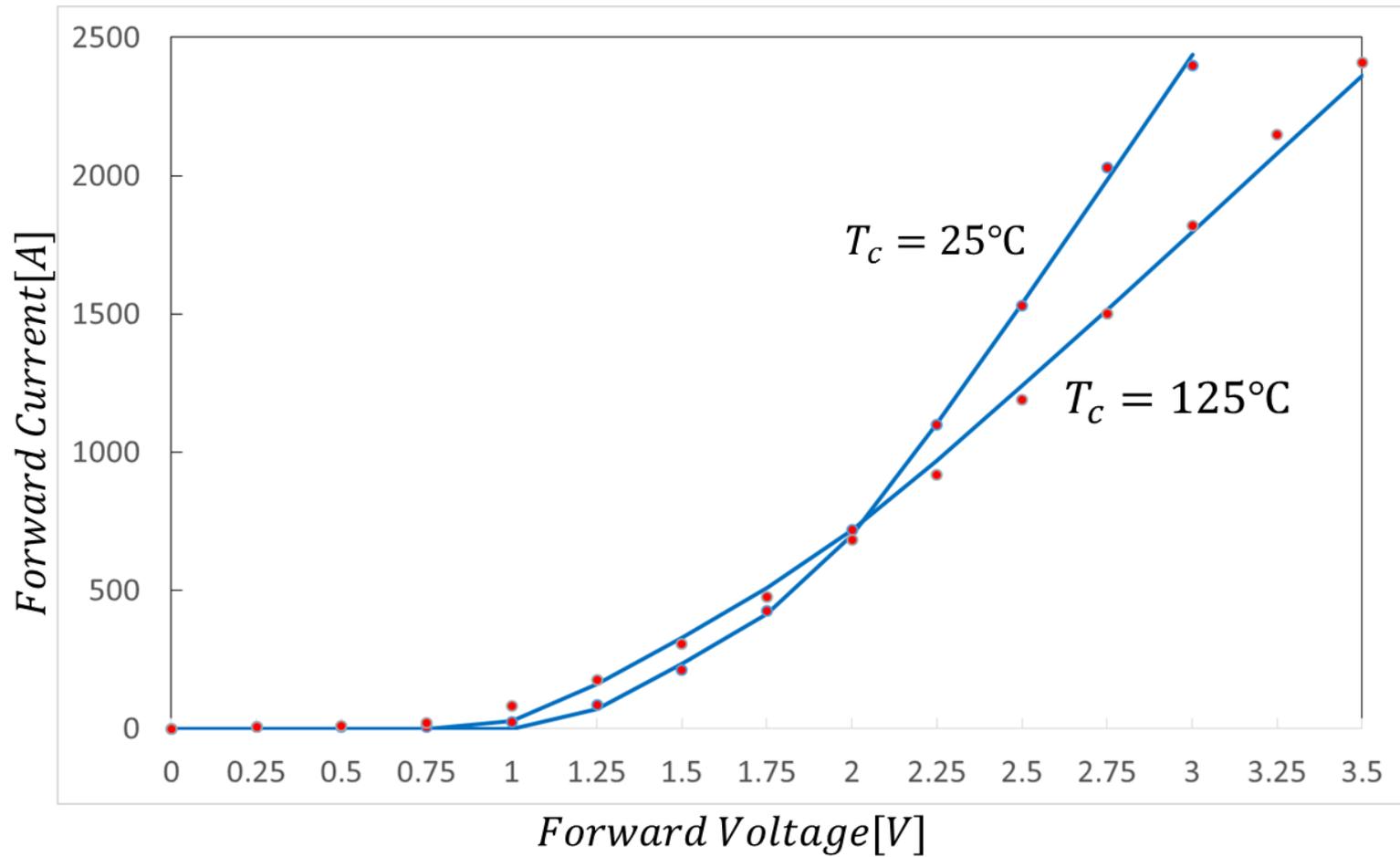


ゲート抵抗の影響により、ドレイン電流が
圧縮されたようなカーブになる様子を正確にシミュレート

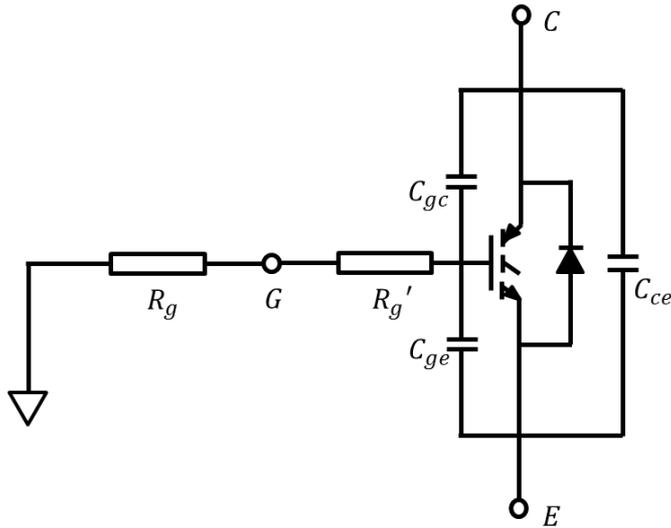
温度依存シミュレーション



- ・rmsエラー5%未満でシミュレート
- ・温度依存シミュレートを実現



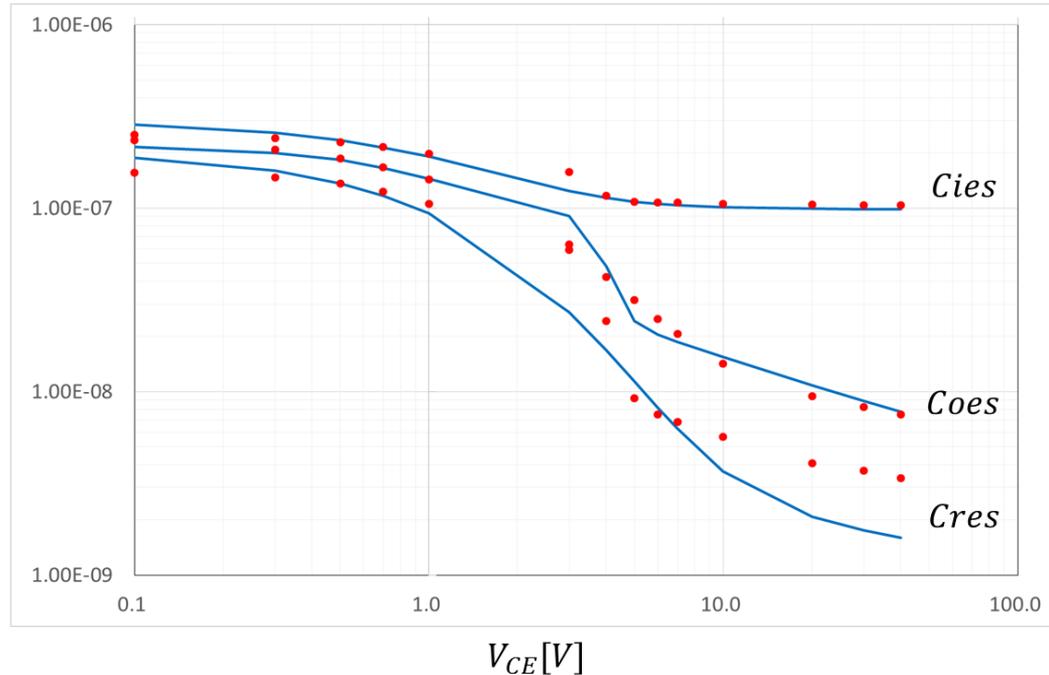
キャパシタンス特性



$$C_{ies} = C_{ge}$$

$$C_{res} = C_{gc}$$

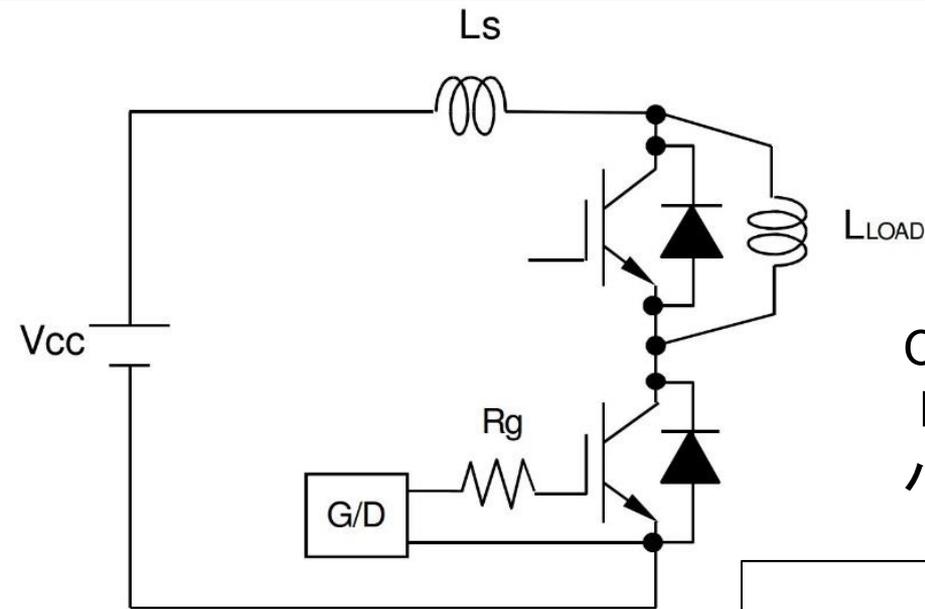
$$C_{oes} = C_{ce} + C_{gc}$$



3つの容量のすべてで
rmsエラー5%未満

● Measured — A-IGBT model

スイッチング特性

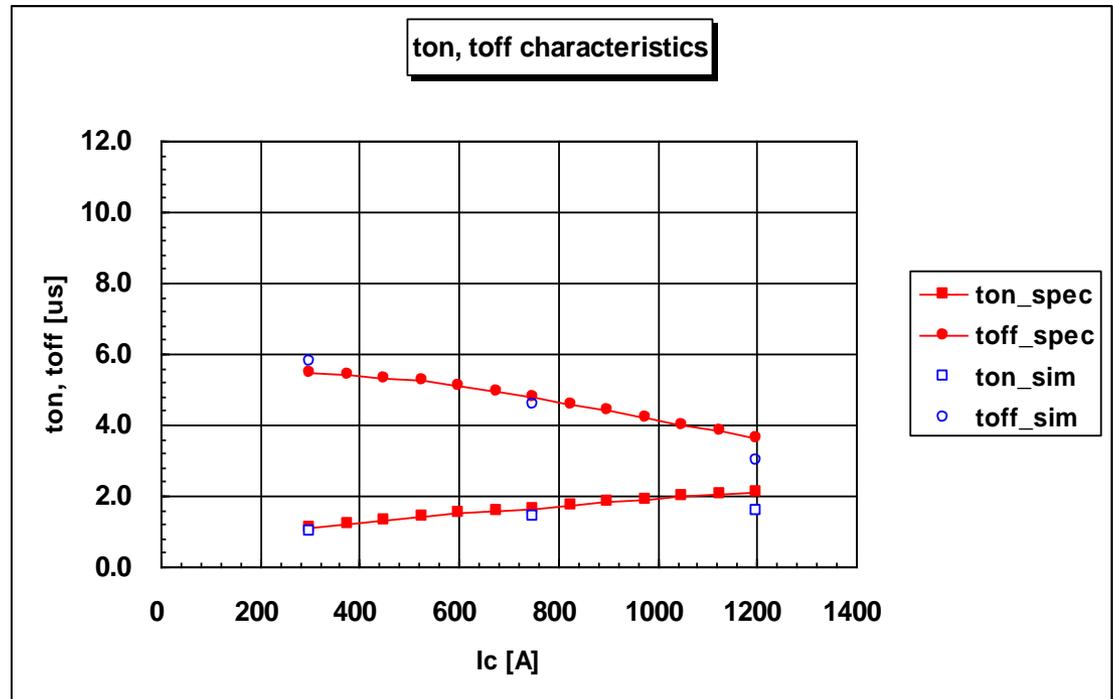


ON,OFF時間測定 :

$L=100\text{ nH}$, $V_{cc}=1650\text{ V}$, $R_g=3.9$, $T_c=125\text{ }^\circ\text{C}$

パルス信号源 $V_{ge} = -15\text{ V}$ から $+15\text{ V}$

rmsエラー5%以下で
シミュレート可能



- 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

まとめ

- SPICEシミュレータ用のIGBTのマクロモデルを提案
- Datasheetの測定値を使用してモデルパラメータを高精度に抽出
- IGBTの容量モデルを開発し、スイッチング特性を検証
- DC,AC, トランジェント特性を高精度にシミュレーションできる
実用性のあるモデルの開発

課題

- 回路規模が大きい場合、シミュレーションの収束速度に問題があるため、提案したマクロモデルに基づいてIGBTのコンパクトモデルを開発することを検討

- 違うモジュールでもこのモデルは使えるか？

A. 可能です。本研究では富士電機製のモジュールでもこのマクロモデルで高精度シミュレーションができた。

- 回路規模が大きい場合とはどれくらいを想定しているのか？

現在の使用用途での回路規模は問題はない。しかし、今後さらに回路規模が大きくなってくる場合という意味です。