

半導体デバイスモデリング技術 前半

2022年6月28日

群馬大学 非常勤講師

岡部裕志郎

■自己紹介

* 群大OBです。

1985年： 電子工学科卒

1987年： 修了卒(プラズマ実験)

1991年： 名古屋大学大学院博士後期課程修了

・1991～2012年： 三洋電機(株)で半導体デバイスモデリングを担当。

・2016年～2019年： 群馬大学知的財産活用センター勤務

・現在、ニプロ医工(株)にて英語業務に従事
(群馬県館林市松原二丁目19番64号)

■ 概要

- 回路設計技術向上のため、SPICEモデルの概要に触れる。
- ダイオード、バイポーラトランジスタ、MOSトランジスタ、抵抗、そして容量デバイスの各モデルを説明する。
- 製造工程のバラツキを表すモデル(コーナー、統計)、そして $1/f$ ノイズモデルも扱う。

■この講義と試験について

1. 講義内容

知っていれば得かもしれない程度のもので
あります。気楽に、しかし居眠りしないで聞いて下さい。

2. 試験について

この講義を聴講した感想をA4レポート1～2枚に記載
して下さい。

講師として伝えたいこと、理解して貰いたいことは、
後半最後にある確認事項1, 2にあります。それらの記
載があるれば、合格と考えています。

■内容

§ 1. 回路設計のために

§ 2. 概要

回路シミュレーション、SPICE、モデル、CMC

§ 3. SPICEモデルとは

物理現象の数式化

§ 4. 各素子のモデル1

4-1. ダイオード

4-2. バイポーラトランジスタ

§ 1. 回路設計のために

■ 回路設計のために

設計方法

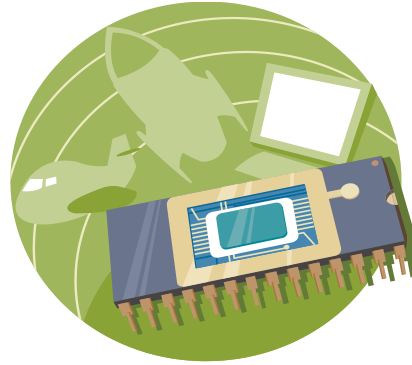
デバイス特性のデータを基に
最適な回路条件になるように
素子を組み合わせる。

設計→試作→評価

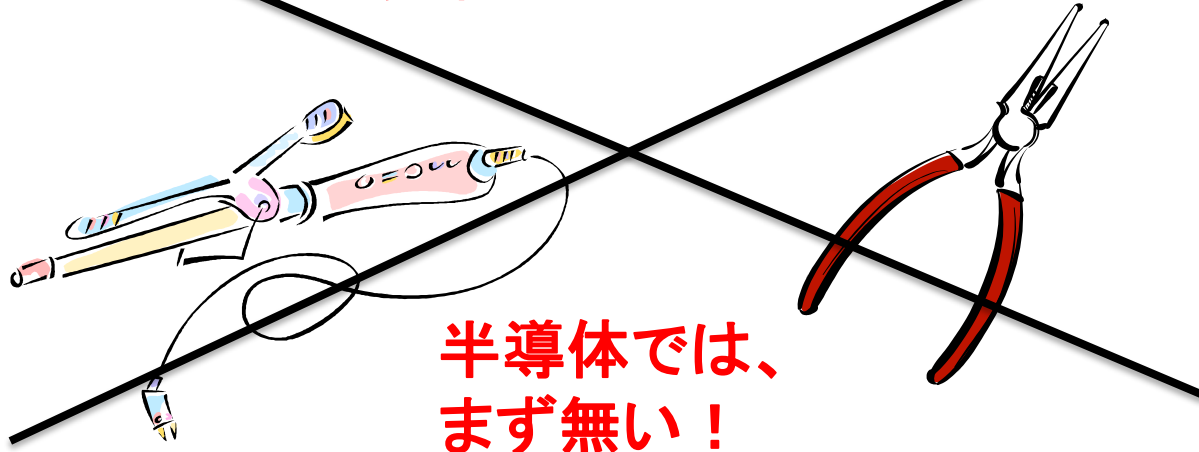
■ 回路設計のために

設計環境

回路設計用ソフトウェア、ハードウェア一式のこと



実物を手作業で試作



**半導体では、
まず無い！**

§ 2. 概要

- ・回路シミュレーション
- ・SPICE
- ・モデル
- ・CMC (Compact Model Coalition)

■ シミュレーション

実物の動作を模倣

別な類似システム



例)

巨大なエネルギーによる破壊現象

× 危険、実現不可能

◎ コンピュータ上で再現



回路シミュレーションと試作の特徴

	シミュレーション	試作
時間	1時間	TAT 30日
変更	簡単	無理
費用	数十万円	1千万円/回
教育	高い(よく考える)	低い
条件	無限	限定
領域	限定	無限
誤差	やや大きい	なし
準備	1ヶ月	即実行

注) 数字は目安

■ 回路シミュレーションの利点

1) 短時間

- 実物作製(TAT): 目安として30~60日
- シミュレーション: 数時間

2) 変更が容易

3) 安価

- 試作: 1回で数千万円
- シミュレーション: ライセンス料+電気代程度

4) 考えること

- シミュレーション結果を考えることで、回路設計の技術が向上する。

5) 条件は無限に設定可

■ 回路シミュレーションの弱い点

1) 万全でない

モデルが用意できない場合がある。

2) 精度

実物に合わない場合がある。

(現状の最高技術だが、完璧ではない)

3) 準備期間

シミュレーションできる環境の準備期間が必要。

■ シミュレータ

結果を体感させるためのシステムのこと

例)

航空シミュレータ、音響シミュレータ



■ SPICE その1

SPICE

Simulation Program with Integrated Circuit

Emphasisの略。IC用の回路シミュレータ。

- ・1975年に米UCLA大, Berkely校で開発。
- ・アナログプログラム。
- ・各回路素子の情報をもとにシミュレーションする。
- ・直流(DC)解析、交流(AC)解析、および過渡解析。

spice

香辛料



■ SPICE その2

表.1 各社のSPICE

社名	シミュレータ名
ケーデンス	Spectre
シノプシス	HSPICE
SimCAD	SmartSpice
アジレント	ADS
メンター・グラフィック	ELDO
アナログ・デバイス	LTspice

全て米国製

■モデル

ある現象を数式を使って表現したもの

例) $Y = aX + b$ (X, Yは変数)

半導体モデル

SPICE → 回路設計用

TCAD (Technology CAD) → プロセス
/デバイス開発用

■ 確認__シミュレーションの特徴

1. 利点

短時間

Q.1

安価

教育効果(考えること)

任意の条件

2. 弱い点

万全でない

Q.2

準備期間

§ 3. SPICEモデルとは

物理現象の数式化

■ SPICEモデルとは？

トランジスタ、抵抗、コンデンサなど対象回路を構成する素子レベルの回路情報。

例)

- モデル式(固定): $Y = aX + b$ (X,Yは変数)
- 係数a,bを変えることで普遍的に使える。
- 係数a,b: SPICEパラメータ

■ SPICEモデル

表.1 各デバイスの代表的なモデル式

デバイス	モデル式
CMOS	BSIM3、4、EKV2 (最新はBSIM6、HiSIM2)
高耐圧MOS、DMOS	HiSIM_HV
バイポーラ	Spice Gummel-Poon、 Mextram504T
抵抗	シミュレータに依存 (温度、電圧特性モデル)
容量	↑

* 赤字は、世界標準モデル

■ CMC (Compact Model Coalition)

概要

- ・モデル式の**世界標準**を決める組織
- ・1996年8月発足
- ・会議は年に4回開催
(2022年 6/7-10、米国テキサス州オースティン(Zoom会議))
- ・発足前(標準化が無い時代)の問題点
 - ①シミュレータにより使えるモデル式が異なる
 - ②シミュレータへの導入が遅い、または導入されない
 - ③各社で個別モデルを作り、技術が限定された

世界標準化の利点

- ①各シミュレータで使える
- ②シミュレータ間の差が無い
- ③多種多様に使われるためモデル式の改良が容易になる
- ④更に高性能なモデルを作れる

■ 世界標準化の例

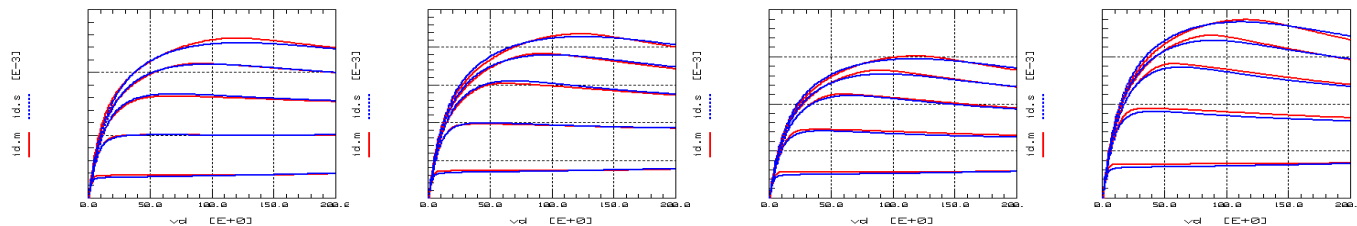
例) 250V Nch_LDMOSのモデル検討

ゲート幅



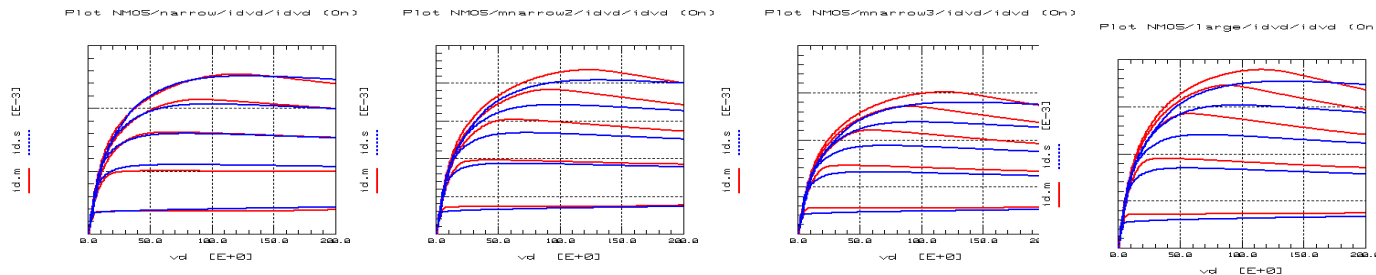
■ HiSIM_HVモデル(HiSIM-LDMOS-100)

Vgs=4V,6V,8V,10V,12V



実測.: — (red)
Sim.: — (blue)

■ MM20 & MM31サブサーキットモデル(ゲート幅スケールング改良後)



改良後もゲート幅スケールングが精度不足

■講義の目的

1.回路シミュレーションを効果的に使うため

SPICEモデルを知らなくても回路設計はできる。

しかし、

回路設計の出来る人は、ある程度、SPICEモデルも理解している。

2. 開発部署全体でのSPICEモデルの認識のため

SPICEモデルは素子開発者と回路設計者の**共通項目**

***これが無いと半導体製品は造れない**

■ 講義の意味

SPICEモデルの理解

* シミュレーション結果が妥当かの判断ができる。
モデルの理解 = 実デバイスの理解。

モデルが分からない、気にしない人

異常に気付かない



試作



不良品の山



倒産！

■ 講義内容の概略

* SPICEモデルのみに限定

- デバイスの物理現象の説明をする。
デバイスの詳細は今までの講義を参照。
- シミュレータ(SPICE)の使い方
習うより慣れろ。
- 回路設計の方法
後続く講義で理解。

■よくある勘違い

・シミュレーション

設計者の予測を確認するもの

設計者はシミュレーション結果が妥当なものか判断する必要がある。

・回路シミュレータの役割

意図した特性、性能を実現し得るかの**確認**、プロセスパラメータの変動等による特性の変動**評価**など。

・大切なこと

自分で結果の予測を行い、それとシミュレーション結果が異なった場合は**すぐに原因を考えてみる**。 →
バイポーラ、MOS等、能動素子が主因

■ SPICEパラメータ の例

• MOSモデル

(BSIM3 Version 3.2 モデル式より)

- simulator lang=spectre
- model MN bsim3v3 ¥
- type=n ¥
- version=3.22 ¥
- mobmod=1 ¥
- tnom=27 ¥
- tox=7e-09 ¥
- xj=1e-07 ¥
- nch=1.7e17 ¥
- nsub=6.2e16 ¥
- rsh=100 ¥
- u0=500 ¥
- vth0=0.9276 ¥
- k1=0.53 ¥
- k2=-0.0186 ¥
- k3=100 ¥
- k3b=0 ¥

アルファベットと
数字の羅列？！

各パラメータは
物理的な意味を持つ
(ここでは省略)。

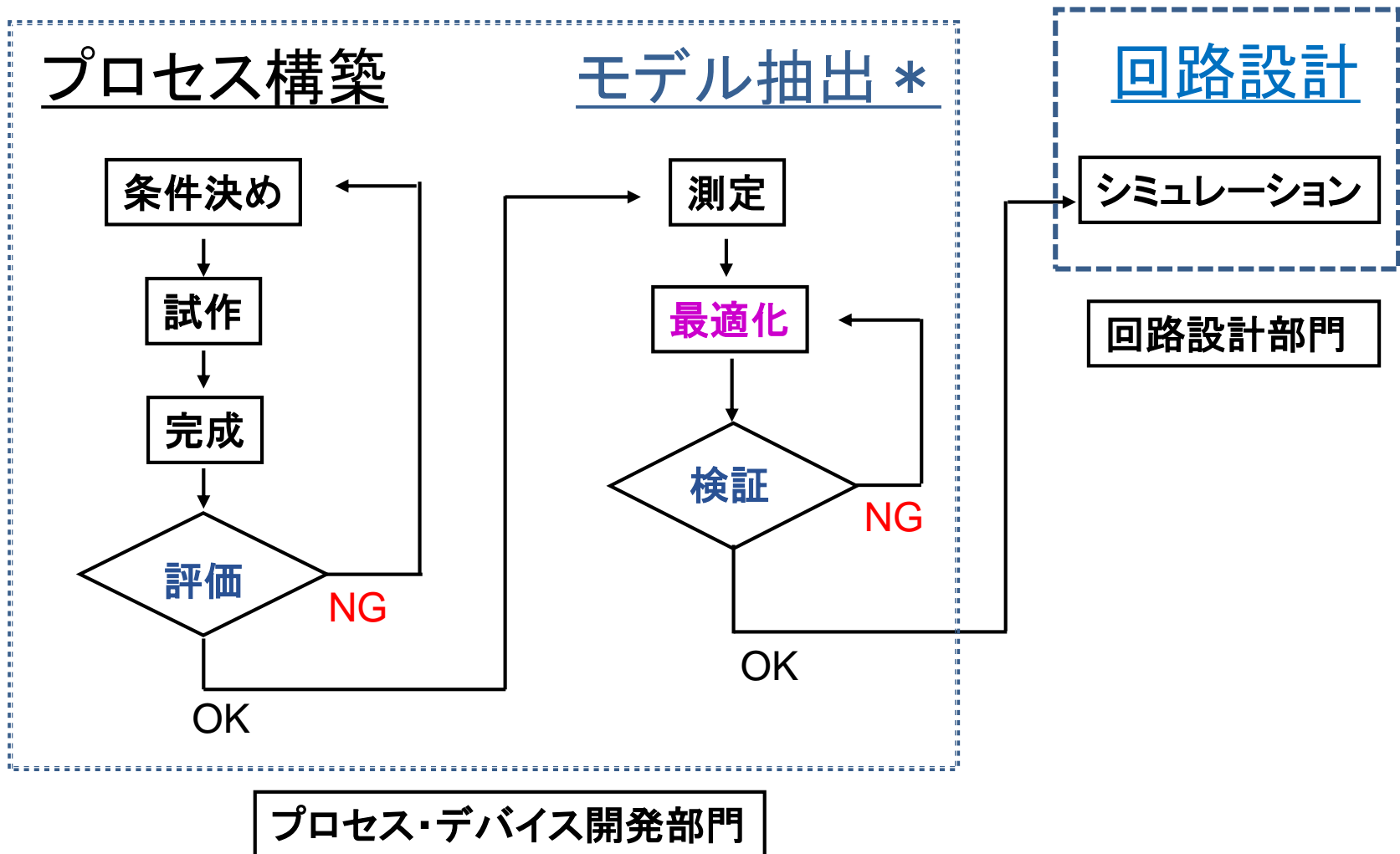
■ SPICEモデル式の例

* 斜字はSPICEパラメータ

$$\begin{aligned}
 V_{th} = & V_{th0} + K_1 \left[\sqrt{\phi_s - V_{bs}} - \sqrt{\phi_s} \right] - K_2 V_{bs} \\
 & + K_1 \left[\sqrt{1 + \frac{NLx}{L} \sqrt{\frac{\phi_s}{\phi_s - V_{bs}}}} - 1 \right] \sqrt{\phi_s} \\
 & + \left[K_3 + K_{3B} V_{bs} \right] \frac{T_{ox}}{W + W_0} \phi_s \\
 & - \theta_{th}(L)(V_{bi} - \phi_s)
 \end{aligned}$$

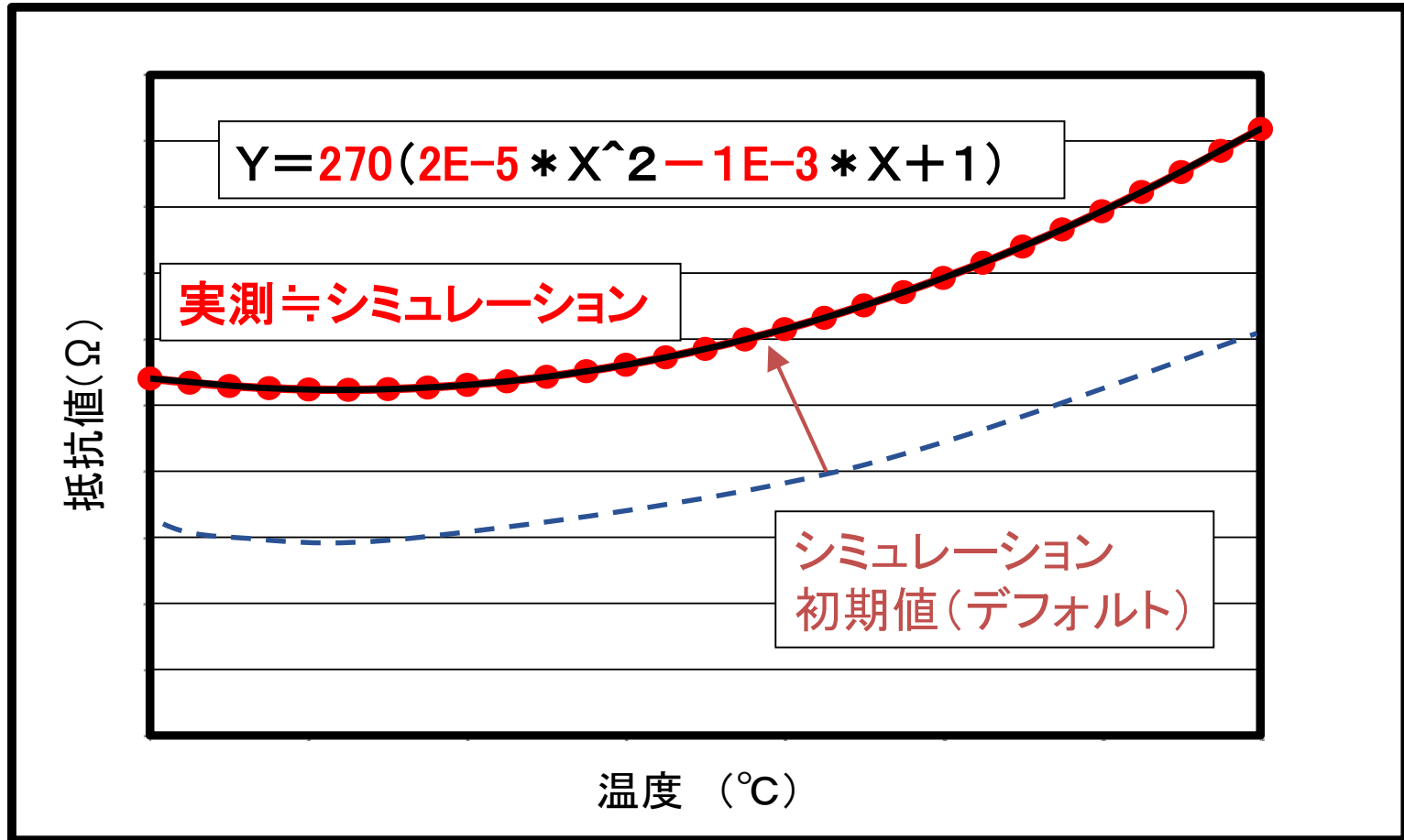
MOSTランジスタのしきい値電圧 V_{th} の式
(BSIM3 Version 3.2モデル式)

■モデル抽出



* モデル抽出 = SPICEパラメータ値を決める

■ 抽出の例

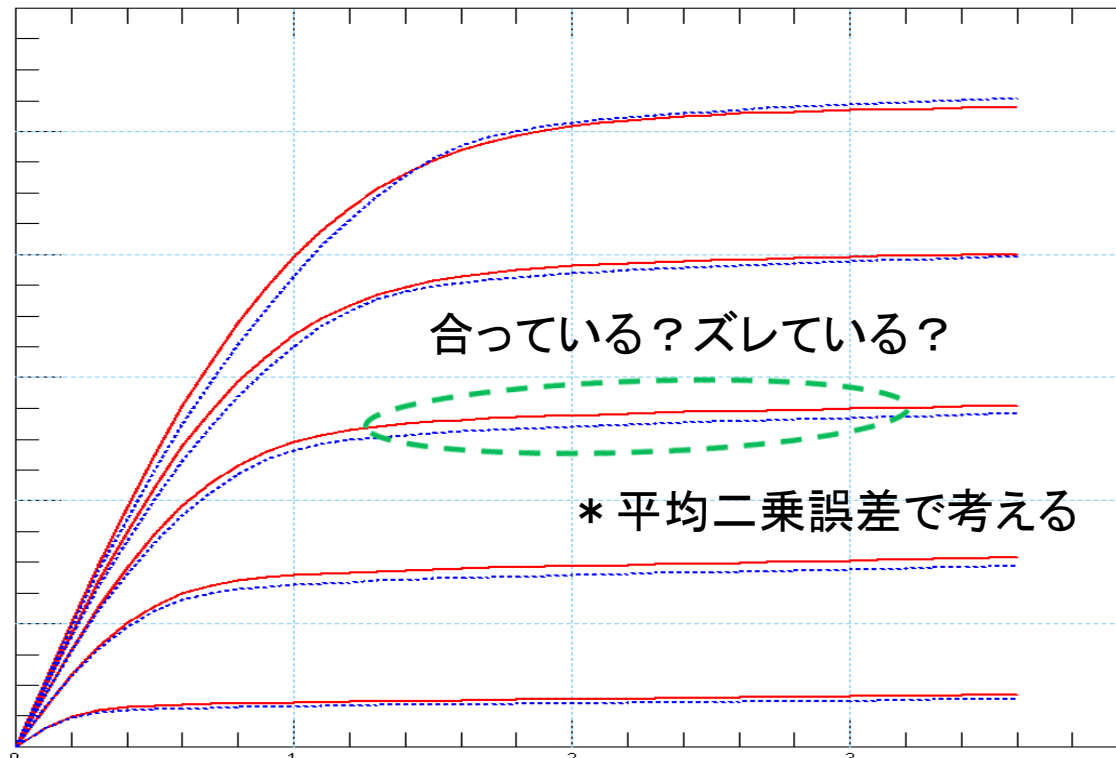


$Y = R(A * X^2 + B * X + 1)$ の式で
変数 A, B, R を振ることによってシミュレーションを実測に合わせた。

結果: $R = 270$ 、 $A = 2E-5$ 、 $B = -1E-3$

■ フィットデータ

実測とシミュレーション結果を重ねた図のこと。
モデルの精度が分かる。



— 実測
·· シミュレーション

■二乗平均誤差

(Root Mean Square Error)

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \xi_i^2}$$

$X_i (i=1, 2, \dots)$ 実測値

$x_i (i=1, 2, \dots)$ シミュレーション値

$\xi_i = X_i - x_i$ 誤差

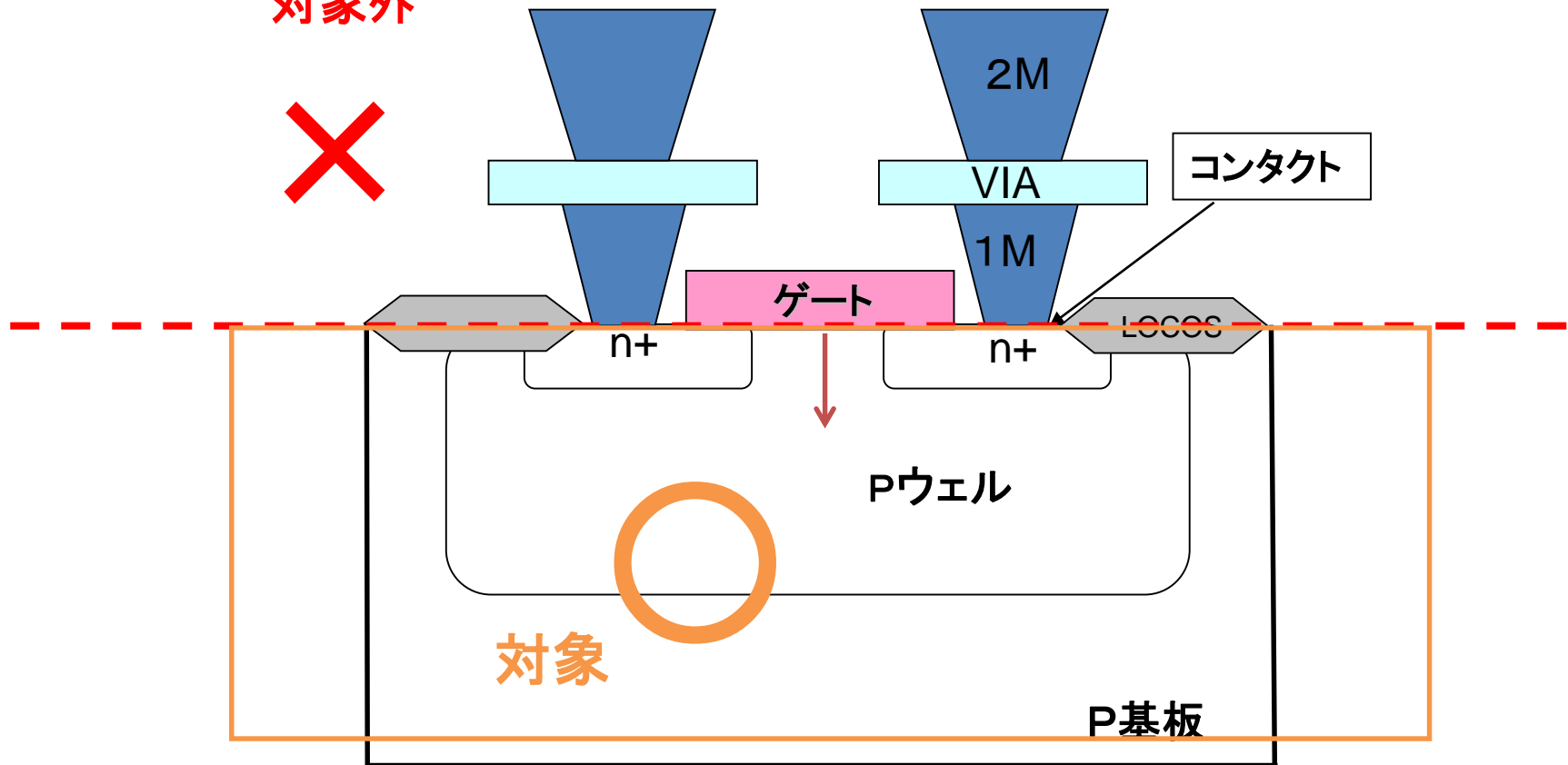
(各シミュレーション値 x_i の実測値との差)

参考)

二乗平均誤差 < 5% が業界標準

■ SPICEモデル化の対象

対象外



基板内部の特性をモデル化

■ 解析手法

1. DC

入力は直流。各部の直流電流、電圧を調べる。

2. 温度

温度を変えた場合の特性を調べる。

3. AC

入力のAC信号の周波数を変化させた際の、
入力信号に対する出力信号の振幅と位相変化を求める。

4. 過渡応答

入力波形を定義する。各端子の電圧値変化を求める。

5. ノイズ

素子の発生する雑音の他への影響を調べる。

6. ばらつき

プロセスが変動した場合の特性を調べる。

■モデル確認

(シミュレーションの前に)

1. 必要なモデルがあるか？

実デバイスに対応したモデルが必須
NchMOSトランジスタにはNMOS用モデル

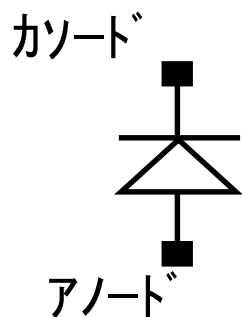
2. 精度

フィットデータと平均二乗誤差でチェック

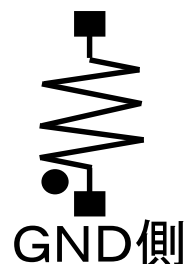
質問.

モデルの二乗平均誤差は、どの程度ならば良いか？

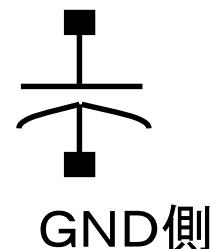
■ 回路記号 (シンボル) (Spectreの例)



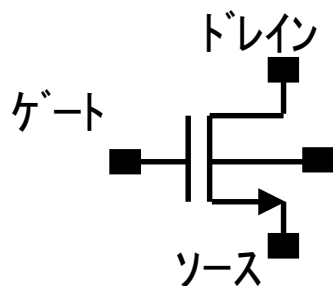
ダイオード



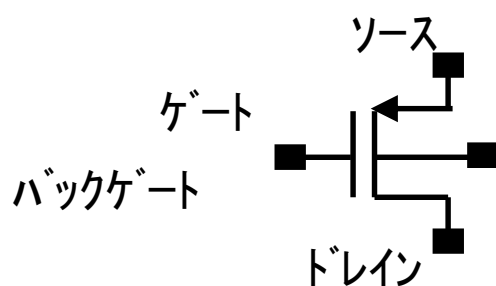
抵抗



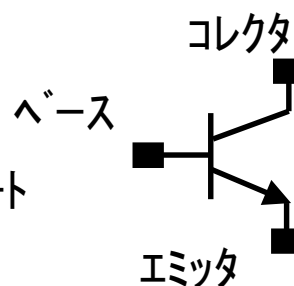
容量



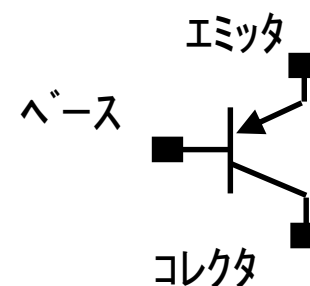
Nch



Pch



NPN



PNP

MOSTランジスタ

バイポーラ

* 以後の表記は全てSpectreのシンボルを使う

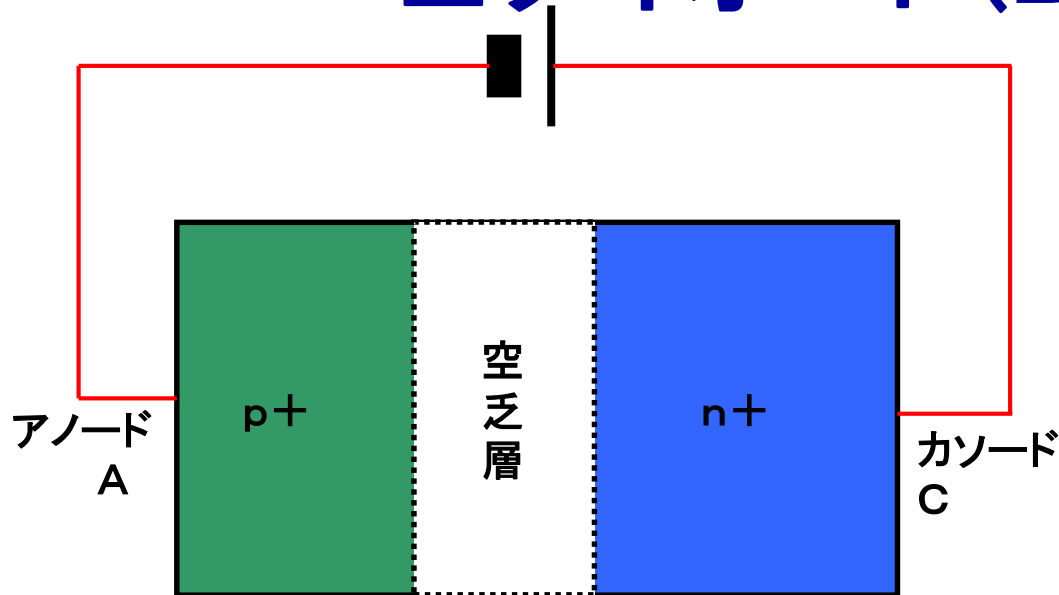
休憩1 卒業後の勉強について

1. 就職してからの勉強が重要です。**学び続けて下さい。**
2. 大学で学んだことの10%も卒業後には使われない。
3. **必須(基礎)となるのは高校時代の勉強内容**
(日本の教育システムは世の中で必要とされることを高校時代に教えるため)
4. 再度、高校物理、数学の勉強をして、難関大学の試験問題が容易に解けるようにすることを勧める。
5. **英会話を勧めます。**ラジオ英語講座、英会話教室、翻訳アプリを活用する。語学は空き時間にながら勉強ができる。継続が重要であり、止めるとゼロに戻ります。

§ 4. 各素子のモデル1

4-1. ダイオード

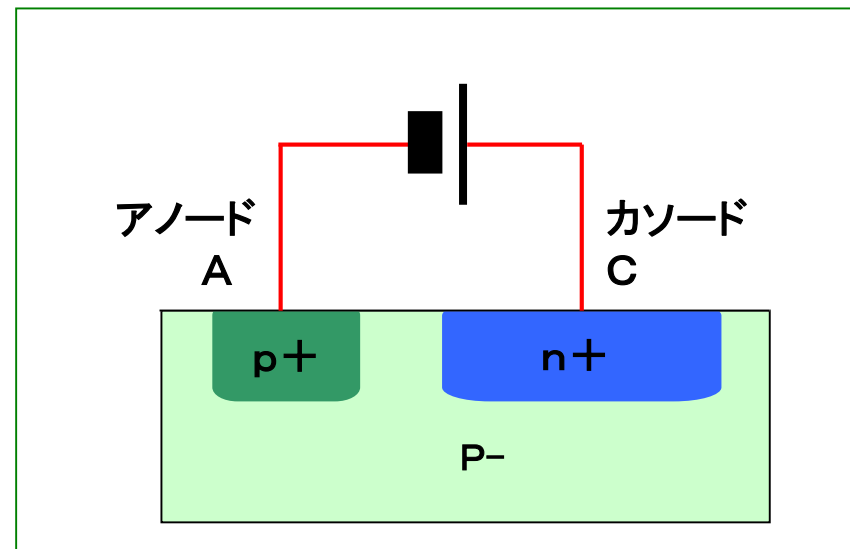
■ダイオード(Diode)



PN接合ダイオード(逆方向バイアス)

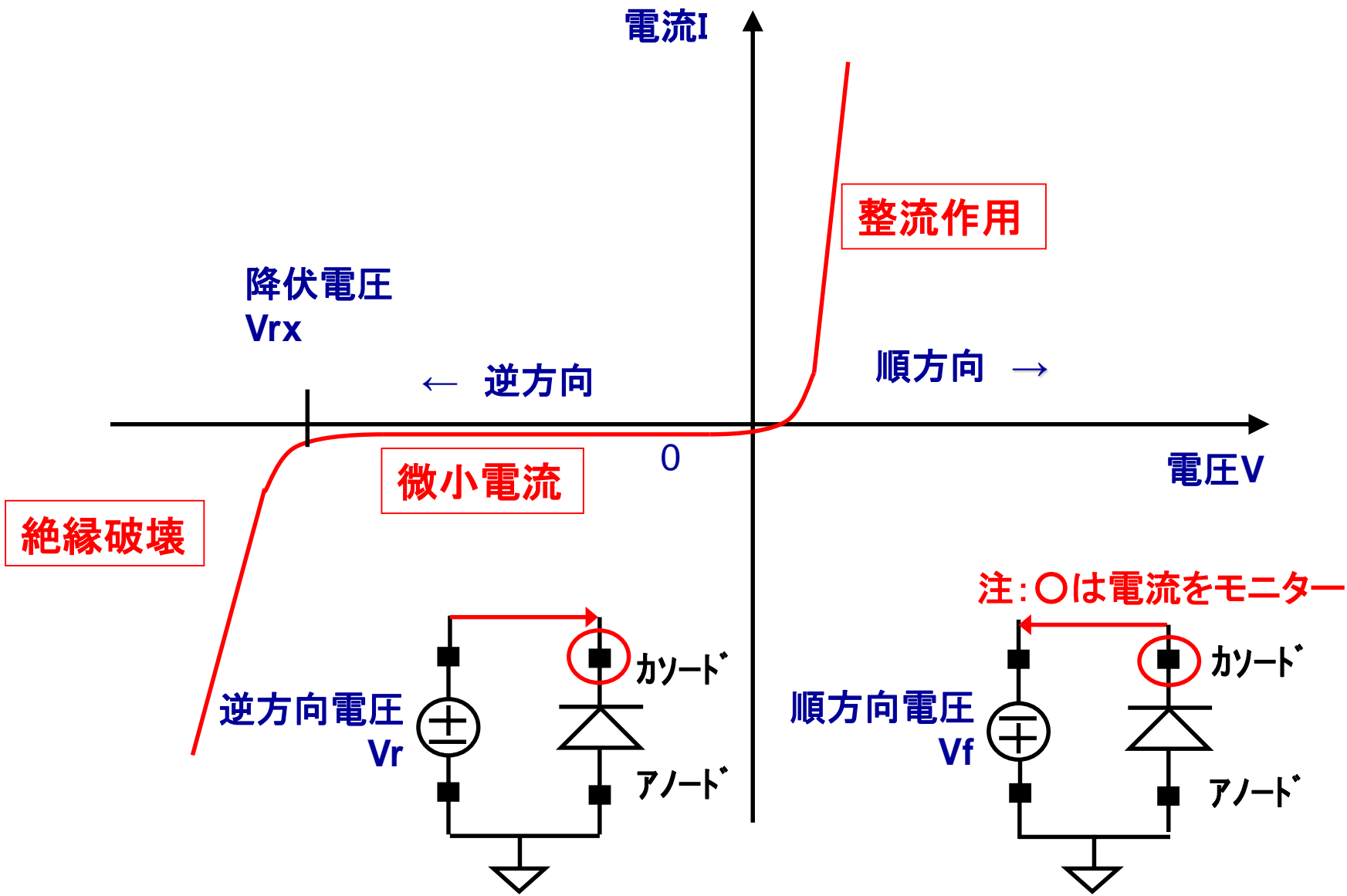
PN接合

N型SiとP型Siを隣接して形成したもの。
ダイオード特性を示す。



PN接合ダイオードの断面図

■ダイオードのDC特性



■ダイオードの容量特性

PN接合は容量になる
(高周波で測定時)

$$C_j = C_{jx} / (1 - V_j/V_{jx})^{M_{jx}}$$

C_{jx} : 0Vバイアス時の容量(F)

V_{jx} : 接合電位(V)

M_{jx} : 電圧依存係数

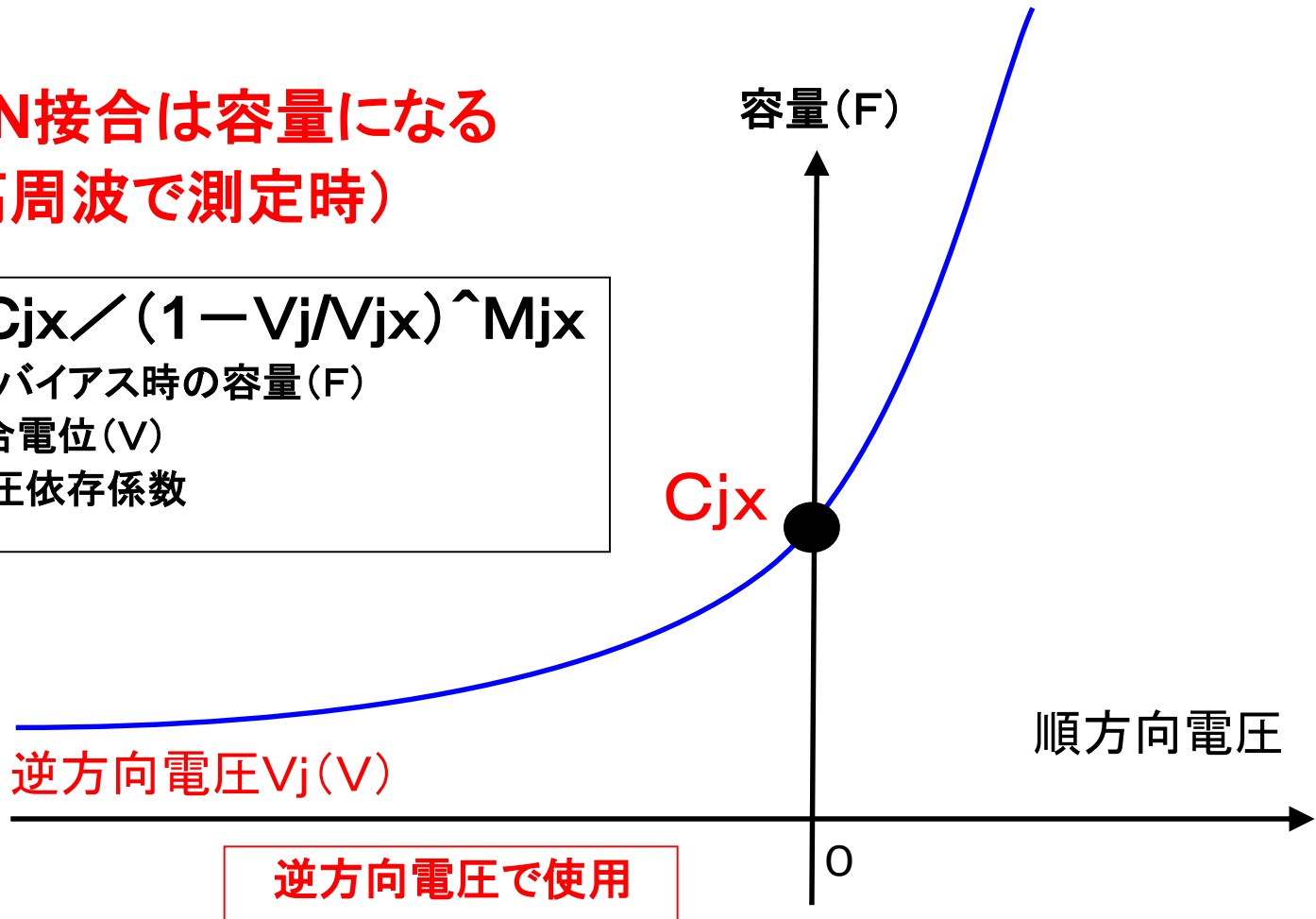
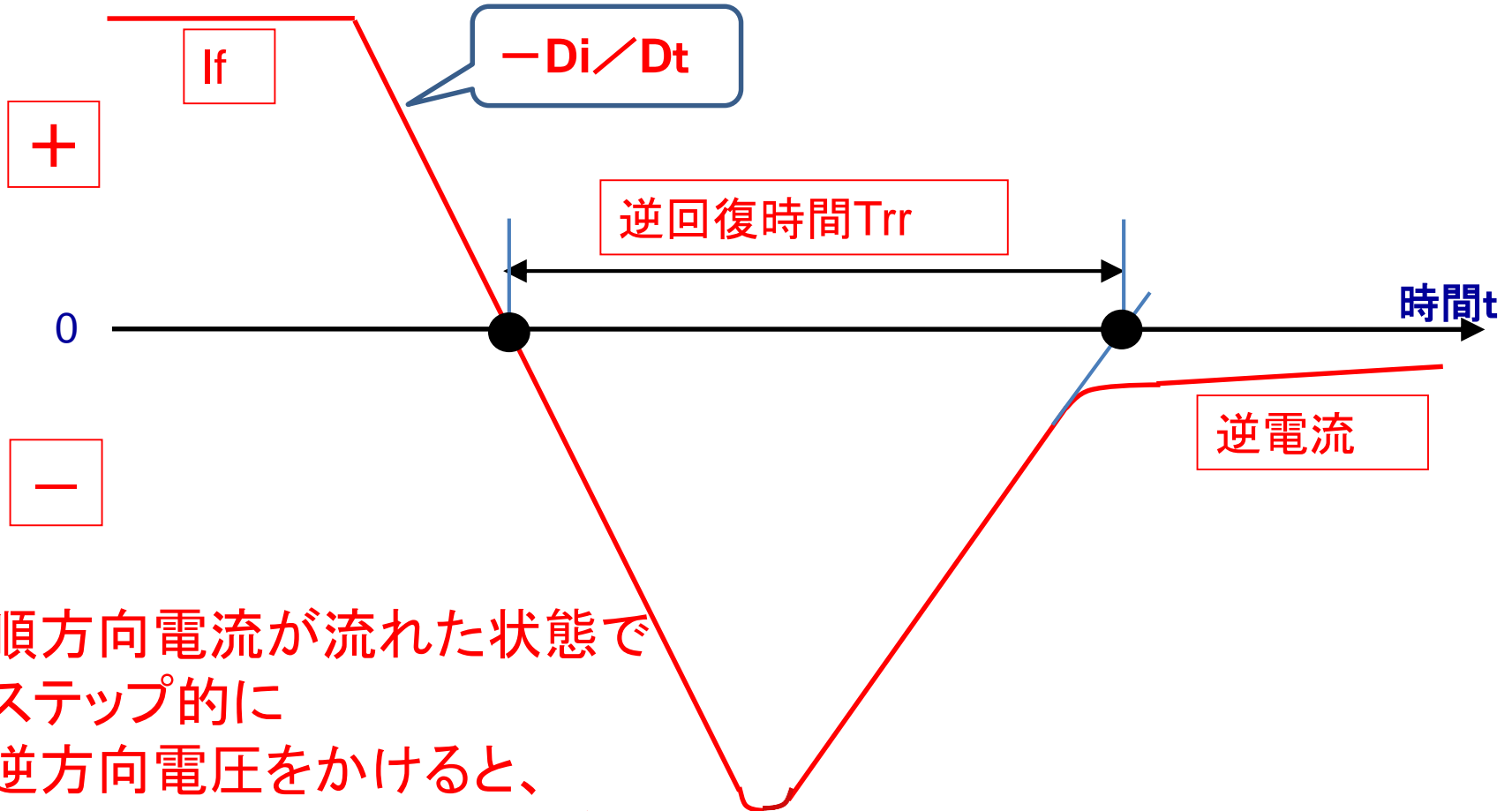


図.1 接合容量—接合電圧特性

■ダイオードの過渡特性

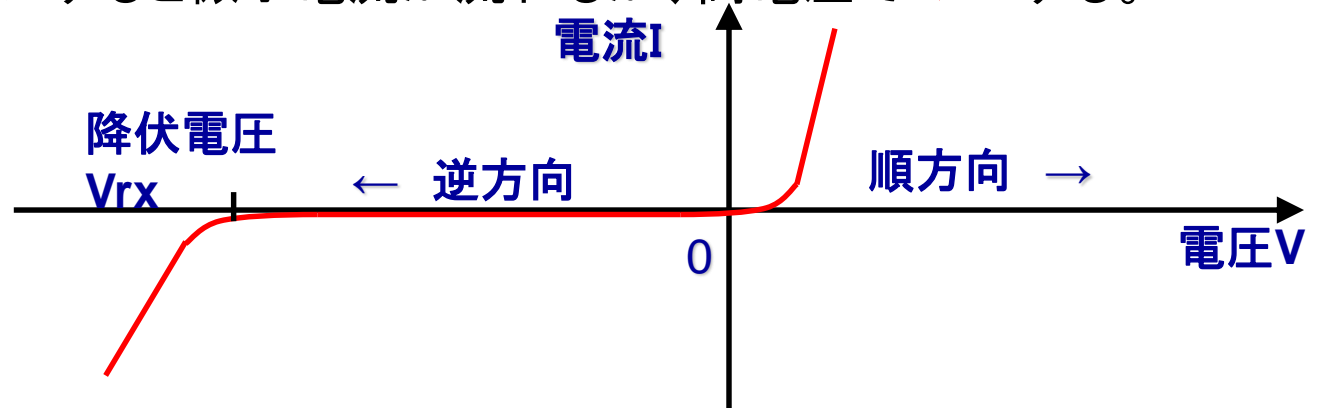


順方向電流が流れた状態で
ステップ的に
逆方向電圧をかけると、
一時的に逆方向に電流が
流れる。

■ 確認__ダイオード特性

1. DC特性

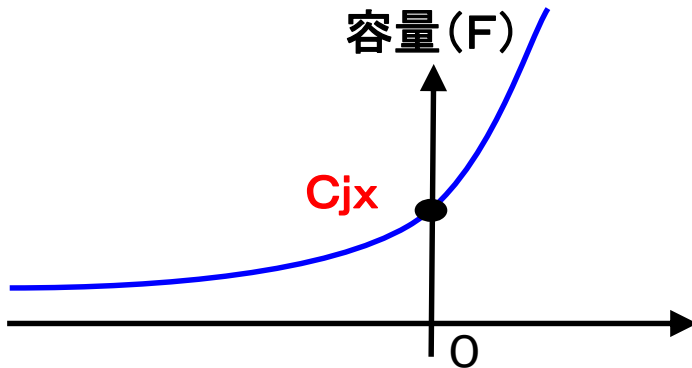
逆方向にバイアスすると微小電流が流れるが、高電圧でQ1. する。



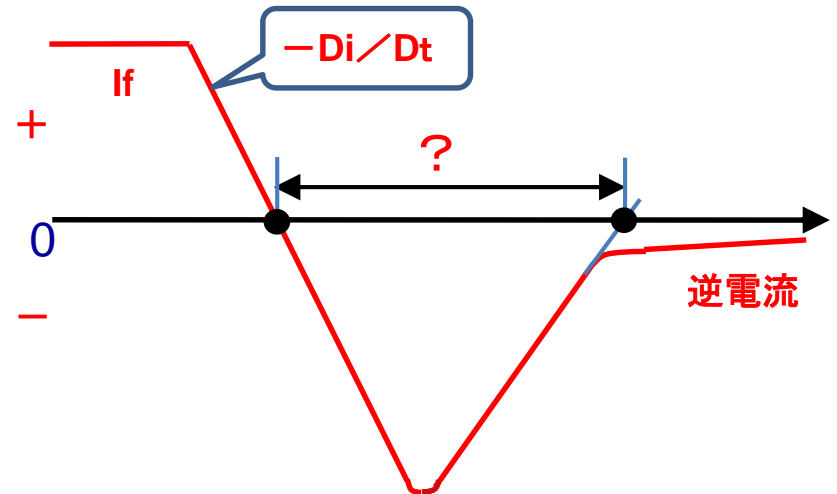
2. 容量特性

PN接合はQ2. となる。

PN接合にQ3. の状態で使用する。



3. 過渡特性



§ 4. 各素子のモデル1

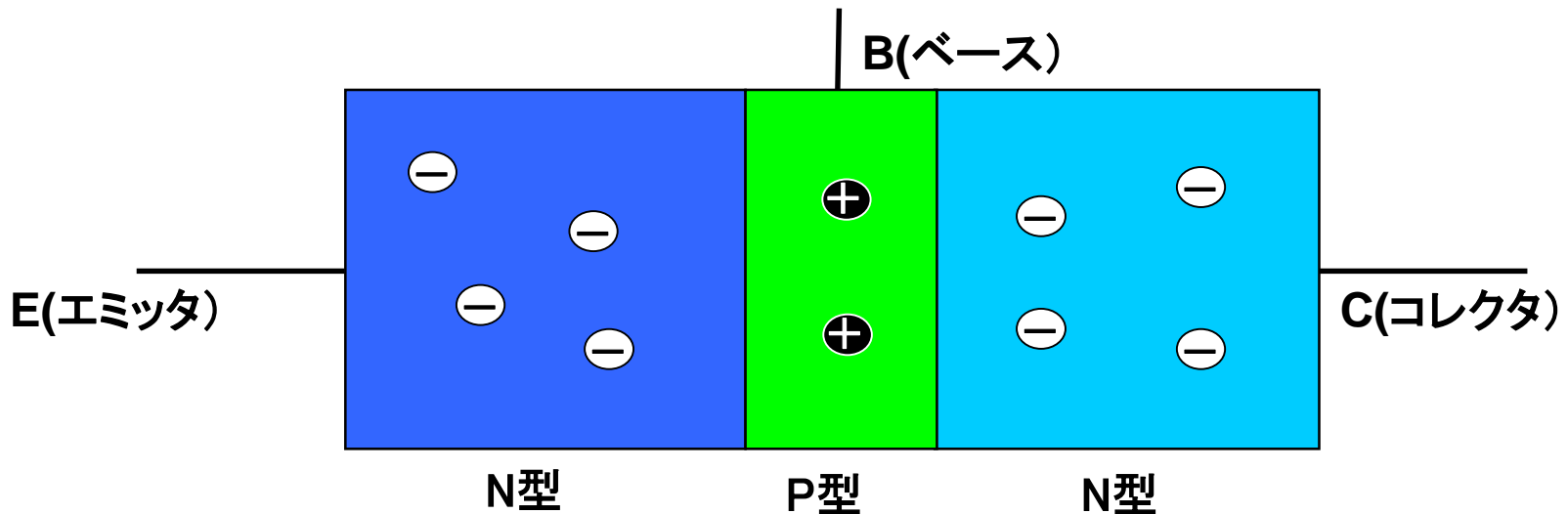
4-2. バイポーラトランジスタ

■バイポーラトランジスタの特徴

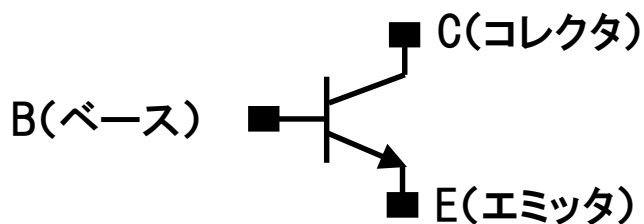
	バイポーラ	MOS
駆動方式	電流	電圧
用途	アナログ	デジタル、アナログ
増幅率	高	中→高*
完成時間TAT	2週間	1~2ヶ月
マスク枚数	10枚	30枚
値段	安価	高価→安価
ミスマッチ	小	大
消費電力	多	少
過渡応答速度	低	高
微小信号	苦手	問題無し

*微細化で高性能、安価になった

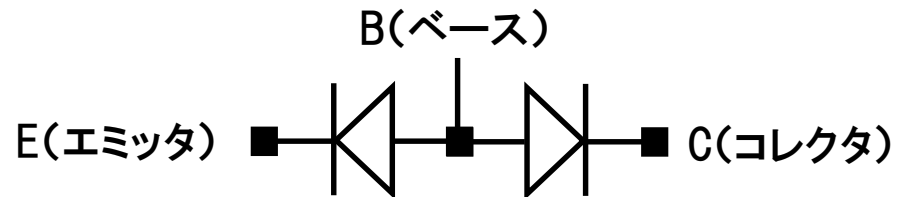
■バイポーラトランジスタ



バイポーラトランジスタの構造(NPN型)



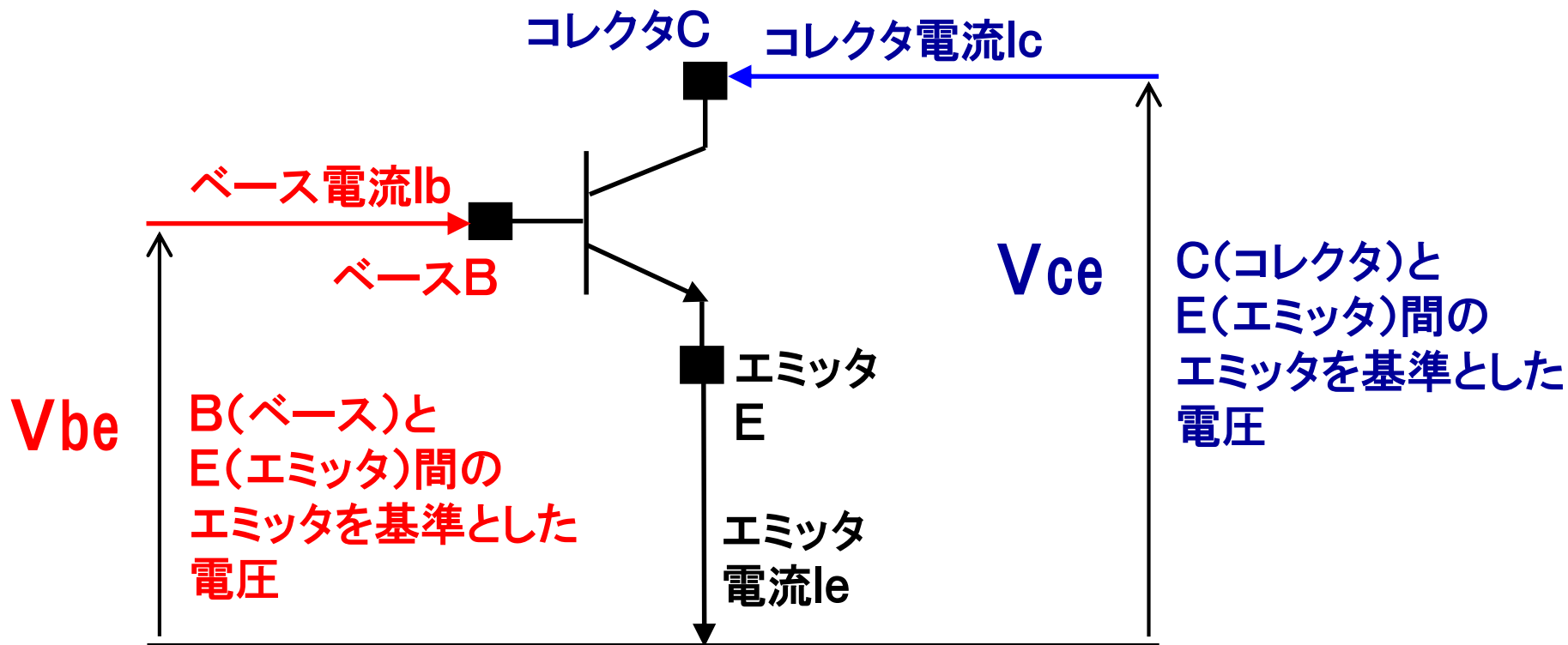
図記号



等価回路(ベース幅が狭いことが条件)

トランジスタ(transistor): trans(遠くから操作する)+resistor(抵抗器)

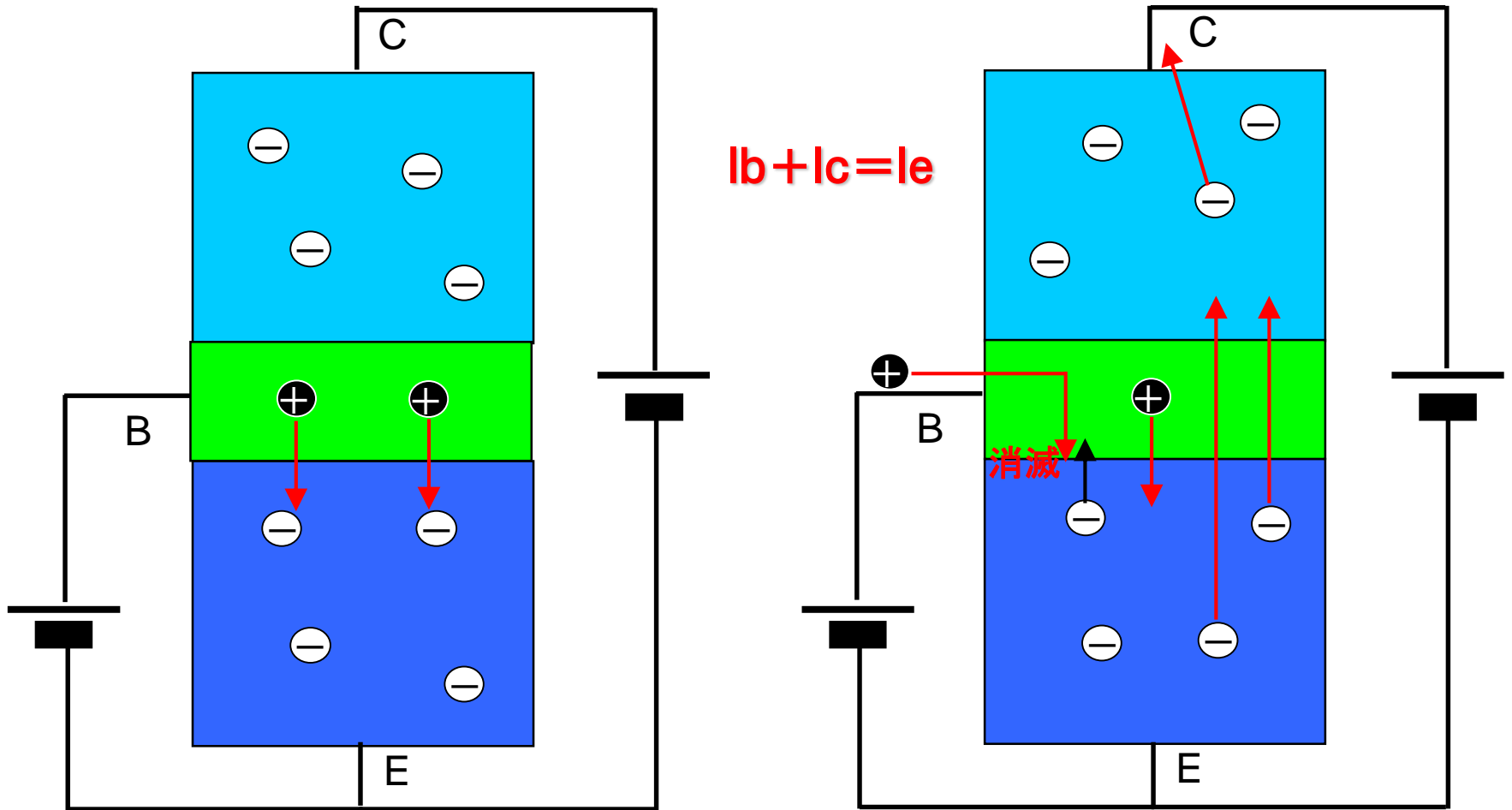
■バイポーラトランジスタを考える準備



電圧・電流の定義

■バイポーラトランジスタの動作

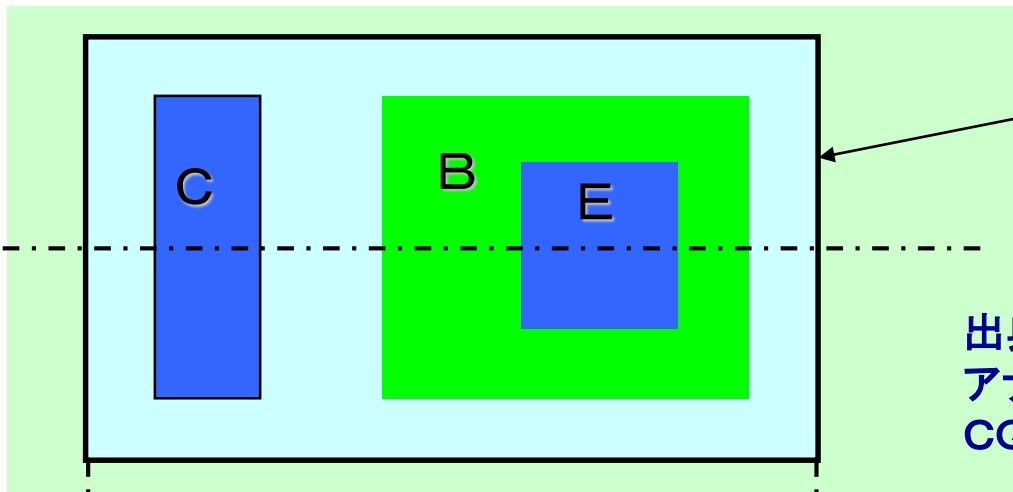
電子と正孔の2種類の極性 (Bi-Polar) のキャリアを使うトランジスタ



バイポーラトランジスタ中の電子と正孔の動き

■バイポーラトランジスタの構造 (NPN)

平面

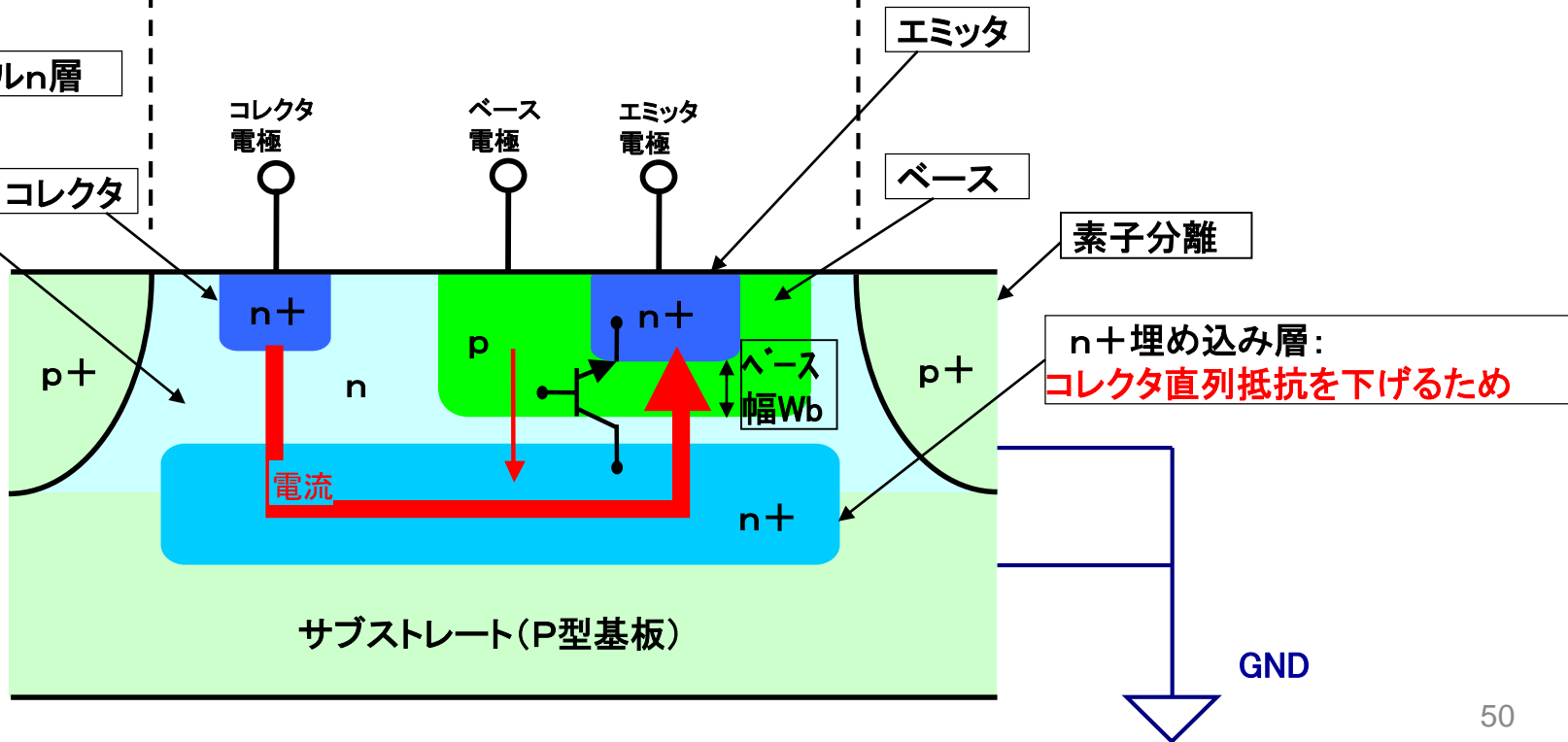


1つのNPNトランジスタ
囲まれた部分を“アイランド
(島)”と呼ぶ

出典：
アナログICの機能回路設計入門、
CQ出版社、青木著。

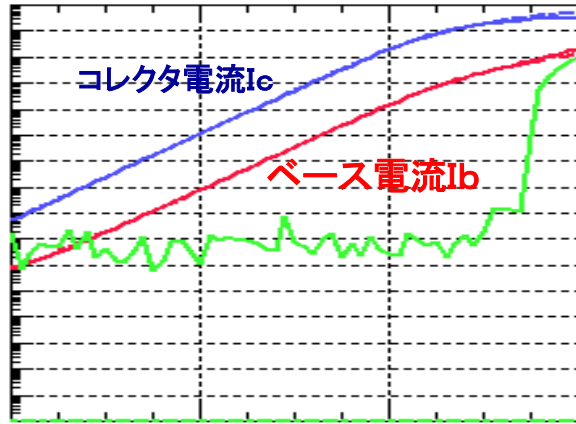
エピタキシャルn層

断面

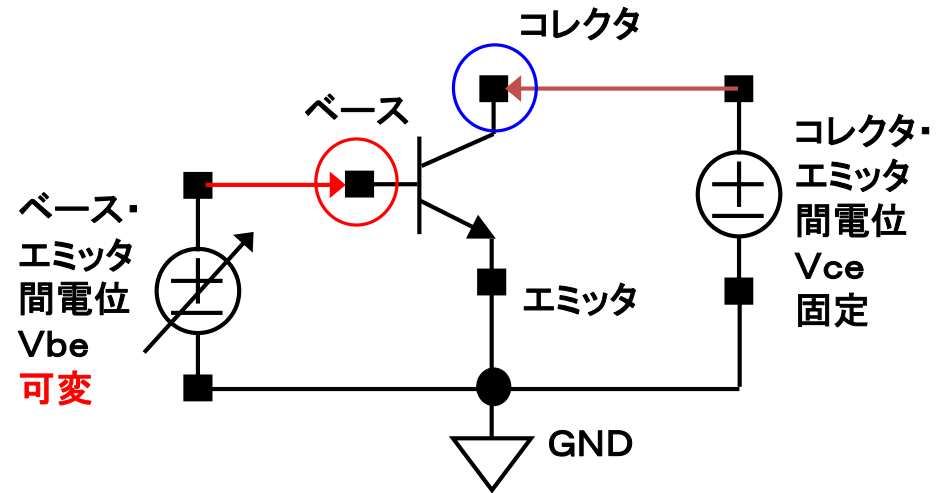


n+埋め込み層：
コレクタ直列抵抗を下げるため

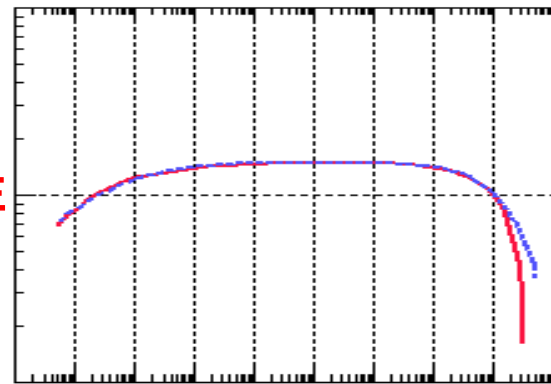
■DC特性その1; 順方向低電流領域



ベース・エミッタ間電圧 V_{be} (V)



エミッタ接地の回路図

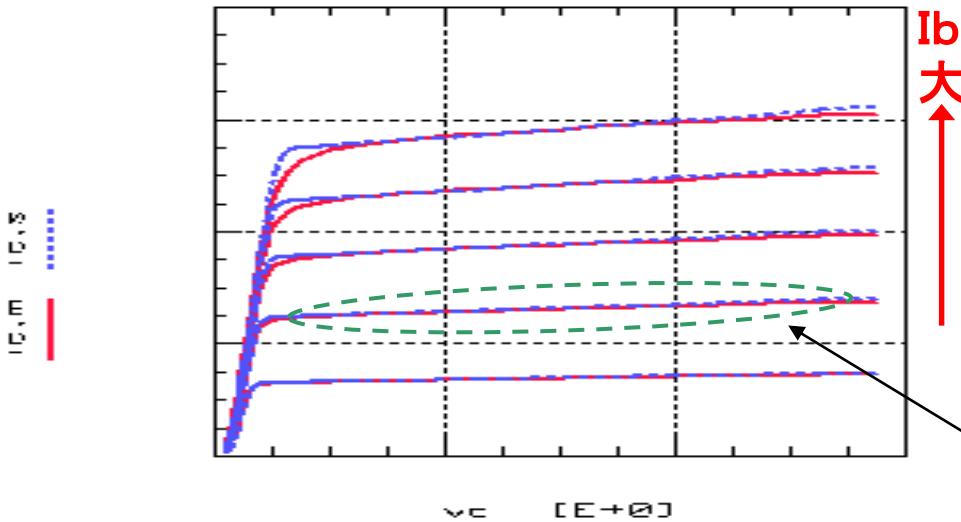


コレクタ電流 I_c (A)

hFE: 増幅率
 コレクタ電流 I_c / ベース電流 I_b

■ DC特性その2; $I_c - V_c$ 特性

コレクタ電流 I_c (A)

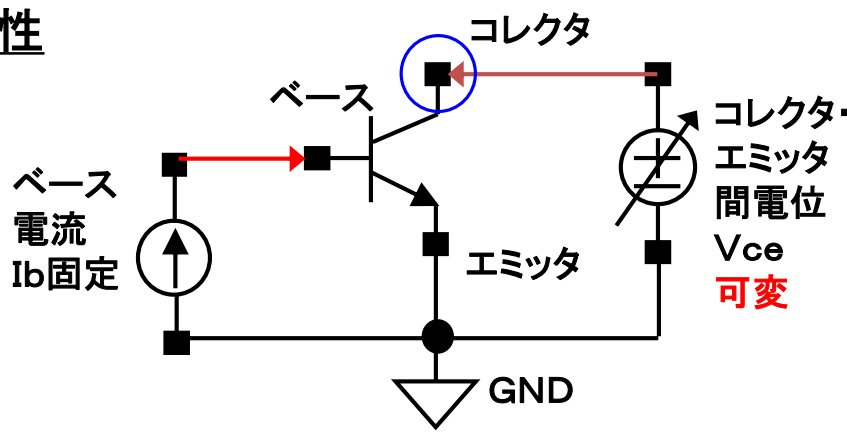


ポイント①
ベース電流 I_b 大で
コレクタ電流 I_c 大

ポイント②
ベース電流 I_b 一定ならば
コレクタ電流 I_c は、ほぼ一定

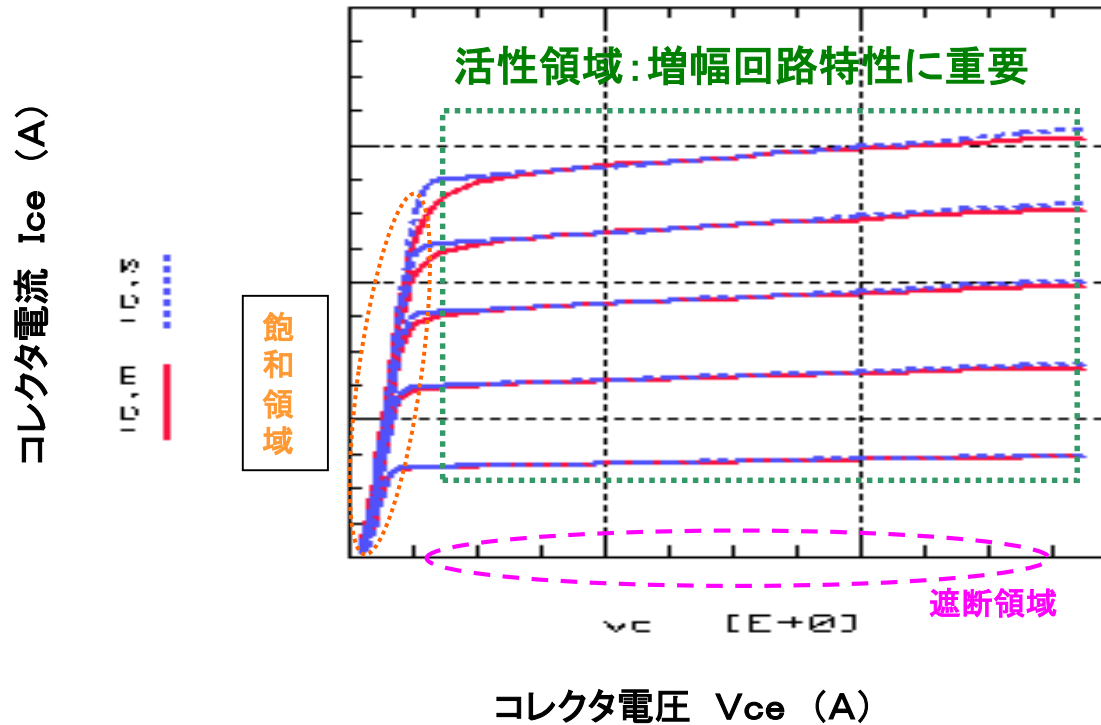
コレクタ電圧 V_{ce} (A)

コレクタ電流 I_c - コレクタ電圧 V_c の特性



エミッタ接地の回路図

■ DC特性その2; $I_c - V_c$ 特性2



遮断領域:

$I_c = 0$ (V_{be} が小さい)。

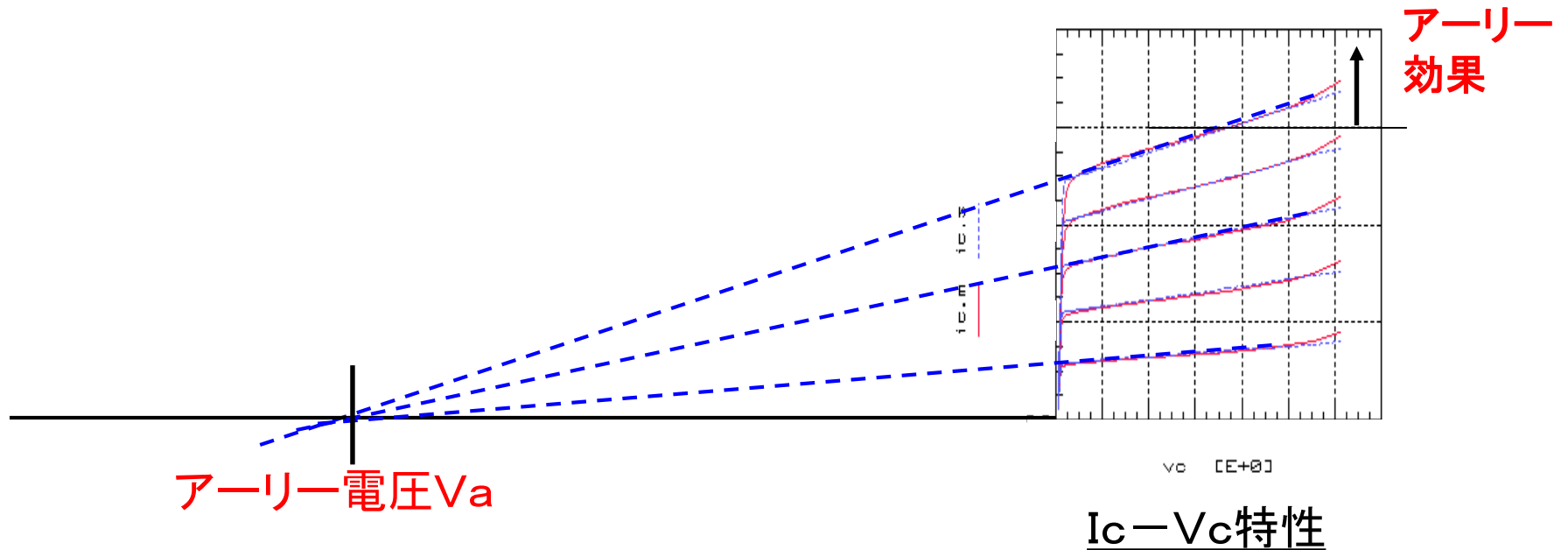
活性領域:

V_{be} の変化に従って I_c が変化する。

飽和領域:

$V_c \approx 0$ となり、 V_{be} を高くしても、これ以上 I_c が増えない。

■ DC特性：アーリー効果とアーリー電圧



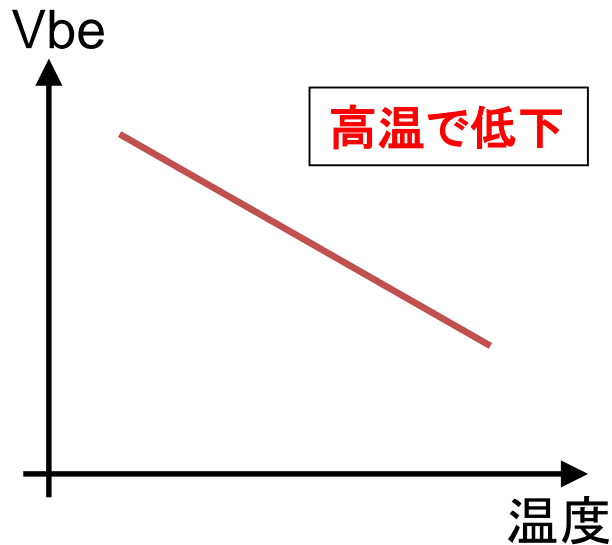
・アーリー効果

V_{ce} が高くなると電流が増える（実効的なベース幅が狭くなるため）。

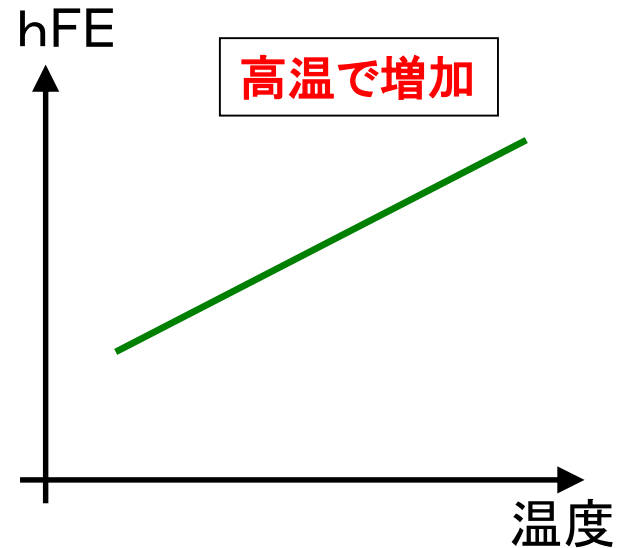
・アーリー電圧

線形領域の外挿線と電圧軸との交点。理想は ∞ ＝線形領域の傾きが水平

■ 温度特性その1



ベース・エミッタ接合電位 V_{be} の温度特性



h_{FE} (コレクタ電流/ベース電流)の温度特性

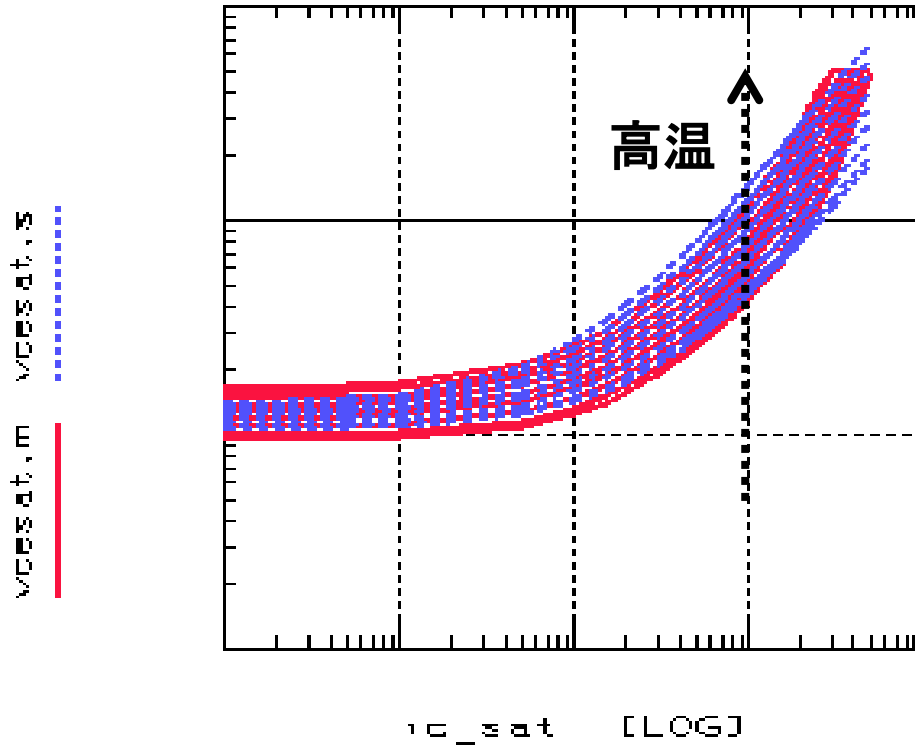
高温ほど電流が流れやすい(非線形)

V_{be} は高温で低下→固定バイアスではバイアス電流が増加→発熱

* 高温になりやすい

■ 温度特性その2

コレクタ・エミッタ間電位 V_{cesat}



高温で増加する

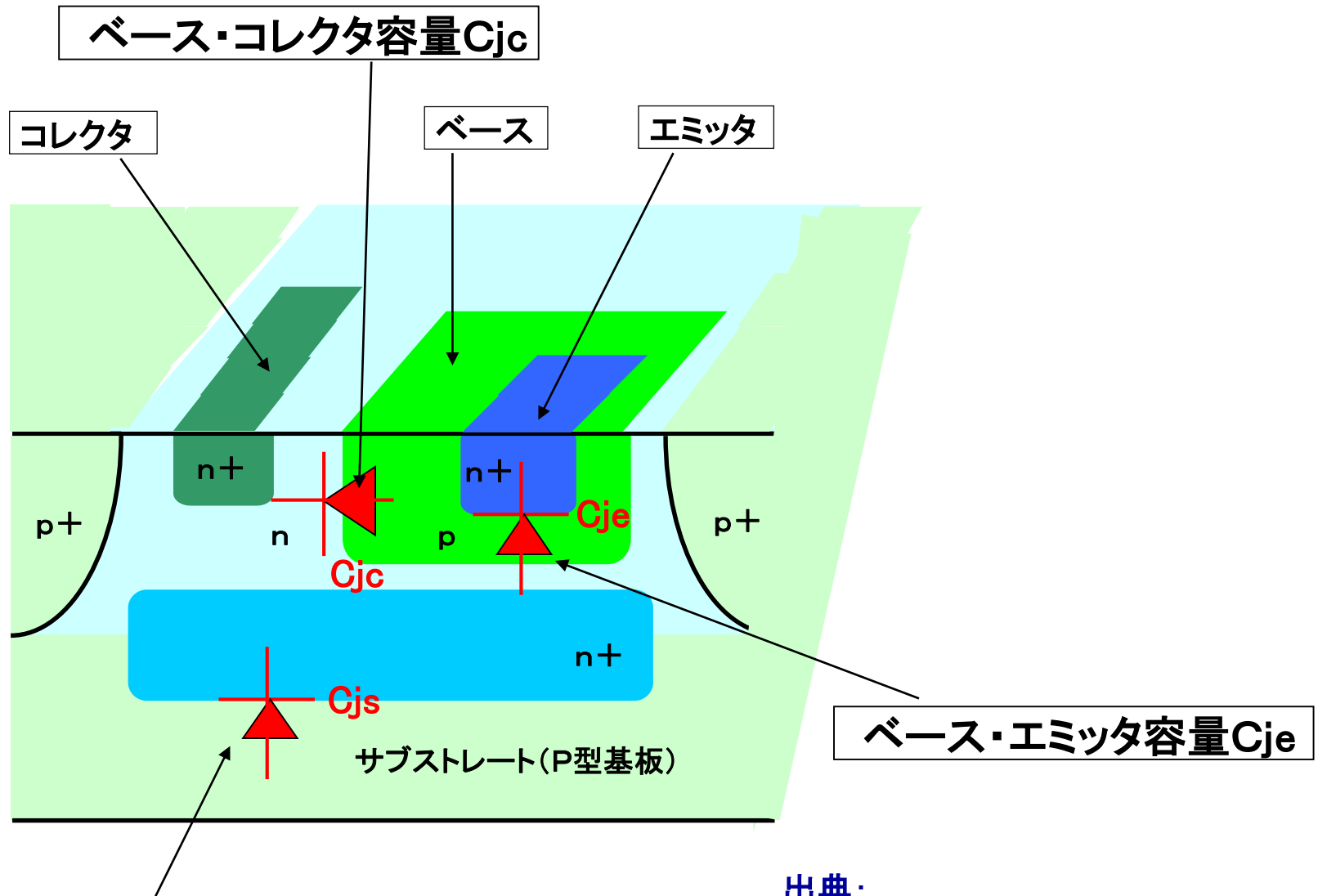
— 実測

- - - シミュレーション

コレクタ電流 I_c (A)

コレクタ抵抗 R_c の温度特性

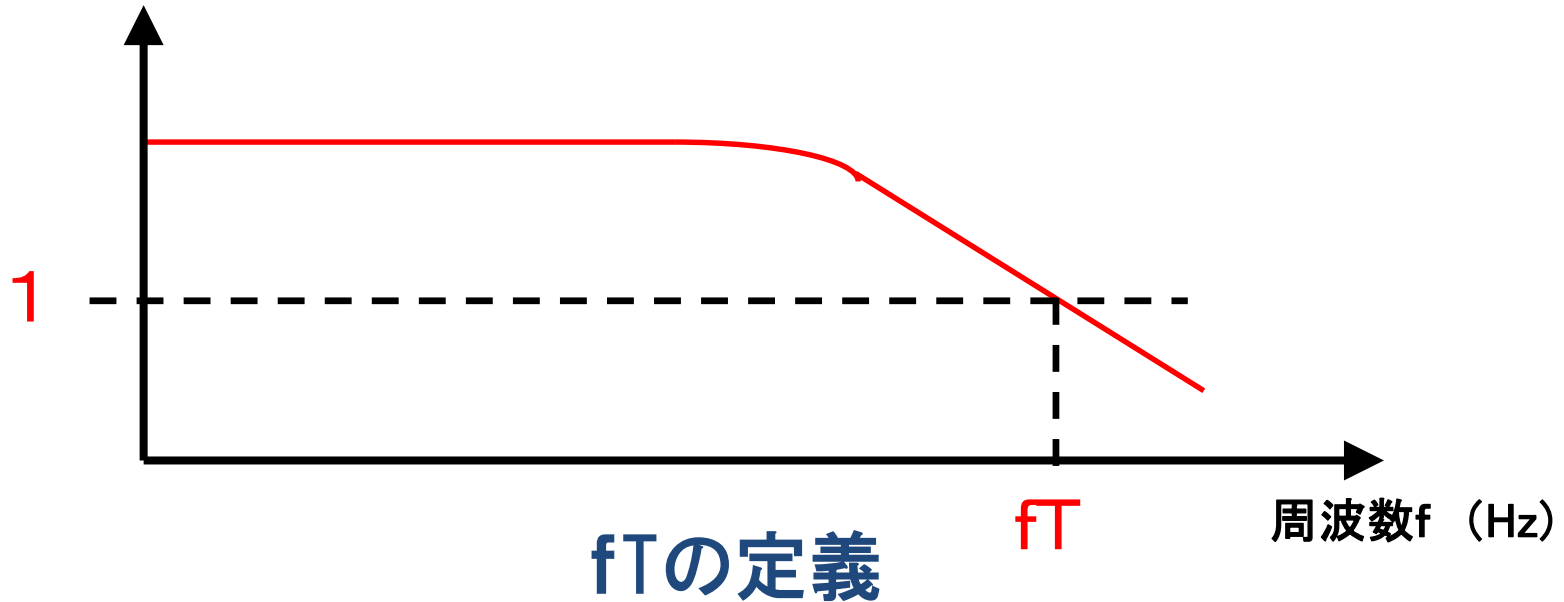
■容量特性



出典：
アナログICの機能回路設計入門、
CQ出版社、青木著。

■ 周波数特性

電流利得



・ f_T (遮断周波数)

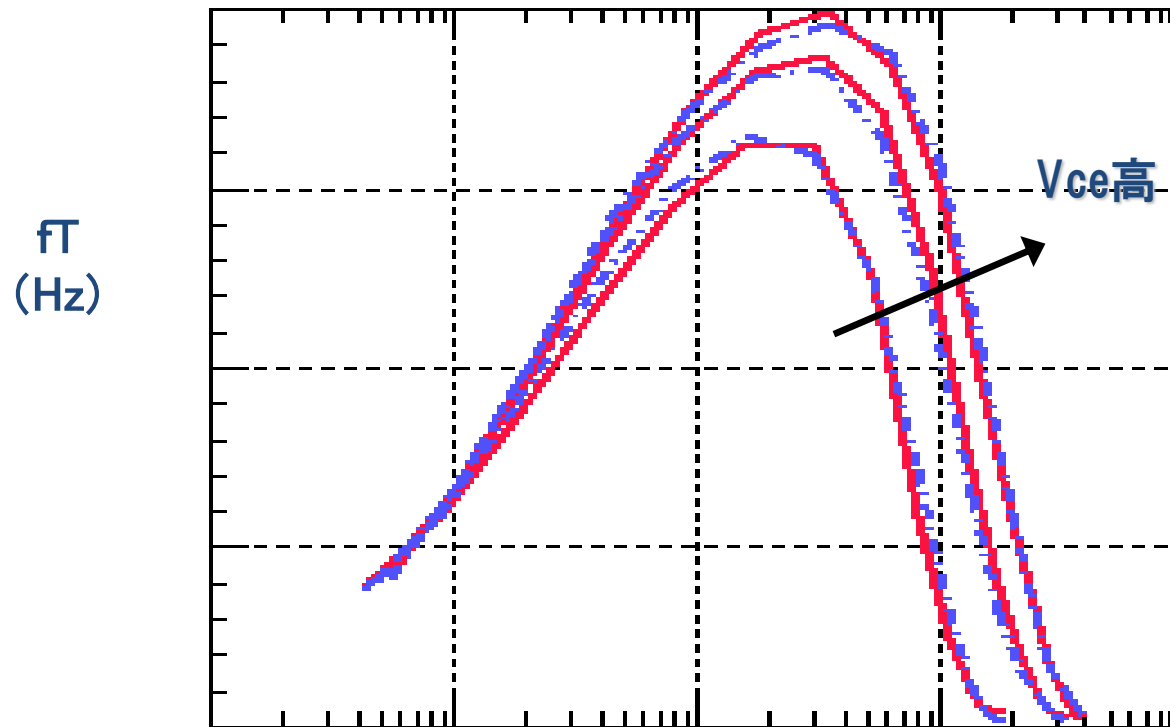
電流利得 = 1 となる周波数

その回路またはデバイスの使用し得る限界周波数

・ f_{max} (最大発振周波数)

電力利得 = 1 となる周波数

■ 周波数特性 (f_T — I_c 特性) の例



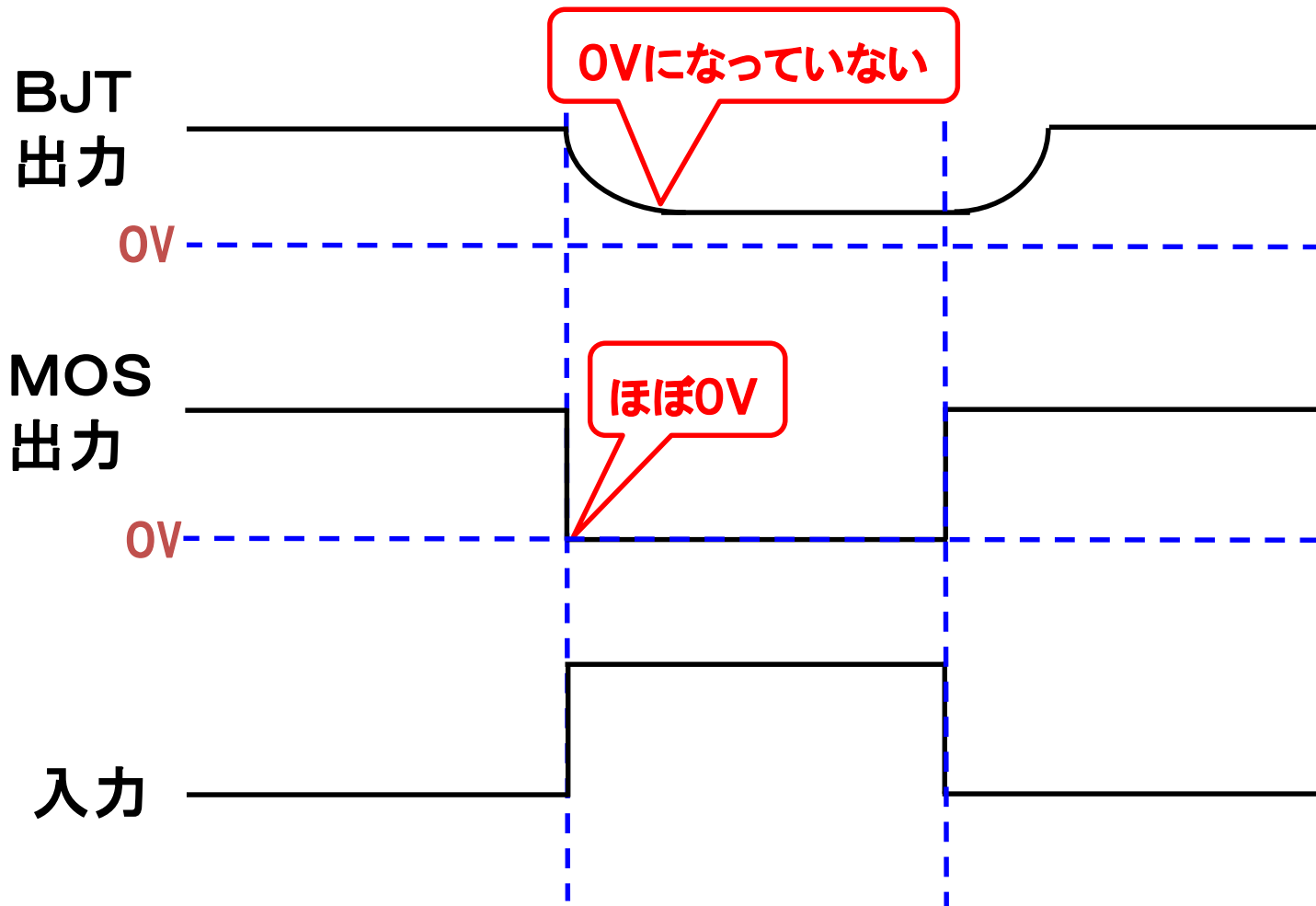
— 実測

--- シミュレーション

コレクタ電流 I_c (A)

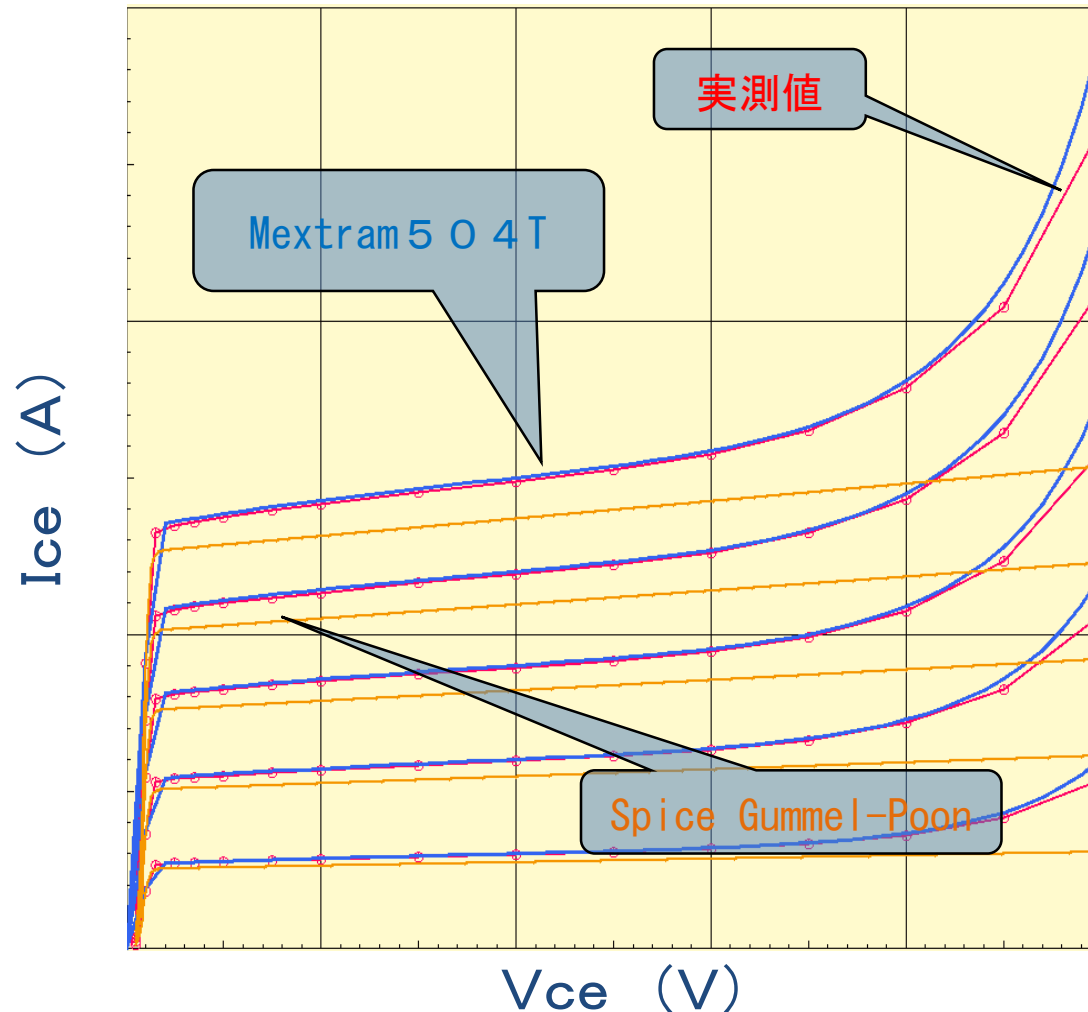
■ 過渡応答特性の例

* BJTはMOSに比べて遅い



■バイポーラモデルの例

* Mextram504Tは高精度モデル。ただしシミュレーション時間はSGP(Spice Gummel-Poon)モデルの3倍。



■奨学金の返済について

私の経験です。参考になれば幸いです。

*ドクター修了時の返済総額は380万円(当時は利子無し)。免除になる職への就職はできず。

*三洋電機(株)に入社して通勤用の自動車を購入。借金は上記と合わせて600万円。年収以上の値。

*20年完済でボーナス払いを実施。10年後、残金150万円。

*奇跡的に会社の持ち株制度で180万円を得る。完済

*早期返済のため15万円を奨学会から得るオマケ付き。