

アナログ電子回路

授業開始までしばらくお待ちください。

- 講義資料（スライド等）は Google drive に置く。授業前には虫喰い状態のスライドのみを提供するが、授業後に穴埋め版を uncovered フォルダに置くので復習に活用されたい。

<https://drive.google.com/drive/folders/1yzIsRZsVGFErhnfzn8Hycsn6nRPNCczn>



- 授業の録画も同じところに置く。
- ミニレポートは **Google Forms** (<https://forms.gle/MpUmErDi6qk8GSUC6>) に提出。

- 出席は UNIPA で取るが、出席そのものは評価せず。極論するとテストのみ出席で他は全欠席でも A 評価はあり得る。なお、**不正出席をした場合は 21 点の減点**とする。
- 基本的には**中間演習**と**期末試験**で評価。
- 毎回ミニレポートを課す。出す者は提出期間を厳守すること。
- 試験の不合格者は**毎回のミニレポート**と**出席**で少し救済する。
(しっかりした内容のミニレポートを概ね 9 割以上提出し、かつ UNIPA で 8 割以上遅刻せず出席していた場合最大 10 点程度の救済。提出数や出席数が少ない場合は救済幅が縮小する。いずれかが 7 割を下回ったら一切救済しない。締め切り後の提出は認めない。)
- スライド穴埋め版はその回の授業終了後に公開。
- **授業中に**スライドの誤りを見つけて指摘してくれた者には、誤り一箇所につき先着一名様限り 100 点満点 1 点相当の加点を行う。(ただしごく軽微なものなど、内容によっては加点しない場合もあり。)

2025

S 科アナログ電子回路

Analog Electronics

『トランジスタの小信号モデル』

小林裕之

大阪工業大学 RD 学部システムデザイン工学科



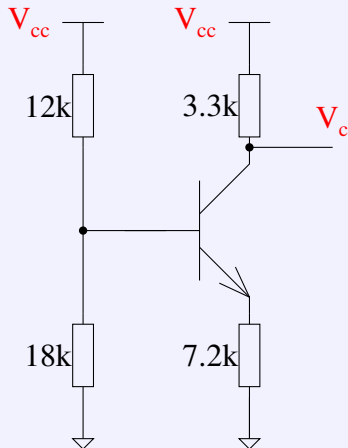
OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

5 of 14

a L^AT_EX + Beamer slideshow

復習の練習問題

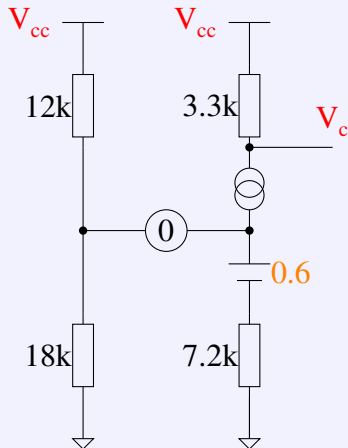
こういうのを DC 解析といいます。



コレクタ電位 V_c を求めよ。ただし、トランジスタはナレータ・ノレータモデルで計算し、その V_{BE} を 0.6 V とする。また $V_{cc} = 3\text{ V}$ とする。

復習の練習問題

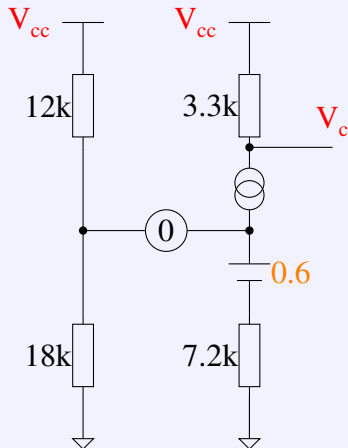
こういうのを DC 解析といいます。



コレクタ電位 V_c を求めよ。ただし、トランジスタはナレータ・ノレータモデルで計算し、その V_{BE} を 0.6 V とする。また $V_{cc} = 3 \text{ V}$ とする。

復習の練習問題

こういうのを DC 解析といいます。

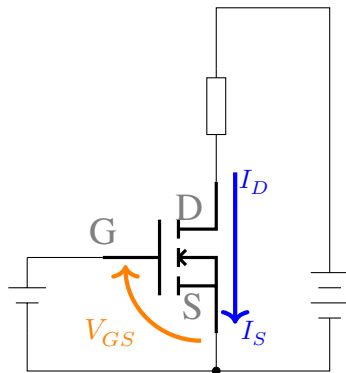


コレクタ電位 V_c を求めよ。ただし、トランジスタはナレータ・ノレータモデルで計算し、その V_{BE} を 0.6 V とする。また $V_{cc} = 3\text{ V}$ とする。

答: 2.45 V

MOS トランジスタで小信号を考える

ここも含めて以降全て飽和領域とします。



MOS トランジスタの飽和領域における特性

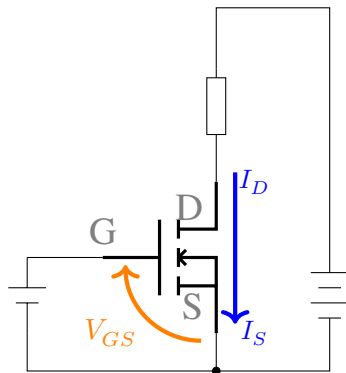
飽和領域では I_D は の 。

$$I_D =$$

問題: V_{GS} が**微小変化**(ΔV_{GS}) したときの I_D の変化 $\Delta I_D (= \Delta f(V_{GS}))$ を求めよ。

MOS トランジスタで小信号を考える

ここも含めて以降全て飽和領域とします。



MOS トランジスタの飽和領域における特性

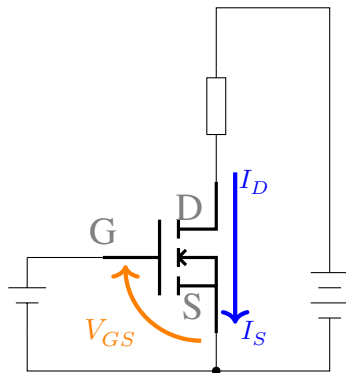
飽和領域では I_D は V_{GS} の

$$I_D =$$

問題: V_{GS} が**微小変化**(ΔV_{GS}) したときの I_D の変化 $\Delta I_D (= \Delta f(V_{GS}))$ を求めよ。

MOS トランジスタで小信号を考える

ここも含めて以降全て飽和領域とします。



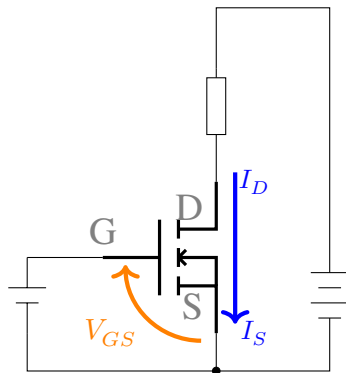
MOS トランジスタの飽和領域における特性
飽和領域では I_D は V_{GS} の関数。

$$I_D =$$

問題: V_{GS} が微小変化(ΔV_{GS}) したときの I_D の変化 $\Delta I_D (= \Delta f(V_{GS}))$ を求めよ。

MOS トランジスタで小信号を考える

ここも含めて以降全て飽和領域とします。



MOS トランジスタの飽和領域における特性

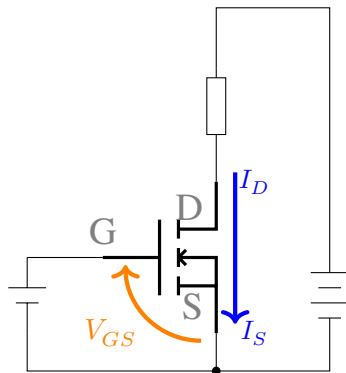
飽和領域では I_D は V_{GS} の関数。

$$I_D = f(V_{GS}) =$$

問題: V_{GS} が微小変化(ΔV_{GS}) したときの I_D の変化 $\Delta I_D (= \Delta f(V_{GS}))$ を求めよ。

MOS トランジスタで小信号を考える

ここも含めて以降全て飽和領域とします。



MOS トランジスタの飽和領域における特性

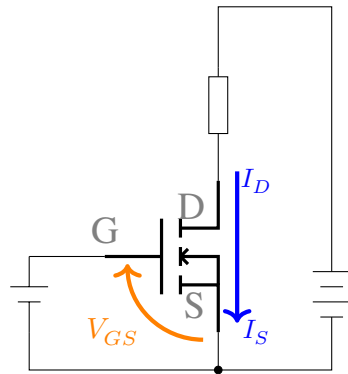
飽和領域では I_D は V_{GS} の**関数**。

$$I_D = f(V_{GS}) = K(V_{GS} - V_T)^2$$

問題: V_{GS} が**微小変化**(ΔV_{GS}) したときの I_D の変化 $\Delta I_D (= \Delta f(V_{GS}))$ を求めよ。

MOS トランジスタで小信号を考える

ここも含めて以降全て飽和領域とします。



MOS トランジスタの飽和領域における特性

飽和領域では I_D は V_{GS} の**関数**。

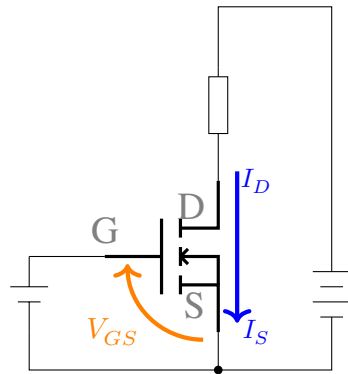
$$I_D = f(V_{GS}) = K(V_{GS} - V_T)^2$$

問題: V_{GS} が**微小変化**(ΔV_{GS}) したときの I_D の変化 $\Delta I_D (= \Delta f(V_{GS}))$ を求めよ。

$$\Delta I_D = \Delta f(V_{GS}) =$$

MOS トランジスタで小信号を考える

ここも含めて以降全て飽和領域とします。



MOS トランジスタの飽和領域における特性

飽和領域では I_D は V_{GS} の関数。

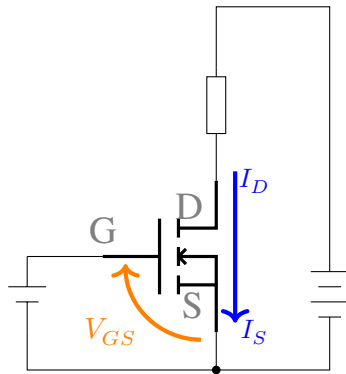
$$I_D = f(V_{GS}) = K(V_{GS} - V_T)^2$$

問題: V_{GS} が微小変化(ΔV_{GS}) したときの I_D の変化 $\Delta I_D (= \Delta f(V_{GS}))$ を求めよ。

$$\Delta I_D = \Delta f(V_{GS}) = f'(V_{GS}) \times \Delta V_{GS} =$$

MOS トランジスタで小信号を考える

ここも含めて以降全て飽和領域とします。



MOS トランジスタの飽和領域における特性

飽和領域では I_D は V_{GS} の関数。

$$I_D = f(V_{GS}) = K(V_{GS} - V_T)^2$$

問題: V_{GS} が微小変化(ΔV_{GS}) したときの I_D の変化 $\Delta I_D (= \Delta f(V_{GS}))$ を求めよ。

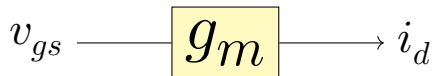
$$\Delta I_D = \Delta f(V_{GS}) = f'(V_{GS}) \times \Delta V_{GS} = 2K(V_{GS} - V_T) \times \Delta V_{GS}$$

MOS トランジスタの小信号モデル

- V_{GS} の変化分 $\Delta V_{GS} \rightarrow v_{gs}$

- I_D の変化分 $\Delta I_D \rightarrow i_d$

と表記することにする (小信号)。
すると前ページより ↓ こうなる。



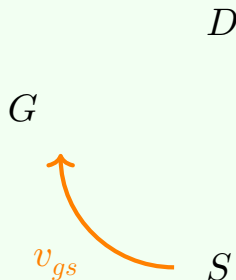
g_m :

MOS トランジスタの小信号モデル

- $i_g = 0$

- $i_d = g_m v_{gs}$

は ↓ このように描ける！

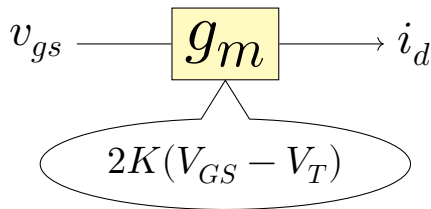


MOS トランジスタの小信号モデル

- V_{GS} の変化分 $\Delta V_{GS} \rightarrow v_{gs}$

- I_D の変化分 $\Delta I_D \rightarrow i_d$

と表記することにする (**小信号**)。
すると前ページより ↓ こうなる。



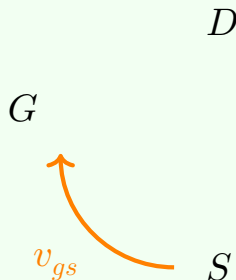
g_m :

MOS トランジスタの小信号モデル

- $i_g = 0$

- $i_d = g_m v_{gs}$

は ↓ このように描ける！

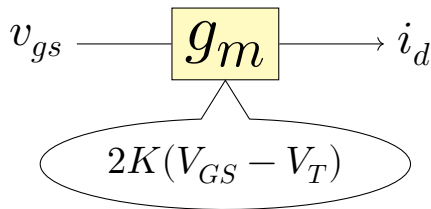


MOS トランジスタの小信号モデル

- V_{GS} の変化分 $\Delta V_{GS} \rightarrow v_{gs}$

- I_D の変化分 $\Delta I_D \rightarrow i_d$

と表記することにする (**小信号**)。
すると前ページより ↓ こうなる。



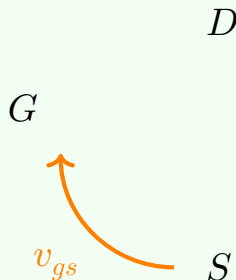
g_m : **トランス**
伝達コンダクタンス

MOS トランジスタの**小信号モデル**

- $i_g = 0$

- $i_d = g_m v_{gs}$

は ↓ このように描ける！

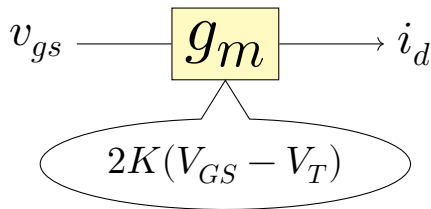


MOS トランジスタの小信号モデル

- V_{GS} の変化分 $\Delta V_{GS} \rightarrow v_{gs}$

- I_D の変化分 $\Delta I_D \rightarrow i_d$

と表記することにする (**小信号**)。
すると前ページより ↓ こうなる。



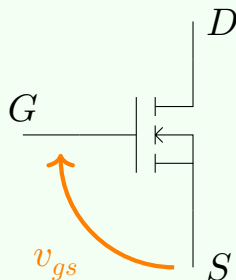
g_m : **トランス**
伝達コンダクタンス

MOS トランジスタの**小信号モデル**

- $i_g = 0$

- $i_d = g_m v_{gs}$

は ↓ このように描ける！

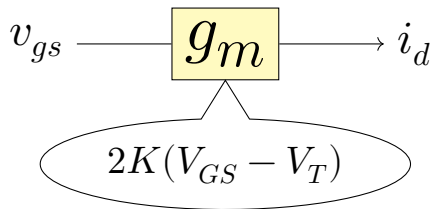


MOS トランジスタの小信号モデル

- V_{GS} の変化分 $\Delta V_{GS} \rightarrow v_{gs}$

- I_D の変化分 $\Delta I_D \rightarrow i_d$

と表記することにする (**小信号**)。
すると前ページより ↓ こうなる。



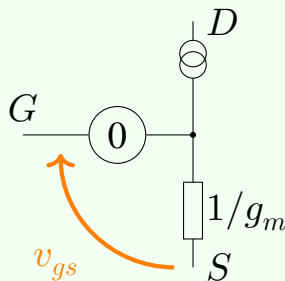
g_m : **トランス**
伝達コンダクタンス

MOS トランジスタの小信号モデル

- $i_g = 0$

- $i_d = g_m v_{gs}$

は ↓ このように描ける！

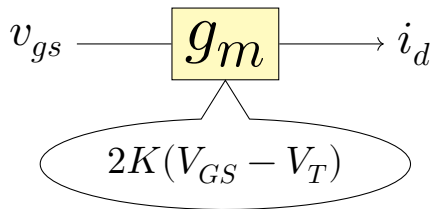


MOS トランジスタの小信号モデル

- V_{GS} の変化分 $\Delta V_{GS} \rightarrow v_{gs}$

- I_D の変化分 $\Delta I_D \rightarrow i_d$

と表記することにする (**小信号**)。
すると前ページより ↓ こうなる。



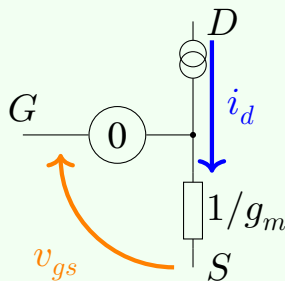
g_m : **トランス**
伝達コンダクタンス

MOS トランジスタの**小信号モデル**

- $i_g = 0$

- $i_d = g_m v_{gs}$

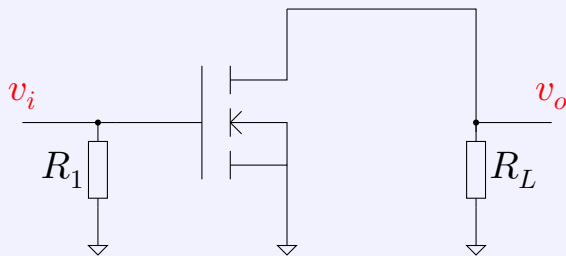
は ↓ このように描ける！



小信号モデルの練習

こんな問題に意味があるのか…? と思うかも知れないけれど実は深い意味があります。

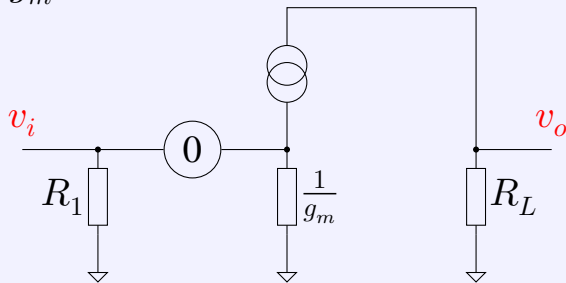
問: バイアス云々は無視 して、小信号モデルが使えるという前提で、以下の回路の v_o を v_i で表わせ。トランスコンダクタンスを g_m とする。



小信号モデルの練習

こんな問題に意味があるのか…? と思うかも知れないけれど実は深い意味があります。

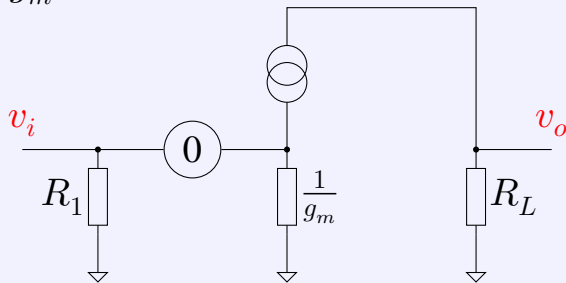
問: バイアス云々は無視 して、小信号モデルが使えるという前提で、以下の回路の v_o を v_i で表わせ。トランスコンダクタンスを g_m とする。



小信号モデルの練習

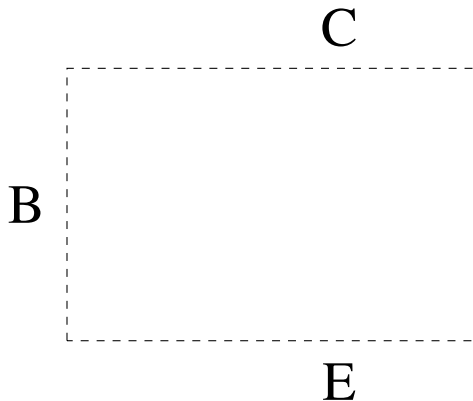
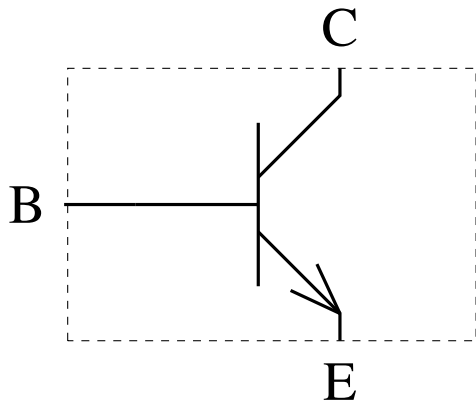
こんな問題に意味があるのか…? と思うかも知れないけれど実は深い意味があります。

問: バイアス云々は無視 して、小信号モデルが使えるという前提で、以下の回路の v_o を v_i で表わせ。トランスコンダクタンスを g_m とする。



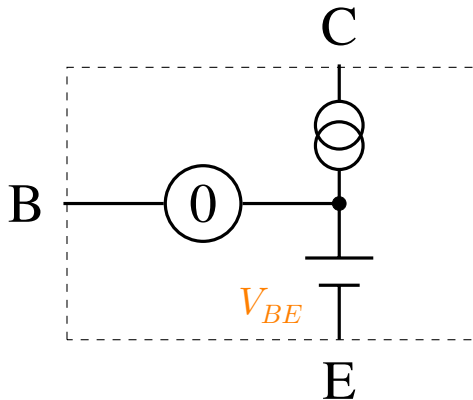
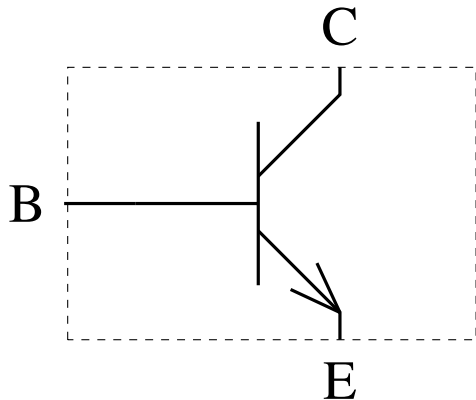
$$v_o = -g_m R_L v_i$$

前回の復習: バイポーラトランジスタの大信号モデル



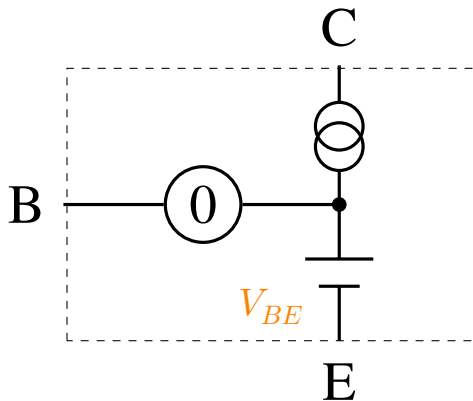
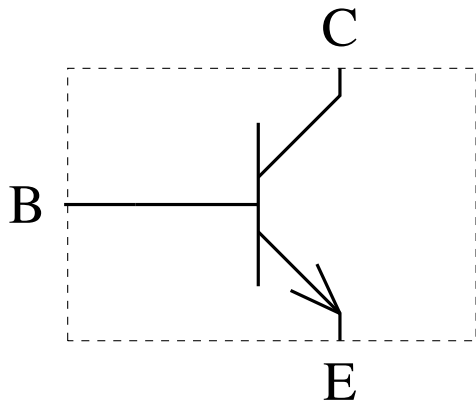
問題点:

前回の復習: バイポーラトランジスタの大信号モデル



問題点:

前回の復習: バイポーラトランジスタの大信号モデル

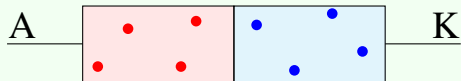


問題点: **小信号**には使えない。(そりゃまあ、名前からしてね。)

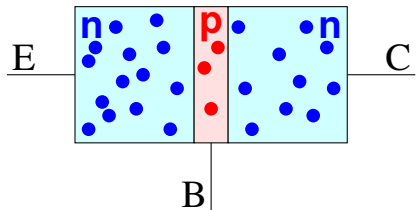
バイポーラトランジスタの $V_{BE} - I_E$ 特性

何と、トランジスタの V_{BE} と I_E には _____ がある!

復習: ダイオード



$$I_d = I_s \left\{ \exp \left(\frac{qV_d}{kT} \right) - 1 \right\}$$



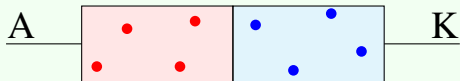
$$I_E =$$

MOS トランジスタと同じことをやってみよう!

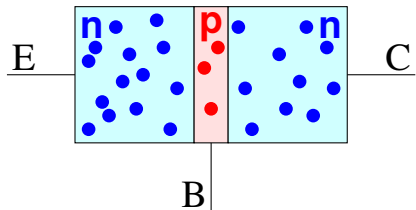
バイポーラトランジスタの $V_{BE} - I_E$ 特性

何と、トランジスタの V_{BE} と I_E には ダイオードみたいな関係 がある!

復習: ダイオード



$$I_d = I_s \left\{ \exp \left(\frac{qV_d}{kT} \right) - 1 \right\}$$



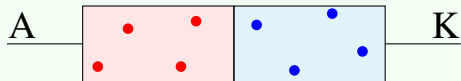
$$I_E =$$

MOS トランジスタと同じことをやってみよう!

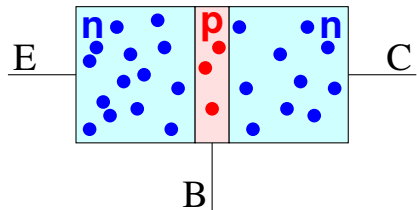
バイポーラトランジスタの $V_{BE} - I_E$ 特性

何と、トランジスタの V_{BE} と I_E には ダイオードみたいな関係 がある!

復習: ダイオード



$$I_d = I_s \left\{ \exp \left(\frac{qV_d}{kT} \right) - 1 \right\}$$



$$I_E = I_{ES} \left\{ \exp \left(\frac{qV_{BE}}{kT} \right) - 1 \right\}$$

MOS トランジスタと同じことをやってみよう!

バイポーラトランジスタの小信号特性

どこかで見たことのある計算？

$$I_E(V_{BE}) = I_{ES} \left\{ \exp \left(\frac{qV_{BE}}{kT} \right) - 1 \right\}$$

において、 V_{BE} が**微小変化**したときの (つまり小信号に対する) I_E の変化分 i_e を求めよ。ただし V_{BE} の微小変化分を v_{be} と表すこと。

答:

バイポーラトランジスタの小信号特性

どこかで見たことのある計算？

$$I_E(V_{BE}) = I_{ES} \left\{ \exp \left(\frac{qV_{BE}}{kT} \right) - 1 \right\}$$

において、 V_{BE} が**微小変化**したときの (つまり小信号に対する) I_E の変化分 i_e を求めよ。ただし V_{BE} の微小変化分を v_{be} と表すこと。

答:

$$i_e = I'_E(V_{BE}) \times v_{be} =$$

バイポーラトランジスタの小信号特性

どこかで見たことのある計算？

$$I_E(V_{BE}) = I_{ES} \left\{ \exp \left(\frac{qV_{BE}}{kT} \right) - 1 \right\}$$

において、 V_{BE} が**微小変化**したときの (つまり小信号に対する) I_E の変化分 i_e を求めよ。ただし V_{BE} の微小変化分を v_{be} と表すこと。

答:

$$i_e = I'_E(V_{BE}) \times v_{be} = \underbrace{I_{ES} \frac{q}{kT} \exp \left(\frac{qV_{BE}}{kT} \right)}_{g_m} \times v_{be} \simeq$$

バイポーラトランジスタの小信号特性

どこかで見たことのある計算？

$$I_E(V_{BE}) = I_{ES} \left\{ \exp \left(\frac{qV_{BE}}{kT} \right) - 1 \right\}$$

において、 V_{BE} が**微小変化**したときの (つまり小信号に対する) I_E の変化分 i_e を求めよ。ただし V_{BE} の微小変化分を v_{be} と表すこと。

答:

$$i_e = I'_E(V_{BE}) \times v_{be} = \underbrace{I_{ES} \frac{q}{kT} \exp \left(\frac{qV_{BE}}{kT} \right)}_{g_m} \times v_{be} \simeq \underbrace{\frac{qI_E}{kT}}_{g_m} \times v_{be}$$

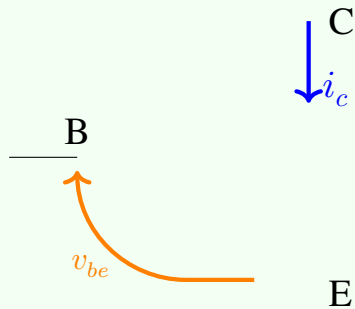
バイポーラトランジスタの小信号モデル

あれあれ？

前提・仮定

- V_{BE} の変化分 (小信号): v_{be}
- I_C の変化分 (小信号): i_c
- I_B の変化分 (小信号) i_b は とする。…この場合、
- $i_e = g_m \times v_{be}$

bipolar トランジスタの小信号モデル



$1/g_m = r_e$ を

と言う。

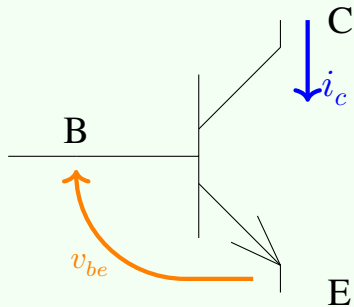
バイポーラトランジスタの小信号モデル

あれあれ？

前提・仮定

- V_{BE} の変化分 (小信号): v_{be}
- I_C の変化分 (小信号): i_c
- I_B の変化分 (小信号) i_b は 〇 とする。…この場合、 〇
- $i_e = g_m \times v_{be}$

bipolar トランジスタの小信号モデル



$1/g_m = r_e$ を

と言う。

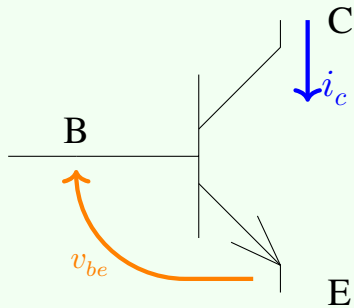
バイポーラトランジスタの小信号モデル

あれあれ？

前提・仮定

- V_{BE} の変化分 (小信号): v_{be}
- I_C の変化分 (小信号): i_c
- I_B の変化分 (小信号) i_b は**ほぼゼロ**とする。…この場合、 $i_b \approx 0$
- $i_e = g_m \times v_{be}$

bipolar トランジスタの小信号モデル



$1/g_m = r_e$ を

と言う。

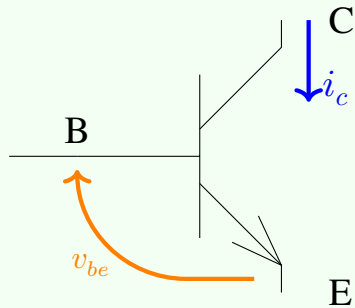
バイポーラトランジスタの小信号モデル

あれあれ？

前提・仮定

- V_{BE} の変化分 (小信号): v_{be}
- I_C の変化分 (小信号): i_c
- I_B の変化分 (小信号) i_b は**ほぼゼロ**とする。…この場合、 $i_e = i_c$ 。
- $i_e = g_m \times v_{be}$

bipolar トランジスタの小信号モデル



$1/g_m = r_e$ を

と言う。

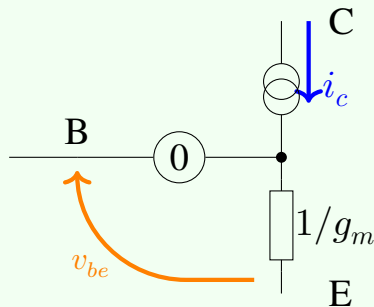
バイポーラトランジスタの小信号モデル

あれあれ？

前提・仮定

- V_{BE} の変化分 (小信号): v_{be}
- I_C の変化分 (小信号): i_c
- I_B の変化分 (小信号) i_b は**ほぼゼロ**とする。…この場合、 $i_e = i_c$ 。
- $i_e = g_m \times v_{be}$

bipolar トランジスタの小信号モデル



$1/g_m = r_e$ を と言う。

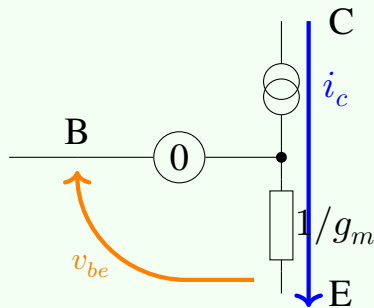
バイポーラトランジスタの小信号モデル

あれあれ？

前提・仮定

- V_{BE} の変化分 (小信号): v_{be}
- I_C の変化分 (小信号): i_c
- I_B の変化分 (小信号) i_b は**ほぼゼロ**とする。…この場合、 $i_e = i_c$ 。
- $i_e = g_m \times v_{be}$

bipolar トランジスタの小信号モデル



$1/g_m = r_e$ を**エミッタ抵抗**と言う。

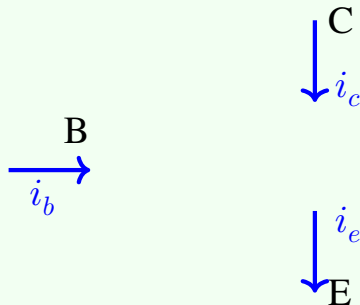
(参考) もう一つの小信号モデル

$I_B \neq 0$ を考える必要があるときよう…なのですが、この授業では今後あまり登場しません。

前提・仮定

- I_B の変化分 (小信号): i_b
- I_C の変化分 (小信号): i_c
- I_E の変化分 (小信号): i_e
- _____, $i_c =$
を使う。

bipolar トランジスタの小信号モデル



r_b をベース広がり抵抗と言う。

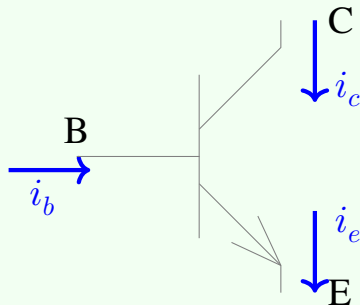
(参考) もう一つの小信号モデル

$I_B \neq 0$ を考える必要があるときよう…なのですが、この授業では今後あまり登場しません。

前提・仮定

- I_B の変化分 (小信号): i_b
- I_C の変化分 (小信号): i_c
- I_E の変化分 (小信号): i_e
- _____, $i_c =$
を使う。

bipolar トランジスタの小信号モデル



r_b をベース広がり抵抗と言う。

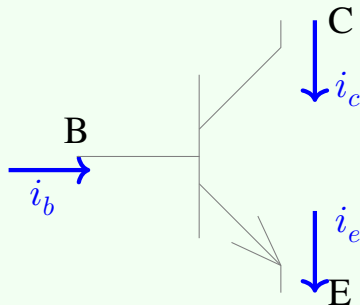
(参考) もう一つの小信号モデル

$I_B \neq 0$ を考える必要があるときよう…なのですが、この授業では今後あまり登場しません。

前提・仮定

- I_B の変化分 (小信号): i_b
- I_C の変化分 (小信号): i_c
- I_E の変化分 (小信号): i_e
- 電流制御電流源, $i_c = \beta i_b$ を使う。

bipolar トランジスタの小信号モデル



r_b をベース広がり抵抗と言う。

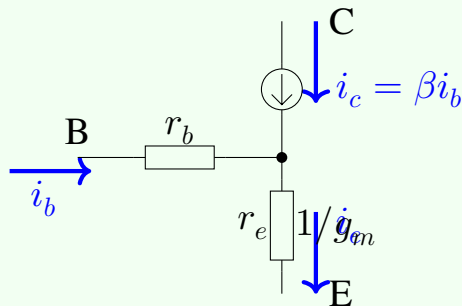
(参考) もう一つの小信号モデル

$I_B \neq 0$ を考える必要があるときよう…なのですが、この授業では今後あまり登場しません。

前提・仮定

- I_B の変化分 (小信号): i_b
- I_C の変化分 (小信号): i_c
- I_E の変化分 (小信号): i_e
- 電流制御電流源, $i_c = \beta i_b$ を使う。

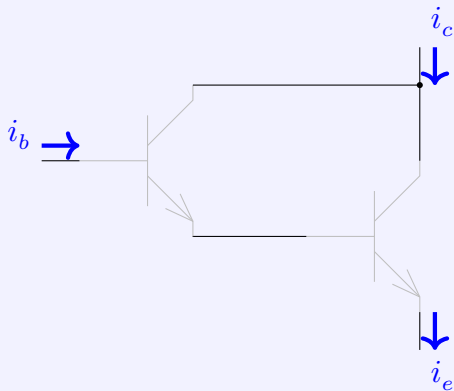
bipolar トランジスタの小信号モデル



r_b をベース広がり抵抗と言う。

練習: ダーリントン接続

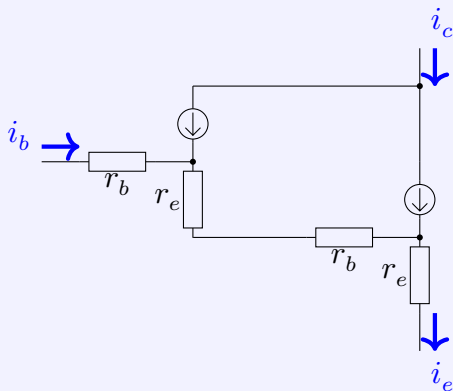
たぶん電流制御電圧源小信号モデルはこれで見納め



エミッタ接地電流増幅率 β のトランジスタをふたつ使って図のような回路を作った (**ダーリントン接続**)。これは全体として一つのトランジスタの働きをするが、そう考えると **全体としての β** ($= i_c/i_b$) はいくらか? (ヒント: 前のページのモデル)

練習: ダーリントン接続

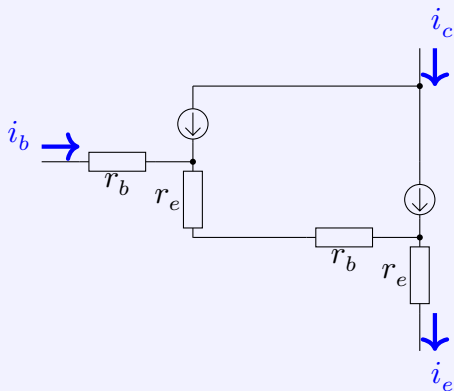
たぶん電流制御電圧源小信号モデルはこれで見納め



エミッタ接地電流増幅率 β のトランジスタをふたつ使って図のような回路を作った (**ダーリントン接続**)。これは全体として一つのトランジスタの働きをするが、そう考えると **全体としての β** ($= i_c/i_b$) はいくらか? (ヒント: 前のページのモデル)

練習: ダーリントン接続

たぶん電流制御電圧源小信号モデルはこれで見納め



エミッタ接地電流増幅率 β のトランジスタをふたつ使って図のような回路を作った (**ダーリントン接続**)。これは全体として一つのトランジスタの働きをするが、そう考えると **全体としての β** ($= i_c/i_b$) はいくらか? (ヒント: 前のページのモデル)

答: $i_c/i_b = \beta^2 + 2\beta$

まとめ

なんだかややこしくなってきた {MOS, バイポーラ} × {大信号, 小信号} を整理。

	MOS (飽和領域)	バイポーラ
完全版 (?) モデル	$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2$	$I_E = I_{ES} \left\{ \exp \left(\frac{qV_{BE}}{kT} \right) - 1 \right\}$
大信号モデル	簡単なものはない (基本的に上式)	簡単なものがある
小信号モデル	$i_d = g_m \times v_{gs}$	$i_e = g_m \times v_{be}$

問. (くどいようだが再度確認のつもりでここに問う。) MOS, バイポーラそれぞれの **トランスコンダクタンス g_m を求めよ。**

ミニレポート課題 (受付期間: 授業当日～次回授業の前日)

受付期間外には提出しないこと。(自動処理しています。)

このスライドの中ほどのページにある『**小信号モデルの練習**』を解説せよ。
すべての式には文章による説明をつけること。レポート中で以下の語をそれぞれ一度以上使うこと。

ゲート, ソース, ドレイン, ナレータ, ノレータ, オームの法則, 電位, 電圧, 電流

提出は下記 URL の Google Forms。歪んでいない、開いた時に横倒しになっていない、コントラストが読むに耐えうる **PDF で提出** すること。**手書きを写真撮影する場合はスキャナもしくはスキャナアプリの使用を必須とする。**

<https://forms.gle/MpUmErDi6qk8GSUC6>

