

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。

授業の受講に関して

- 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。

授業の進め方

- 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



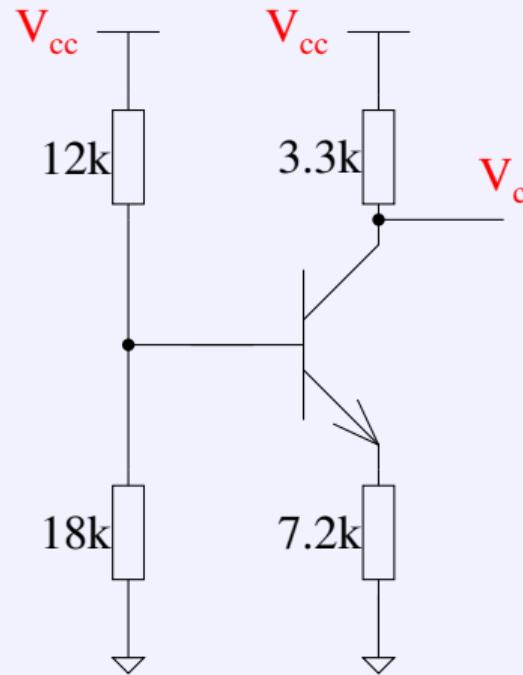
OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

5 of 14

a L^AT_EX + Beamer slideshow

復習の練習問題

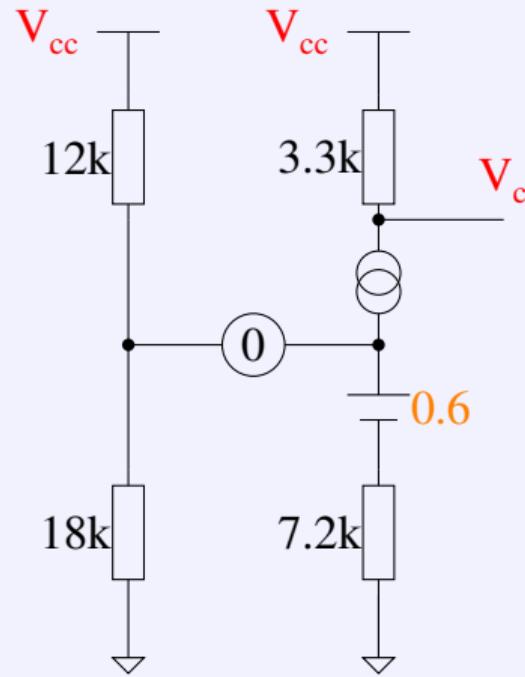
こういうのを DC 解析といいます。



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 $V_{cc} = 3$ V とする。

復習の練習問題

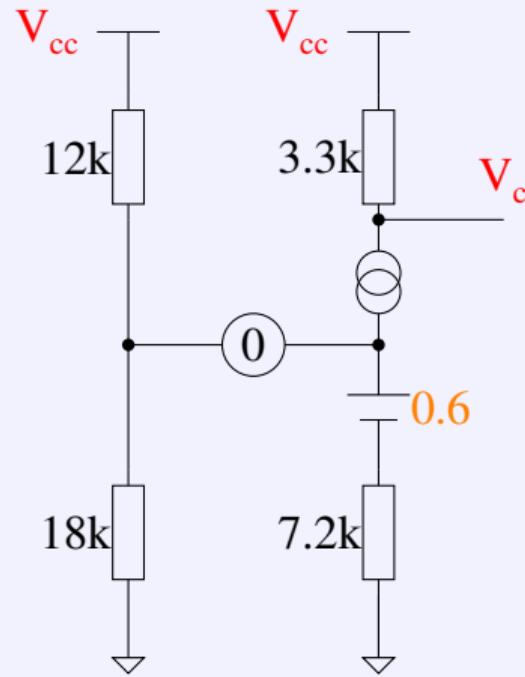
こういうのを DC 解析といいます。



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 $V_{cc} = 3$ 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。

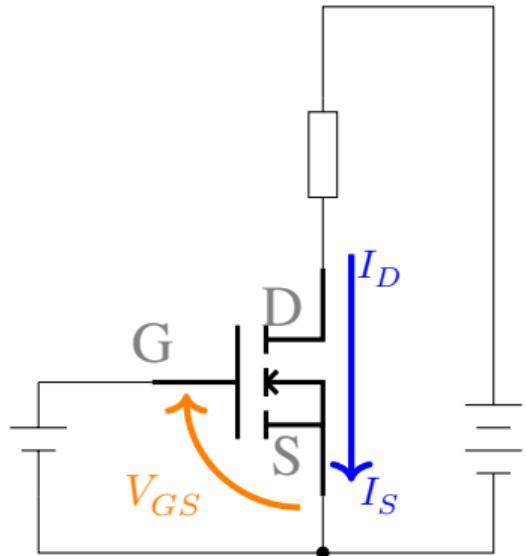


コレクタ電位 V_c を求めよ。ただし、トランジスタはナレータ・ノレータモデルで計算し、その V_{BE} を 0.6 V とする。また $V_{cc} = 3$ V とする。

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

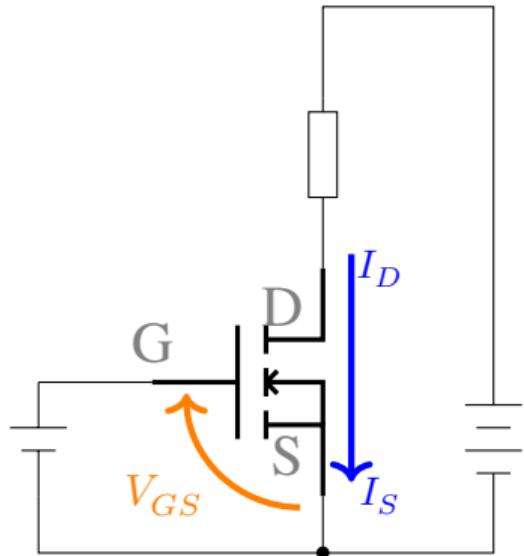
飽和領域では I_D は の 。

$$I_D =$$

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

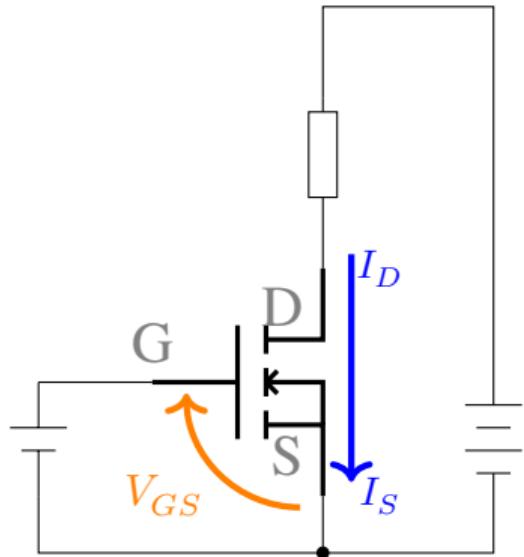
飽和領域では I_D は V_{GS} の \dots 。

$$I_D = \dots$$

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

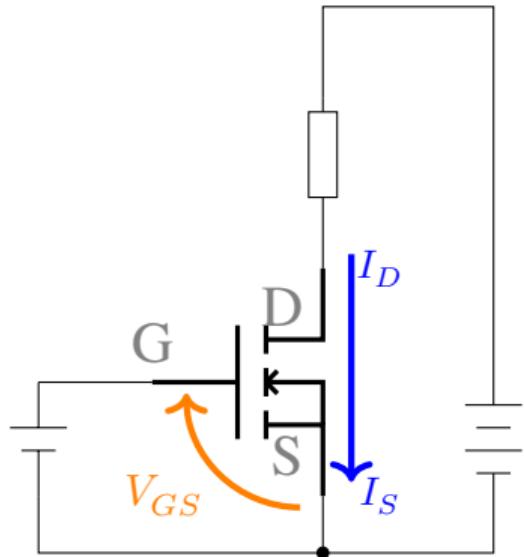
飽和領域では I_D は V_{GS} の**関数**。

$$I_D =$$

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

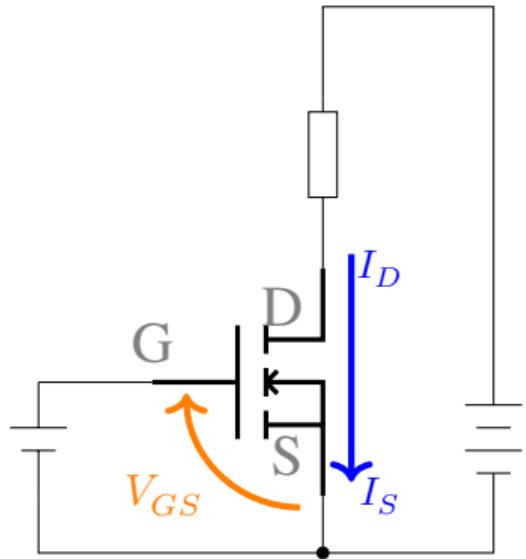
飽和領域では I_D は V_{GS} の **関数**。

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

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

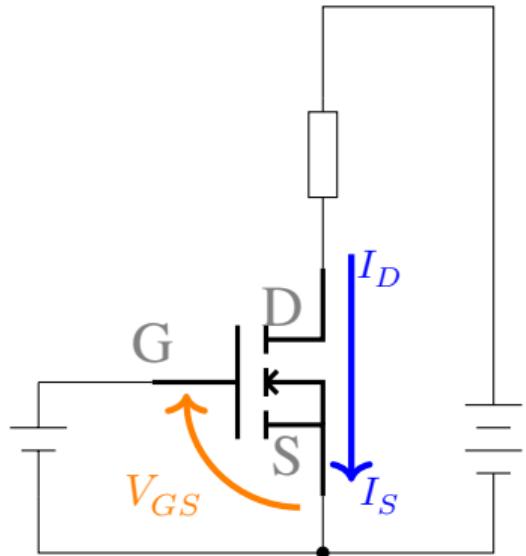
飽和領域では I_D は V_{GS} の **関数**。

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

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**。

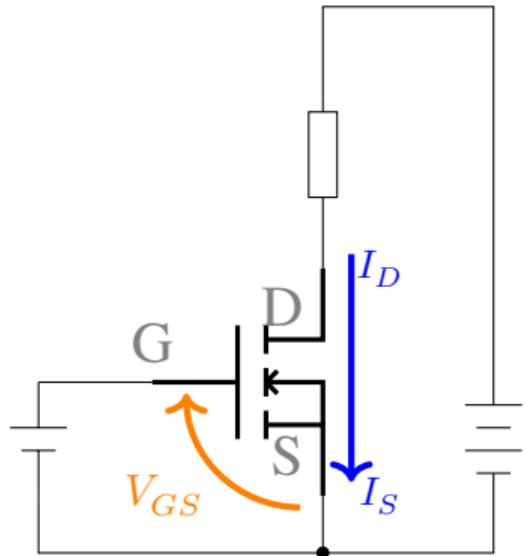
$$I_D = f(V_{GS}) = K(V_{GS} - V_T)^2$$

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**。

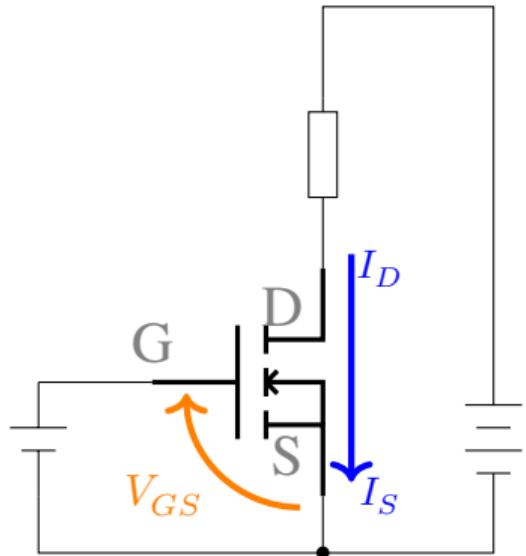
$$I_D = f(V_{GS}) = K(V_{GS} - V_T)^2$$

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。

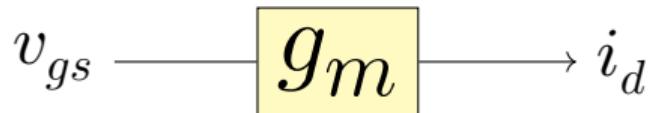
$$\Delta I_D = \Delta f(V_{GS}) = f'(V_{GS}) \times \Delta V_{GS} = 2K(V_{GS} - V_T) \times \Delta V_{GS}$$

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。

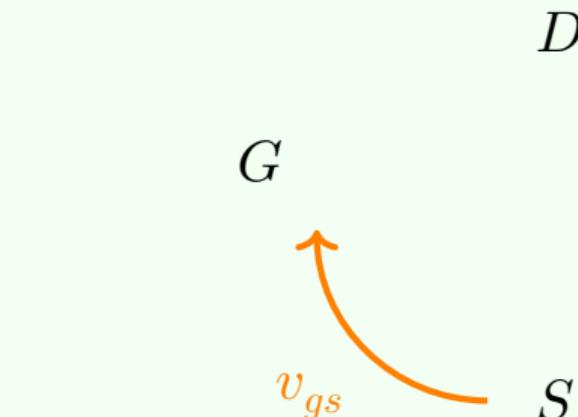


g_m :

MOS トランジスタの**小信号モデル**

- $i_g = 0$
- $i_d = g_m v_{gs}$

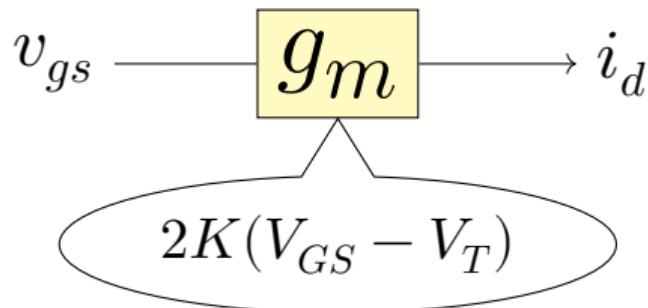
は ↓ このように描ける！



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。

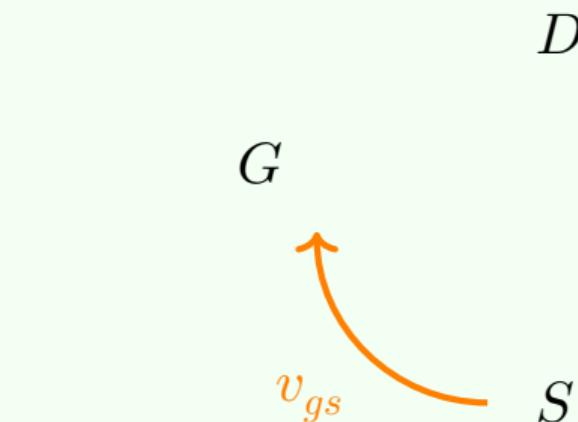


g_m :

MOS トランジスタの**小信号モデル**

- $i_g = 0$
- $i_d = g_m v_{gs}$

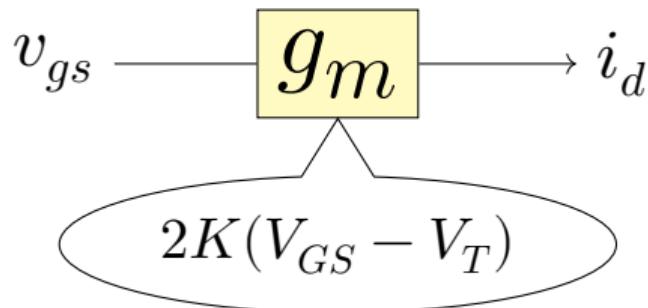
は ↓ このように描ける！



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。

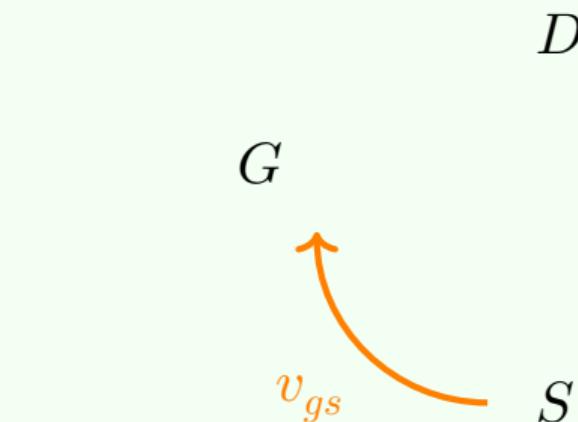


g_m : トランジスタの伝達コンダクタンス

MOS トランジスタの小信号モデル

- $i_g = 0$
- $i_d = g_m v_{gs}$

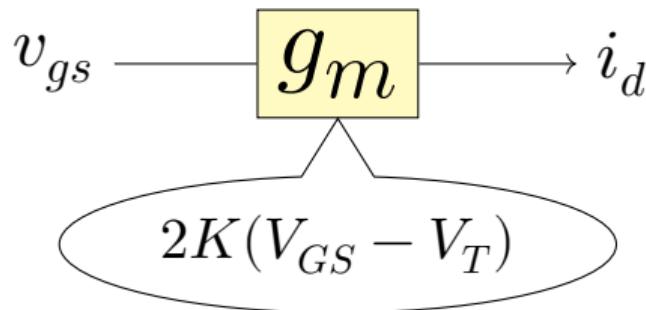
は↓ このように描ける！



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。

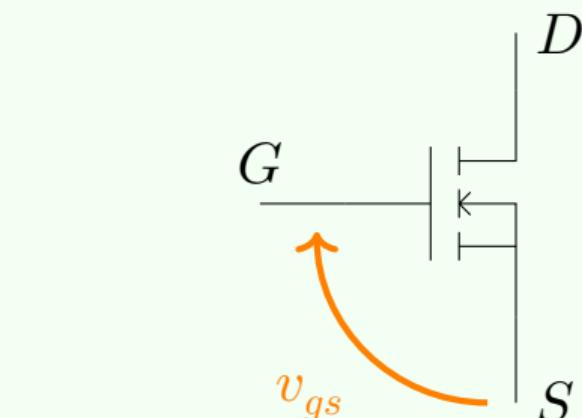


g_m : トランジスタの伝達コンダクタンス

MOS トランジスタの小信号モデル

- $i_g = 0$
- $i_d = g_m v_{gs}$

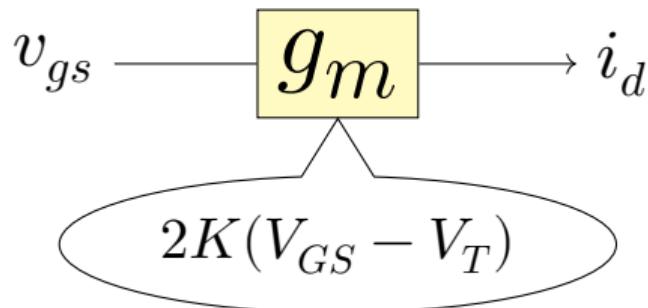
は↓ このように描ける！



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。

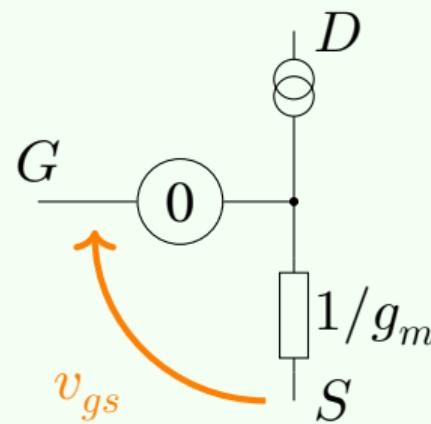


g_m : トランジスタの伝達コンダクタンス

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！

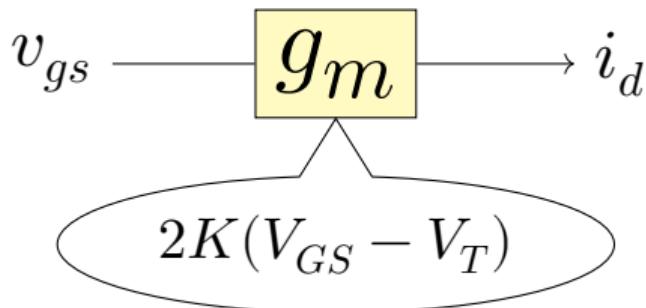


MOS トランジスタの小信号モデル

- 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。

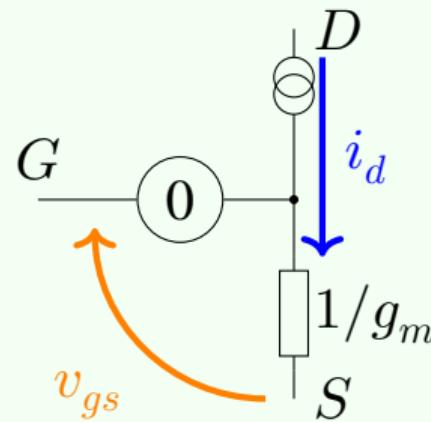


g_m : トランジスタの伝達コンダクタンス

MOS トランジスタの**小信号モデル**

- $i_g = 0$
- $i_d = g_m v_{gs}$

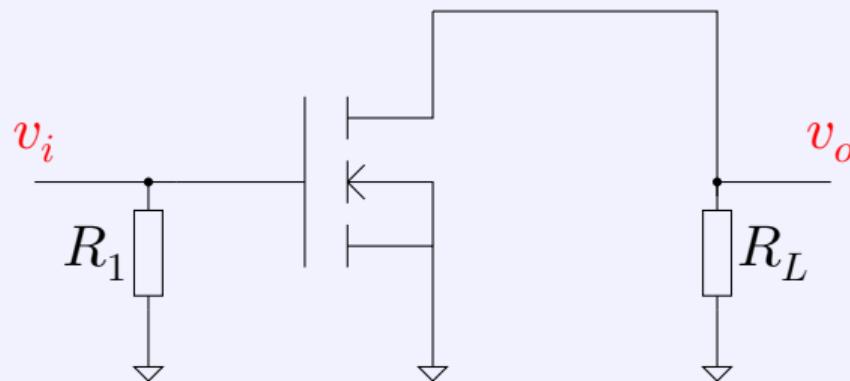
は ↓ このように描ける！



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。

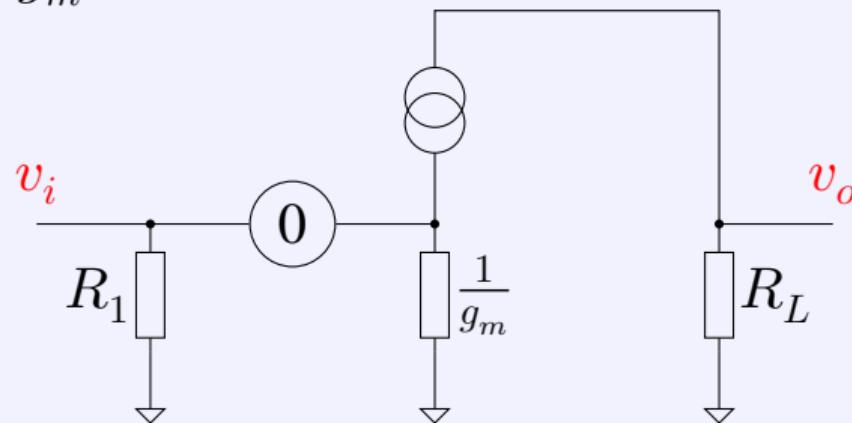
問: バイアス云々は無視して、小信号モデルが使えるという前提で、以下の回路の v_o を v_i で表わせ。トランジスタのトランジストコンダクタンスを g_m とする。



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。

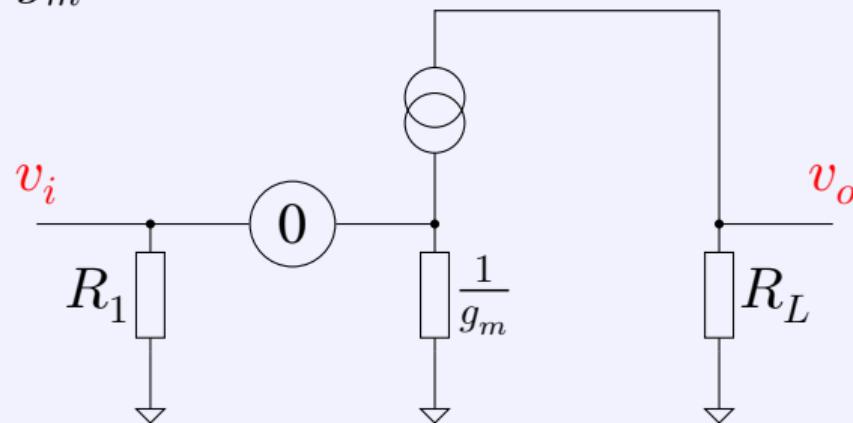
問: バイアス云々は無視して、小信号モデルが使えるという前提で、以下の回路の v_o を v_i で表わせ。トランジスタのトランジストコンダクタンスを g_m とする。



小信号モデルの練習

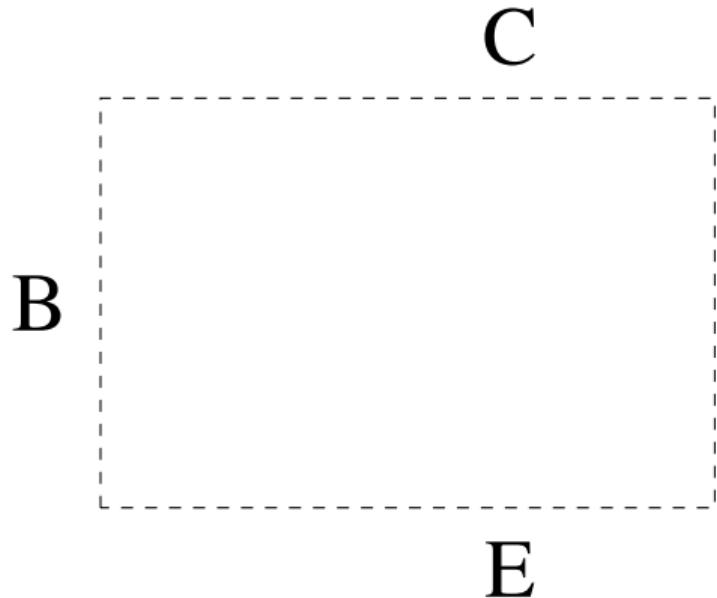
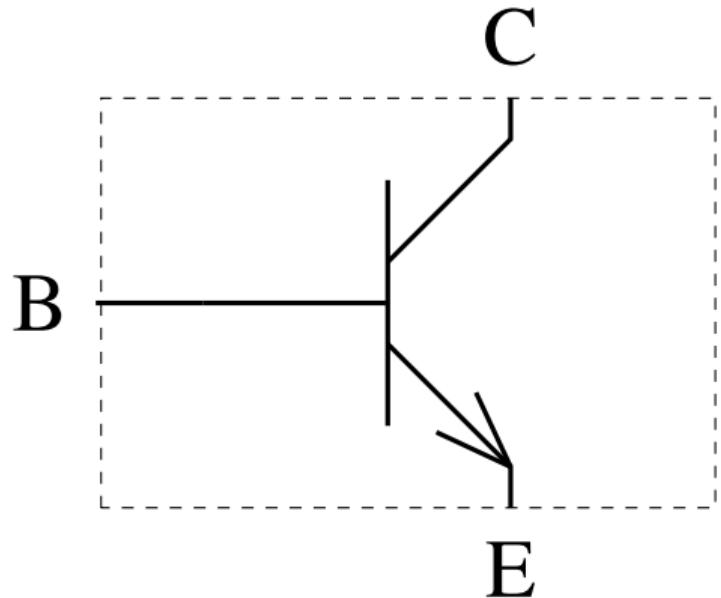
こんな問題に意味があるのか…? と思うかも知れないけれど実は深い意味があります。

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。トランジスタのトランジストコンダクタンスを g_m とする。



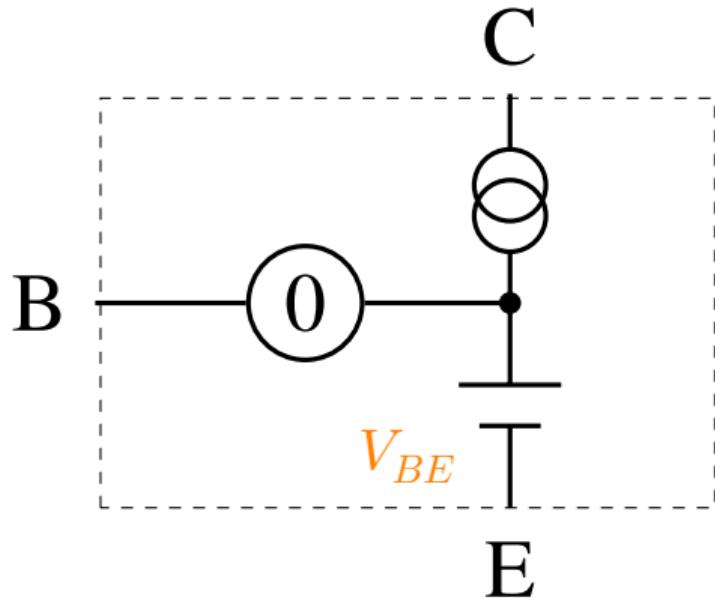
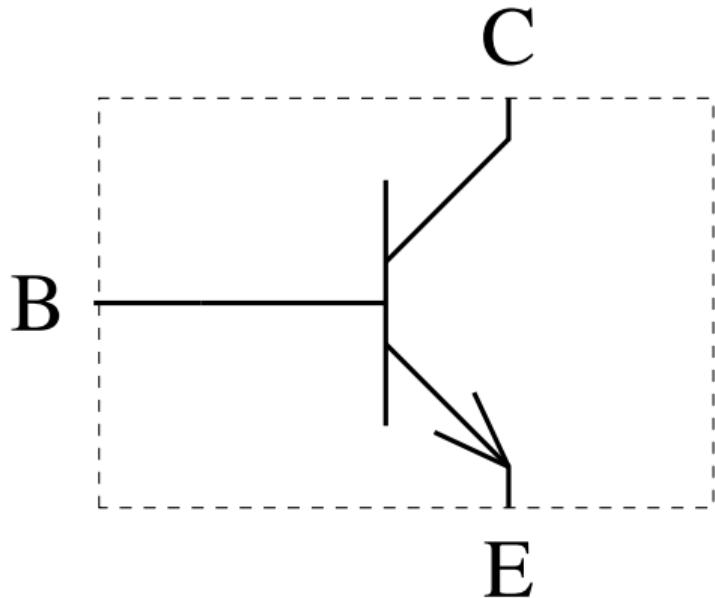
$$v_o = -g_m R_L v_i$$

前回の復習: バイポーラトランジスタの大信号モデル



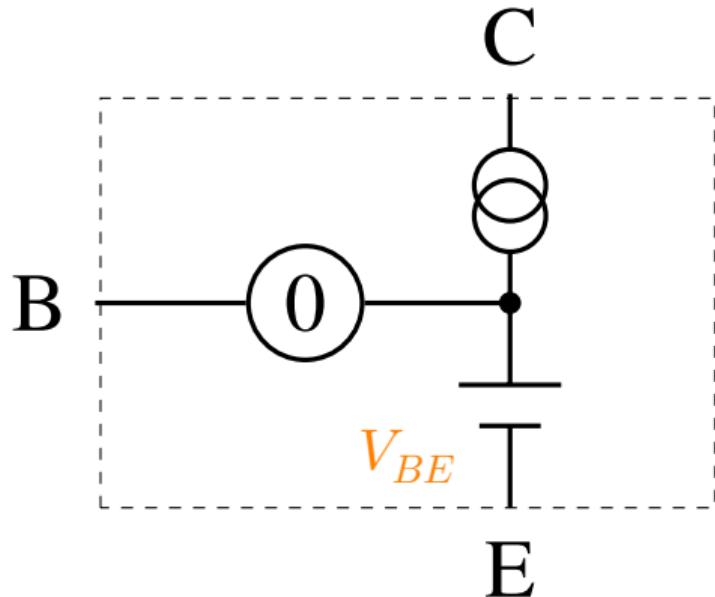
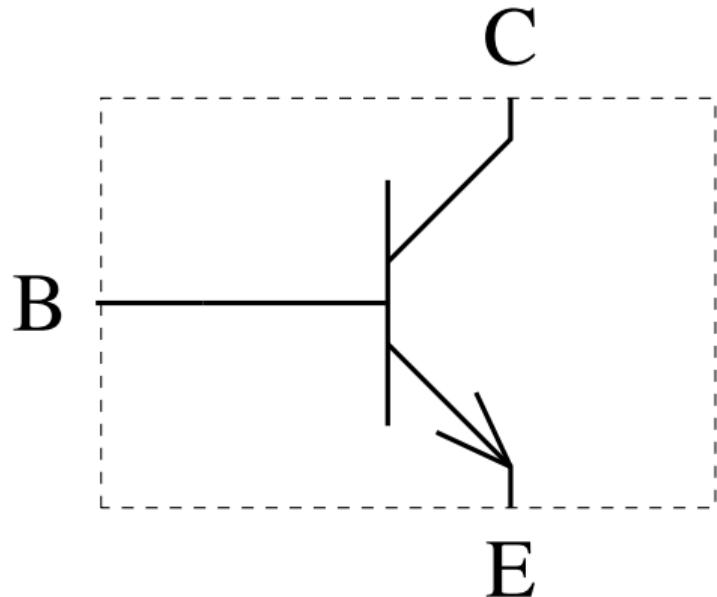
問題点:

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



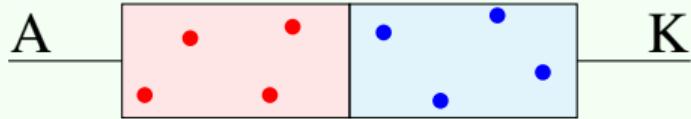
問題点: **小信号**には使えない。
(そりやまあ、名前からしてね。)

バイポーラトランジスタの $V_{BE} - I_E$ 特性

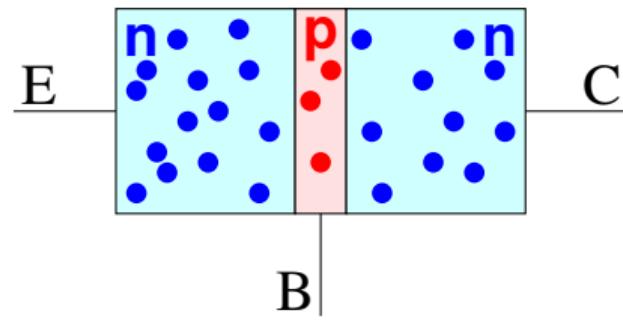
OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

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



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



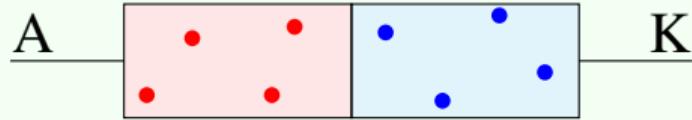
$$I_E =$$

MOSトランジスタと同じことをやってみよう！

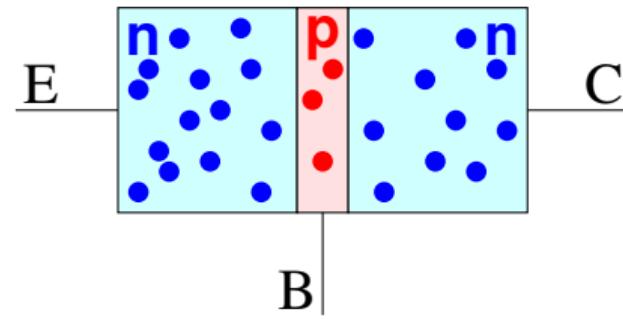
バイポーラトランジスタの $V_{BE} - I_E$ 特性

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



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



$$I_E =$$

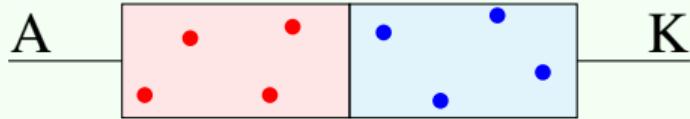
MOSトランジスタと同じことをやってみよう！

バイポーラトランジスタの $V_{BE} - I_E$ 特性

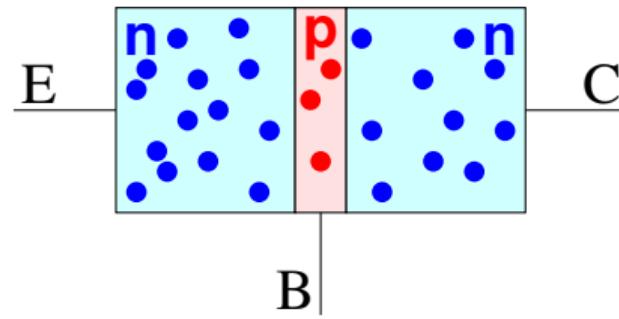
OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

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:

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

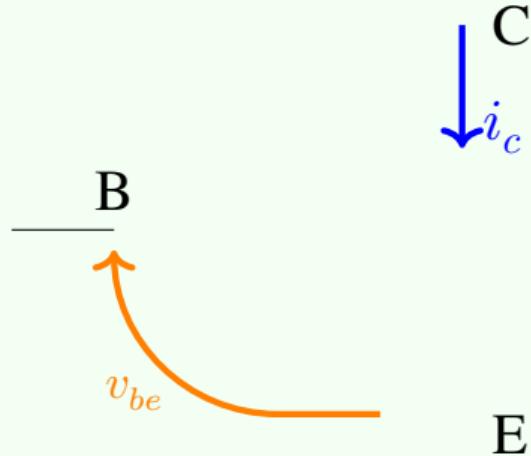
バイポーラトランジスタの小信号モデル

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。

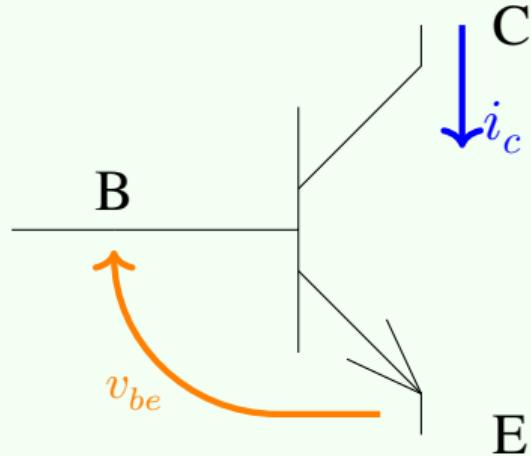
バイポーラトランジスタの小信号モデル

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 v_{be} 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。

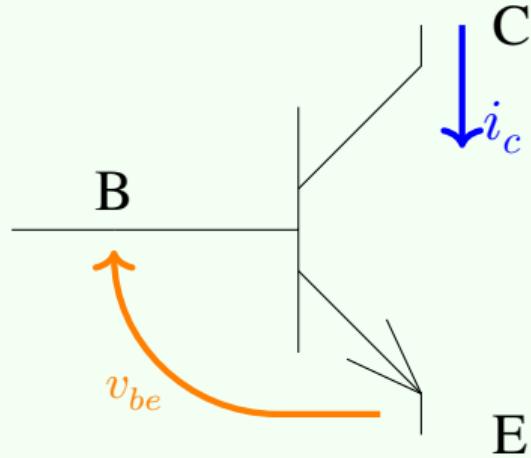
バイポーラトランジスタの小信号モデル

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**ほぼゼロ**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。

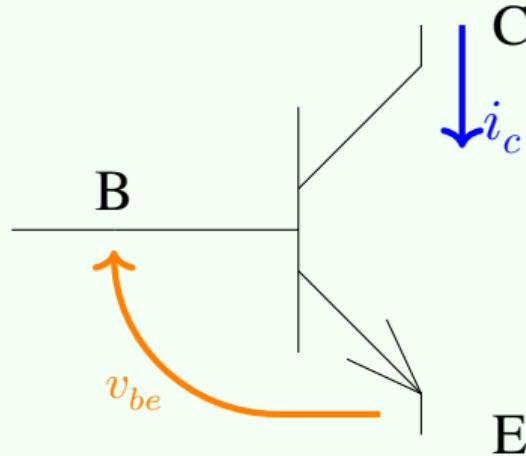
バイポーラトランジスタの小信号モデル

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**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。

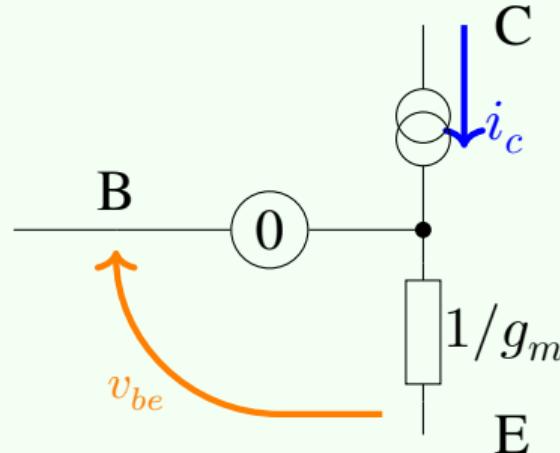
バイポーラトランジスタの小信号モデル

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。

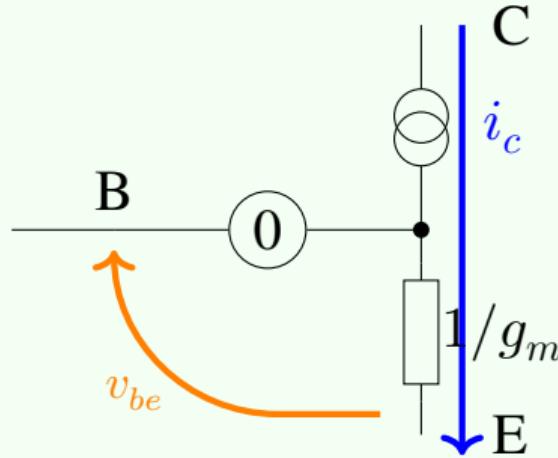
バイポーラトランジスタの小信号モデル

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。

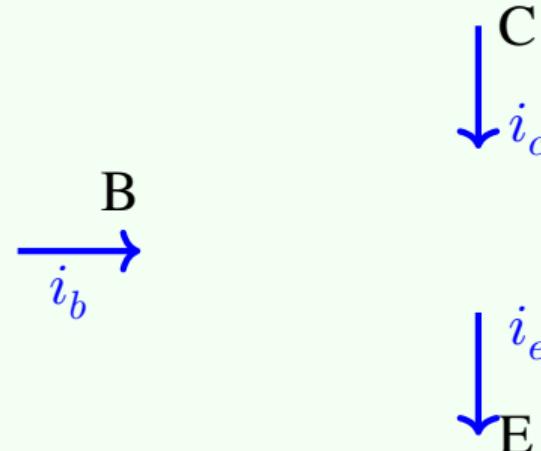
(参考) もう一つの小信号モデル

$I_B \neq 0$ 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): \dot{i}_b
- I_C の変化分 (小信号): \dot{i}_c
- I_E の変化分 (小信号): \dot{i}_e
- $\frac{\dot{i}_c}{\dot{i}_b} = r_b$, $i_c = r_b \dot{i}_b$ 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。

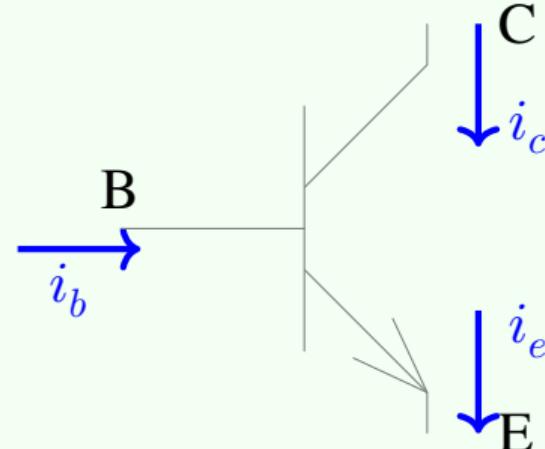
(参考) もう一つの小信号モデル

$I_B \neq 0$ 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
- $\frac{\text{_____}}{\text{_____}}, i_c =$
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。

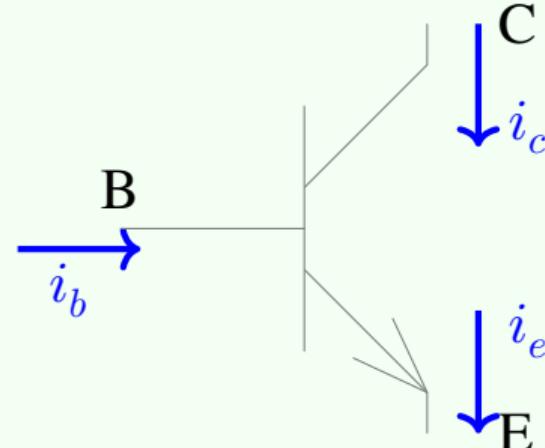
(参考) もう一つの小信号モデル

$I_B \neq 0$ 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。

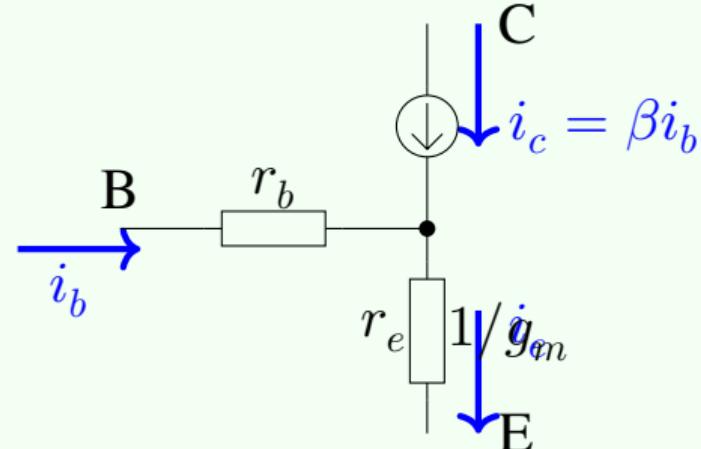
(参考) もう一つの小信号モデル

$I_B \neq 0$ 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): \dot{i}_b
- I_C の変化分 (小信号): \dot{i}_c
- I_E の変化分 (小信号): \dot{i}_e
- 電流制御電流源, $i_c = \beta i_b$ を使う。

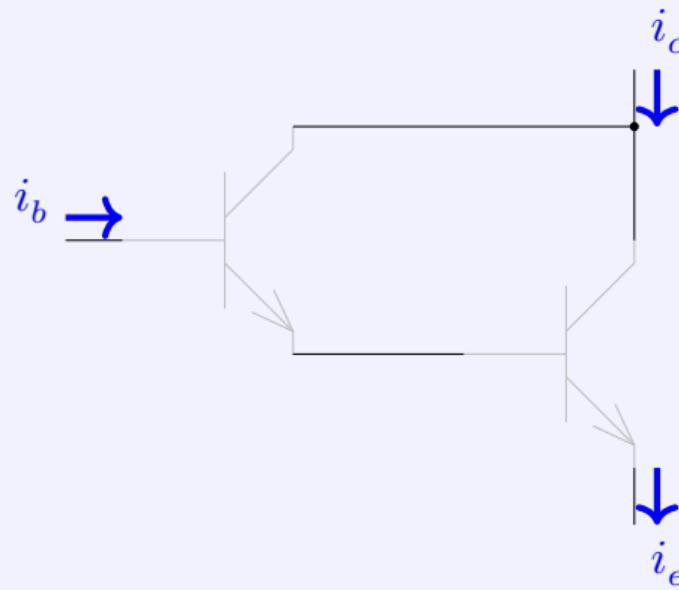
bipolar トランジスタの**小信号モデル**



r_b をベース広がり抵抗と言う。

練習: ダーリントン接続

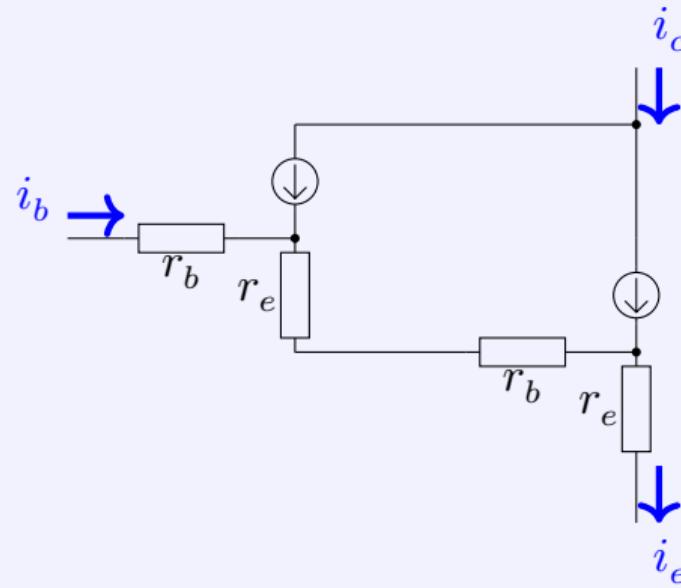
たぶん電流制御電圧源小信号モデルはこれで見納め



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

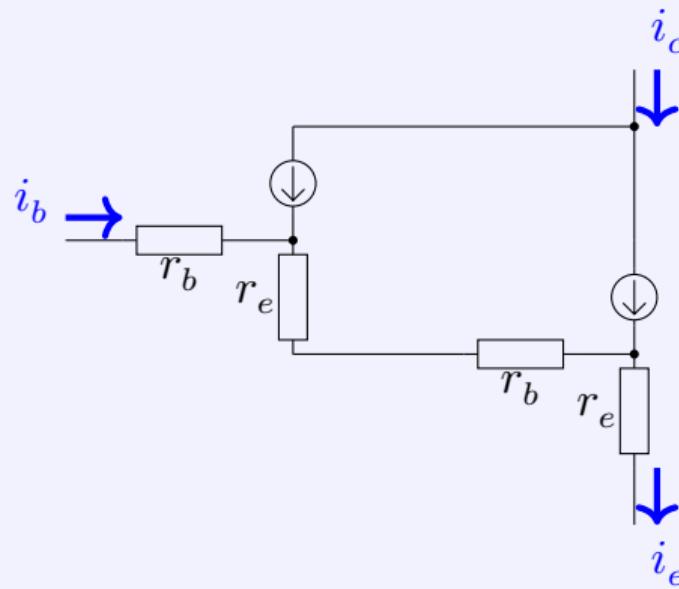
たぶん電流制御電圧源小信号モデルはこれで見納め



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	簡単なのはない (基本的に上式)	簡単なのがある
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**トランスクンダクタンス 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>

