

集積電子回路
2021年11月02日
11月09日

電気電子工学特別講義Ⅱ

回路設計論 3.能動素子達

ザインエレクトロニクス株式会社
源代 裕治
yuji.gendai@gunma-u.ac.jp

第1章 能動素子達を眺めよう

Tasting active devices

初期の真空管

101D

発明当初、真空管内で電気を伝えるものは残留ガスではないかと想像されていた。真空中でも電流が流れること、むしろ高真空の方が、特性が良く寿命も長くなることが解明されて、右図の101Dのような高真空の真空管が開発された。

右図からは、当時の真空管が真空管記号そっくりの構造であったことが見て取れる。日本語で真空管を「球」というのも、この形状から来たものかもしれない。

その脚注には、「1926年までに既に12年間、電話の中継器に使われて、それまで製造された最も高信頼で長寿命だった」と記されている。

出展

“A History of Engineering & Science in the Bell Systems, Electronic Technology 1925-1975,”
AT&T Bell Laboratories

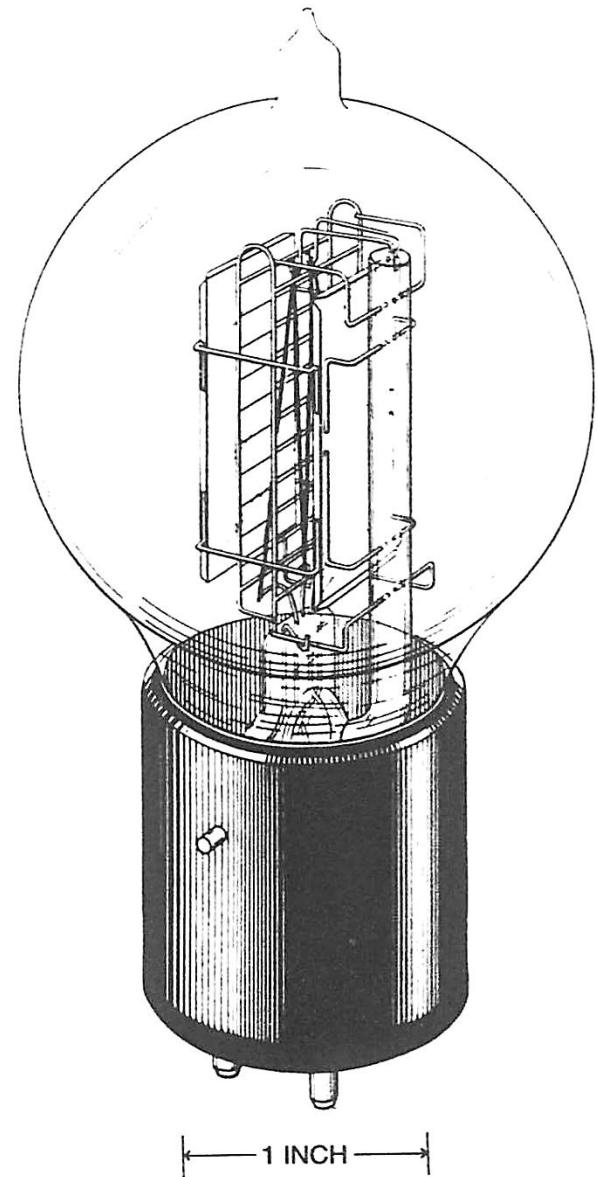


Fig. 3-1. The 101D high-vacuum triode. By 1926, when the tube had been in use for 12 years, it was the most reliable and long-lived tube ever produced. It was used in telephone repeaters.

真空管極数の増加

極数	英語名	発明者と当初の命名	公開年
2極管	diode	Fleming / Valve	1905
3極管	triode	DeForest / Audion	1907
4極管	tetrode	Schottky / Screen Grid Tube	1915
5極管	pentode	Holst, Tellegen / Round	1926/1927

極数の増加は、5極管で一応完了する。

6極管は寡聞にして知らず。

ラジオ受信機では初段に7極管が広く用いられていたが、数ある特殊真空管の一種と見なして良いだろう。

真空管外形の変遷

歴史的には勿論、色々な形状が量産されましたが、

ST管
(6ZDH3A)

電極上部がマイカ
(雲母)で固定され
ている。

この銀色はゲッターと
呼ばれる金属で、球の
内側のガラスに蒸着され
ている。その過程で管内
のガスを吸収することで、
真空度を改善する。

ベース
(ベークライト等)
ピンにかかる荷重
を受け持つ

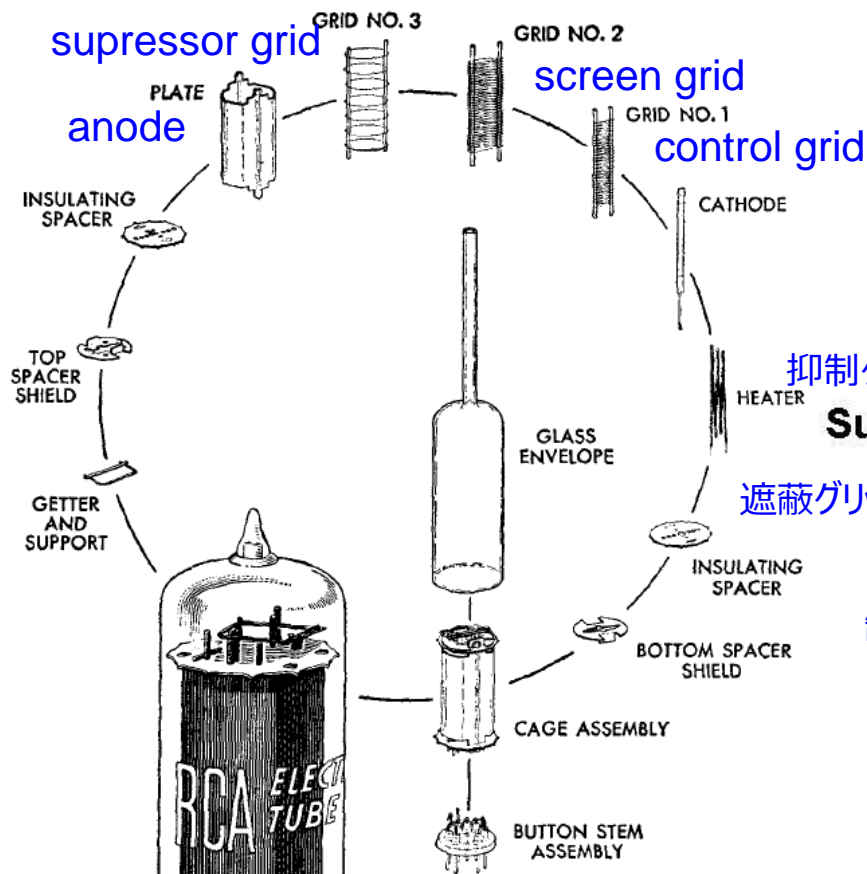
GT管
(6SQ7-GT)

MT(ミニチュア)管
(6AV6)

ピンの荷重を、直
接ガラスが受ける
構造

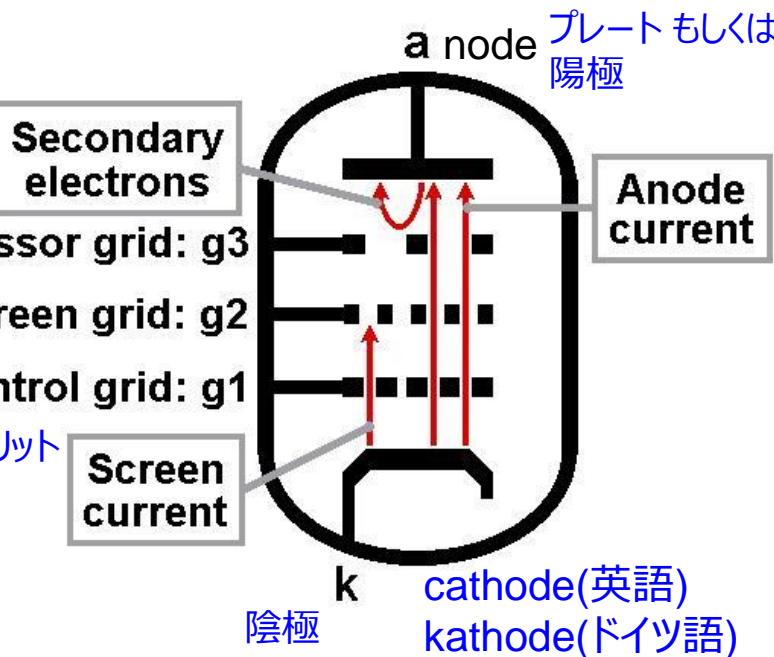
<http://www.japanradiomuseum.jp/MTsuper.html>

真空管(5極MT管)の構成要素



サイズの見当として、
直径が18mmくらい、
ピン間は3.7mmくらい

Electron flow



<http://www.valvewizard.co.uk/pentode.html>

control gridだけだと3極管に、
screen gridを追加すると4極管になる。

Parts of a Miniature Pentode

RCA Receiving Tube Manual
Technical Series RC-20, 1960

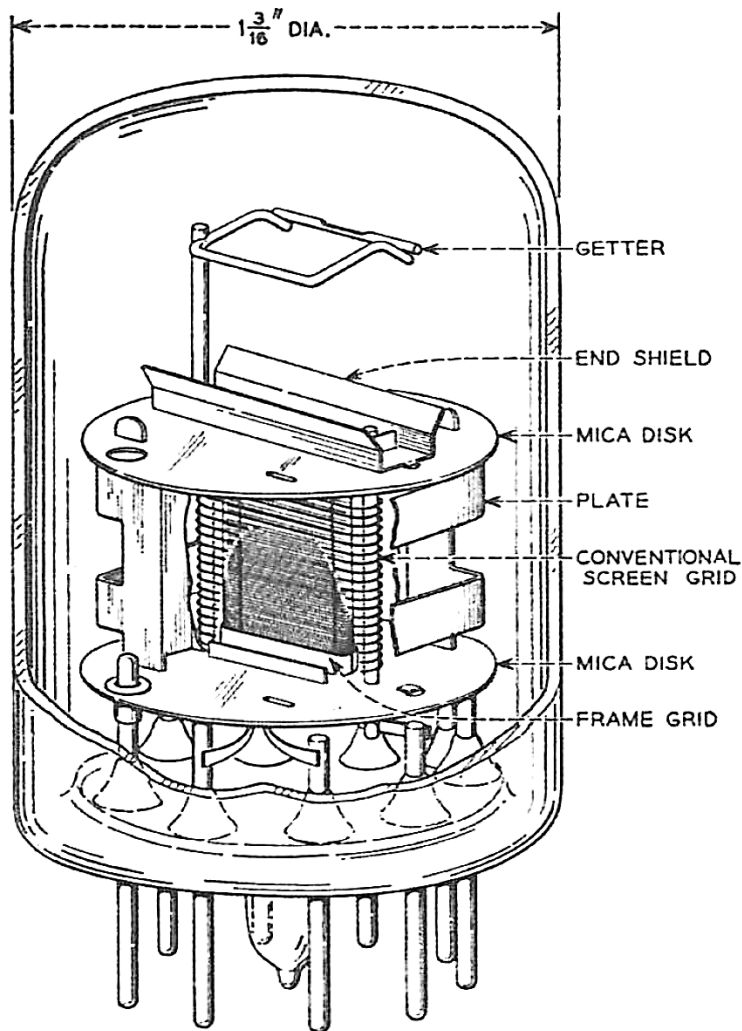
真空管の寸法

WE 436A

1950年ころ開発された4極管

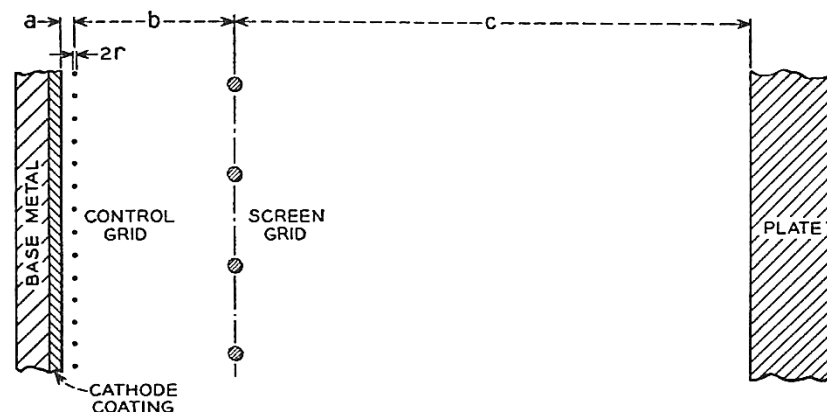
30.2 mm

$1\frac{3}{16}$ " DIA.



この頃には、「球」というよりは「管」と呼ぶ方がふさわしい形状に変化している。

$a=63.5\mu\text{m}$ $2r=7.6\mu\text{m}$



他の寸法は与えられていないが、図の縮尺が正しいとしてノギスで測ると、

$b = 0.87 \text{ mm}$

$c = 2.87 \text{ mm}$

control grid spacing = 0.12 mm

screen grid spacing = 0.48 mm

と求めた。

制御グリッド形状の変遷

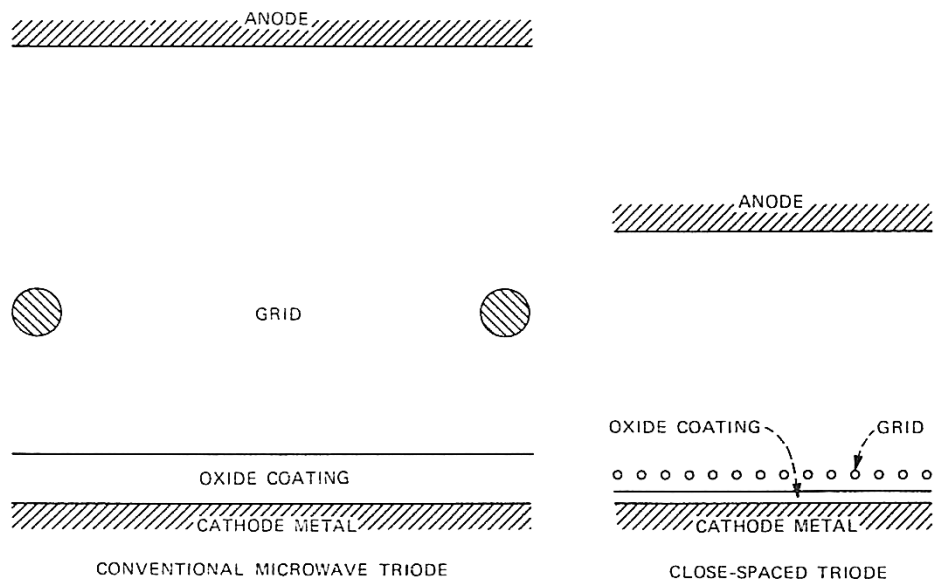


Fig. 3-26. Comparison of sizes and spacings of a 1940s triode (left) and the 416A microwave close-spaced design (right) with a grid spacing of 1/1000 inch.

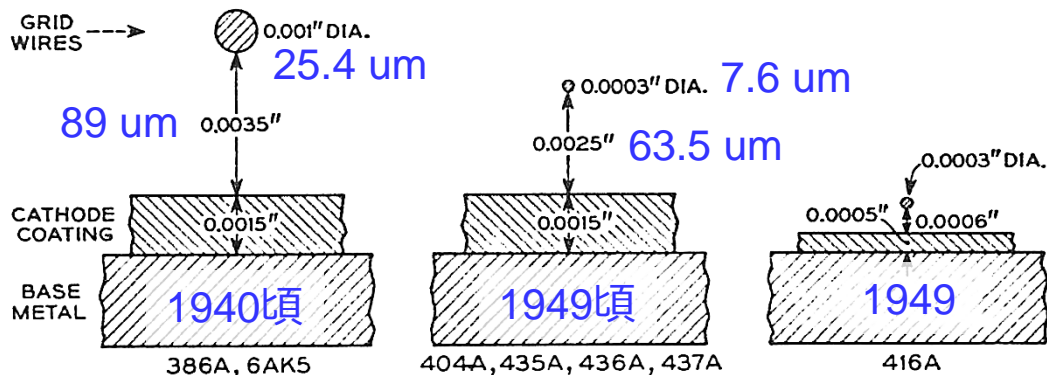


Fig. 17-3. The trend in grid-cathode spacing and grid wire size, 1939 to 1950.

カソード・プレート間とカソード・グリッド間の比が大きいほどgmが大きい真空管になる。左図はその製造技術の進化を比較したものである。

	gm
6AK5 (5極)	5.1 mS
436A (4極)	28 mS
416A (3極)	50 mS

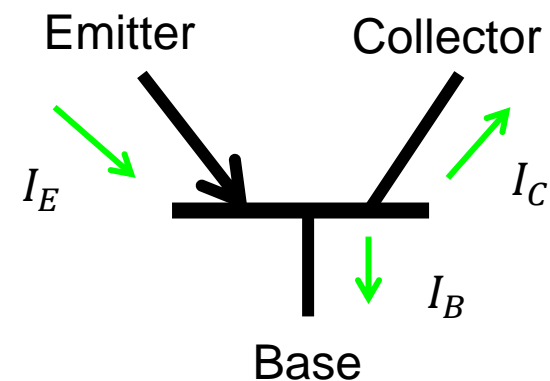
グリッドをカソードに近づけるには、グリッドが振動しないよう強力で引っ張る必要がある。WE 416Aのタングステングリッドは約30gの力で引っ張られている。圧力換算すると6kN/mm²となり、構造用鋼材の引張強度の10倍にも及ぶ力である。

ちなみに全くの仮説であるが、オーディオで「真空管の方が音が良い」とか、中でも「gmが小さい球の方が音が良い」と言われるのは、音波がグリッドを揺らす帰還がかかっているからではないかと想像している。

最初のトランジスタ

再掲

1947年12月23日に発明された最初のトランジスタ（複製品）

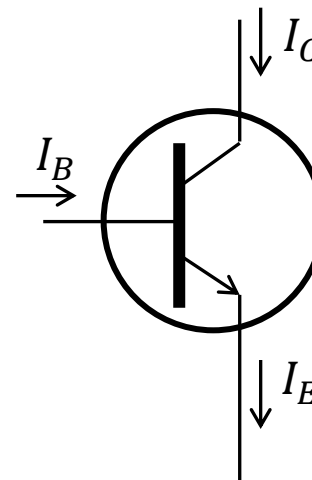
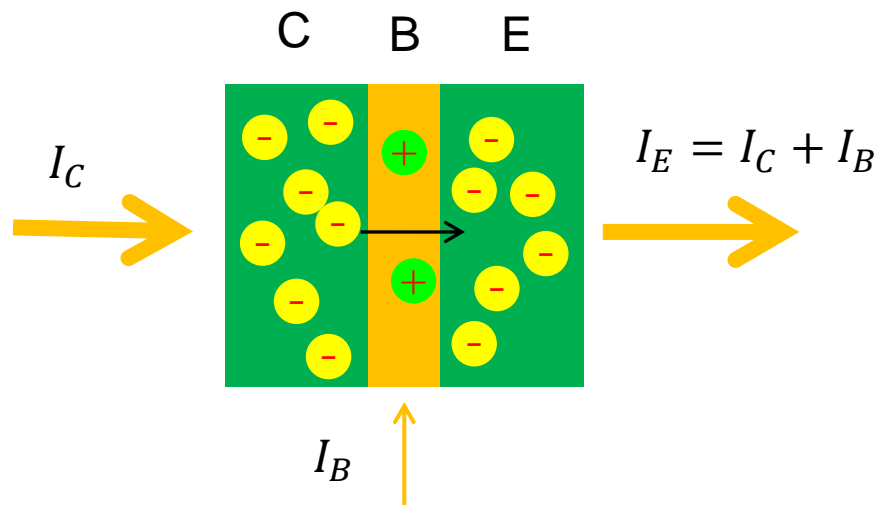


I_B の β 倍が I_C になるという
電流増幅素子である。

<https://clintonwhitehouse4.archives.gov/Initiatives/Millennium/capsule/mayo.html>

少数キャリアによる多数キャリアの制御

NPN Trの場合



Tr記号の○が省略されることは当初なかった。多分IC屋の仕業だろう

Collectorから入った大部分のキャリアは、そのままBaseを乗り越えてEmitterから出力される(ように作る)。不思議なことに、Baseを通過するキャリア量は、Baseに注入する電流を少し変えるだけで大きく(h_{fe} 倍)変化させられる。ともかくBaseは薄ければ薄いほど高性能にできる。

なお、動作原理からは $I_C = h_{fe} I_B$ と $I_E = (h_{fe} + 1) I_B$ が本質と思われるが、回路としては、むしろIV関係

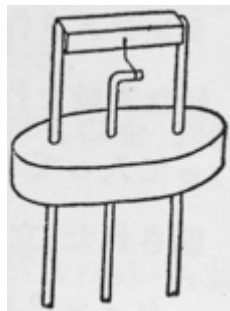
$$V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_C}{I_S}$$

を利用して設計する。アナログ回路の大家であるBarrie Gilbertさんは I_B をバイポーラ素子の必要悪と見なしさえしている。 [トランジスタ技術 2020 4月号 p.117](#)

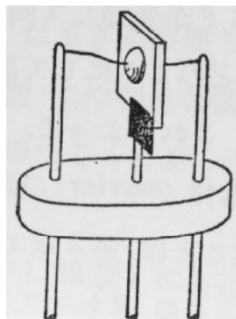
薄いBaseから、どうやって電極を出すか？

Planar技術
(1962)まで
あと一步

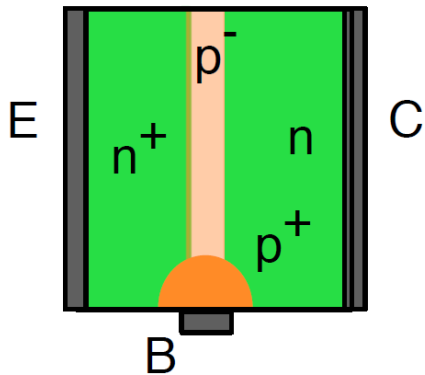
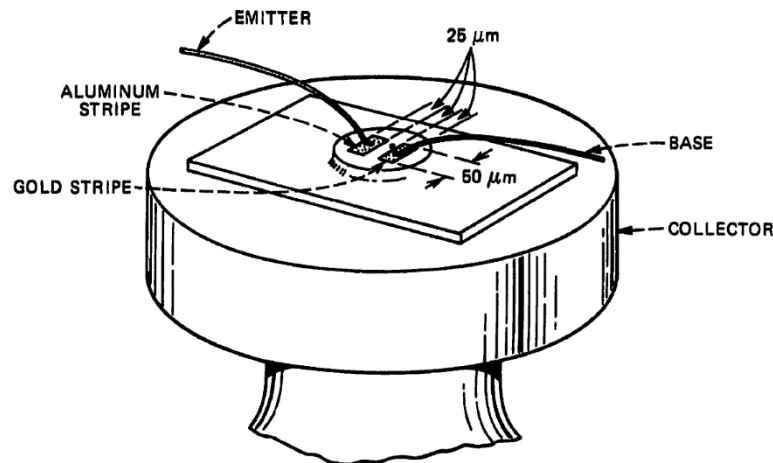
成長型
grown-junction



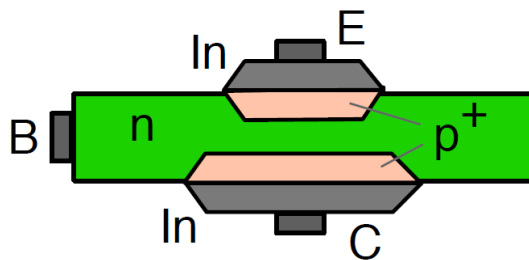
合金型
Alloy



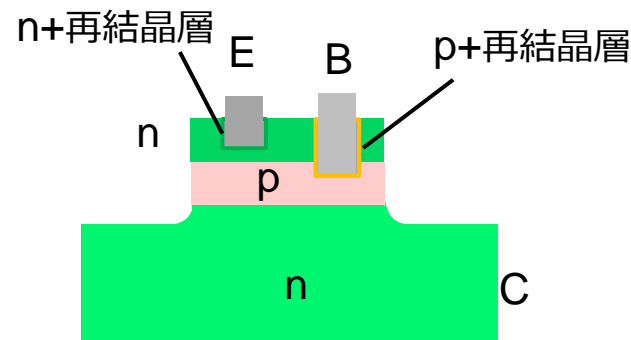
メサ型
Mesa/
diffused-base



1952年



1952年



1955年

MOSトランジスタとは

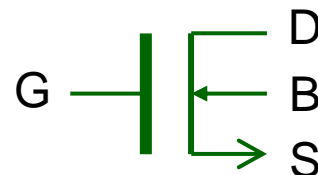
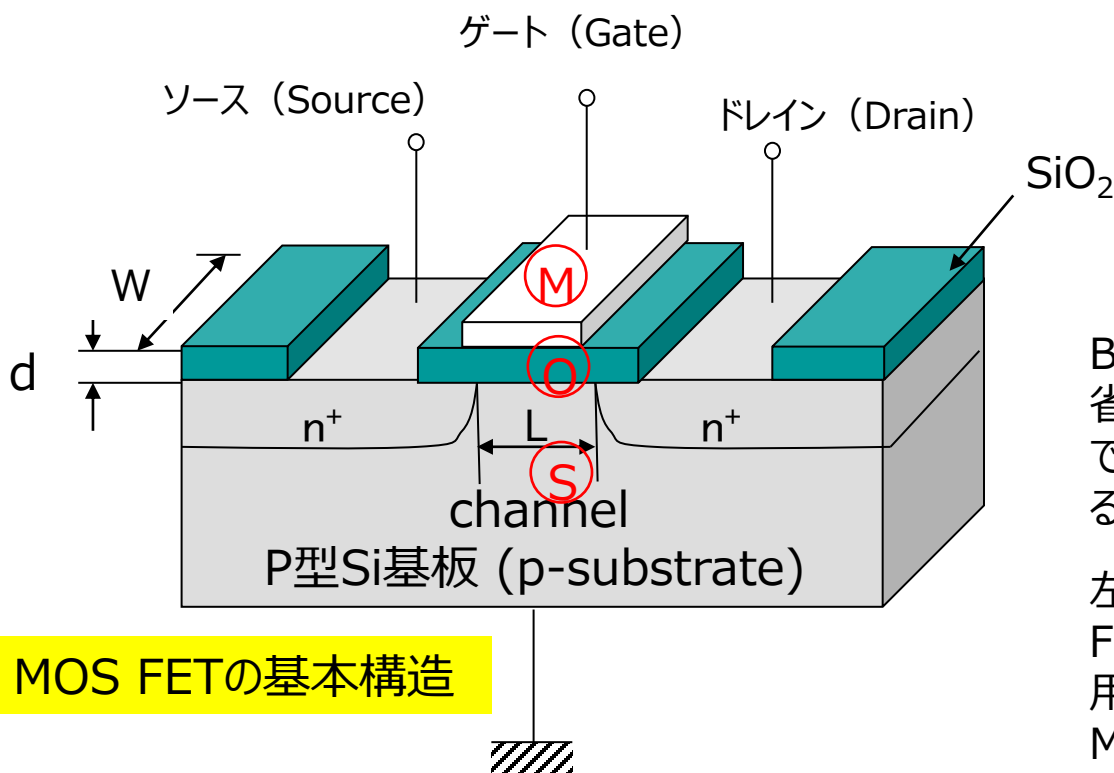
半導体中のキャリアの移動を、絶縁体を通して電界制御するトランジスタ(FET)

MOS FET

(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor)

金属 酸化膜 半導体

電界 効果 トランジスタ



記号

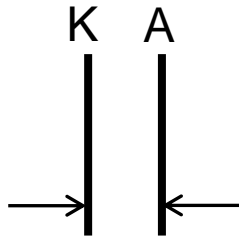
Bはバックゲート(Backgate)を示す。左図で省略したが、P型Si基板の電位を決める電極である。MOS Trは本来4端子素子なのである。

左図でP型N型を交換したものをP型MOS FETという。左図はN型MOS FETで、両方を用いるとCMOSになる。(Complementary MOS)

DrainとSourceは物理的に対称になった。使い方で区別する。CollectorとEmitterは物理的に非対称だった。

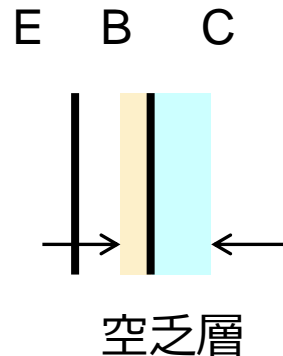
真空管は300V, トランジスタは9V, ICは1V

真空管



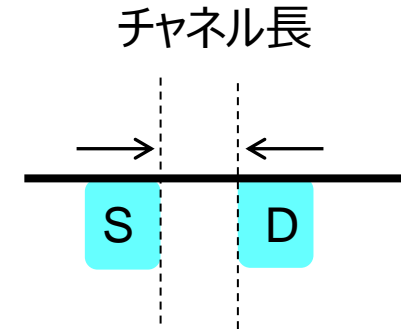
$$E = \frac{300 \text{ V}}{3 \text{ mm}} = 100 \text{ kV/m}$$

トランジスタ



$$E = \frac{9 \text{ V}}{0.4 \text{ } \mu\text{m}} = 22.5 \text{ MV/m}$$

MOS



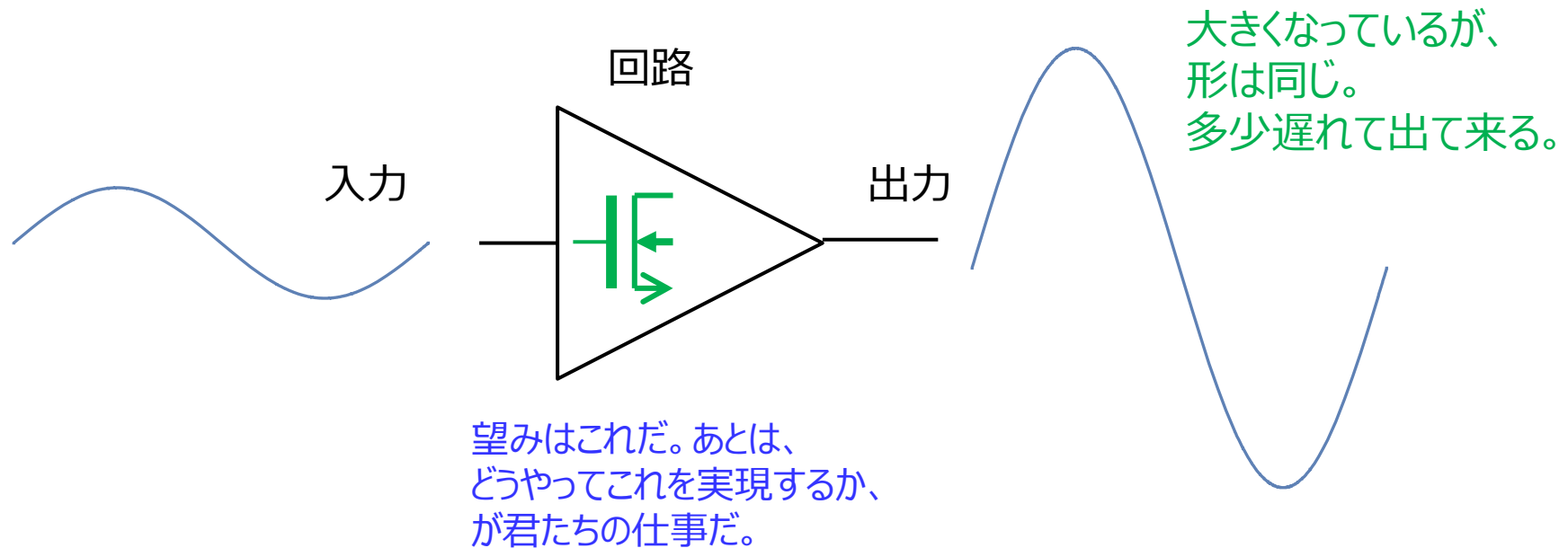
$$E = \frac{1 \text{ V}}{40 \text{ nm}} = 25 \text{ MV/m}$$

電界のざっくり見積もりでは、真空管の方が半導体より大分電界が低い所で使われている。真空管の高電圧は、製造上の限界から来ているのではないか。ならば、最新のリソグラフィを用いれば、数V以下で動作する真空管(もはや管ではない)が作れるのではないか。真空中の電子の方が物質中より高速に出来るのであれば、高速デバイスになる可能性がある。

第2章

デバイスのIV特性と動作点

回路の重要な役割に、信号を増幅することがある



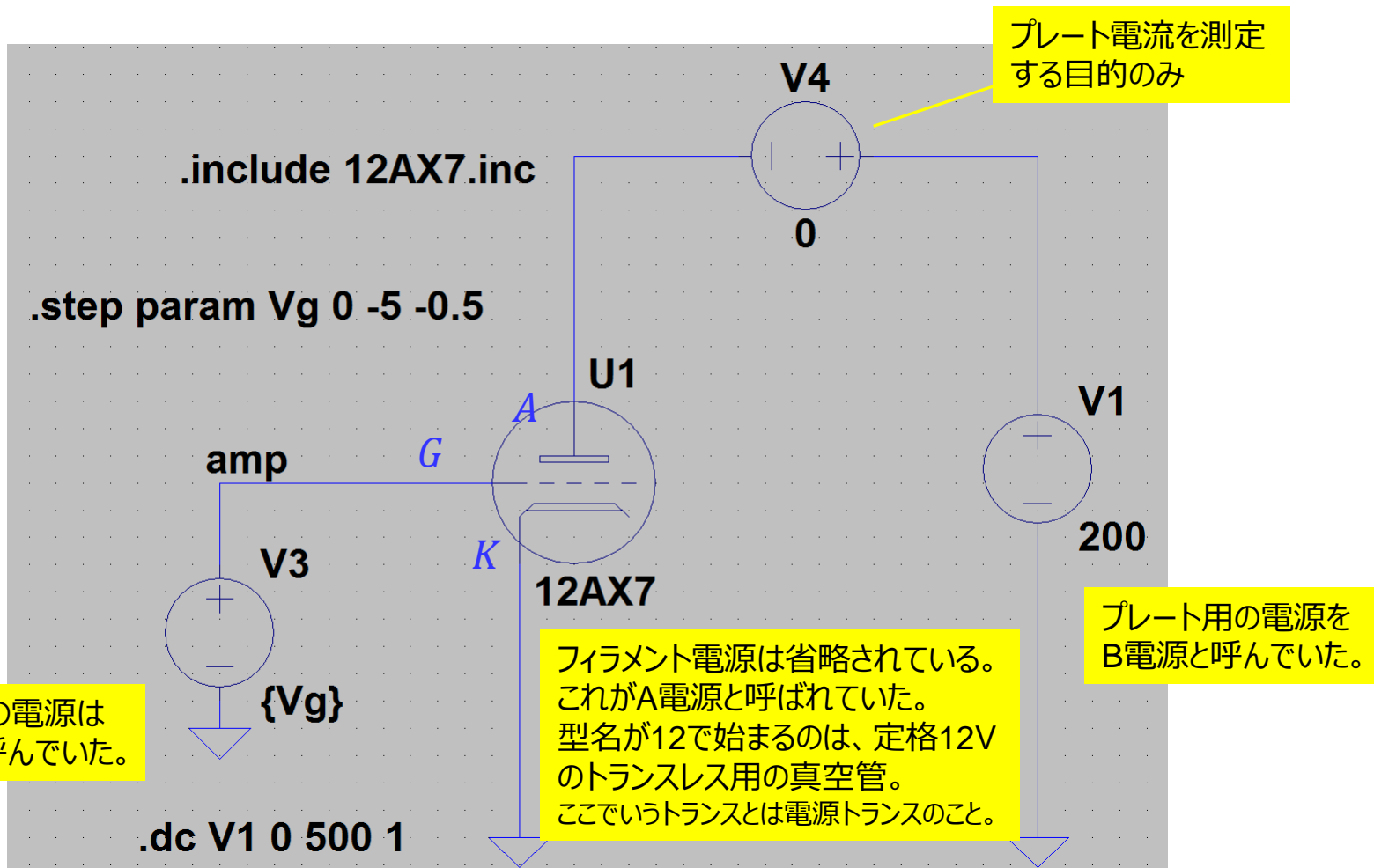
しかし既存の能動素子達は、「入力信号を入れれば出力信号が拡大されて出て来る」という動作はしない。各端子に適切な電位差を与えておくことで、そこからの差分として所望の動作をする。その基本となる状態設定を**動作点**と言う。

(バイアスという言い方も良く用いられる。これはしかし、多少濫用気味の用語である。ここではもっと限定的な『動作点』と言う用語を使おう。)

回路の動作点設定は、どのような目的の回路においても、常に重要な設計項目である。

3極管のIV特性測定回路

LTspiceのスキマ (回路図を英語でschematicsと呼ぶことが多い。略してスキマ)



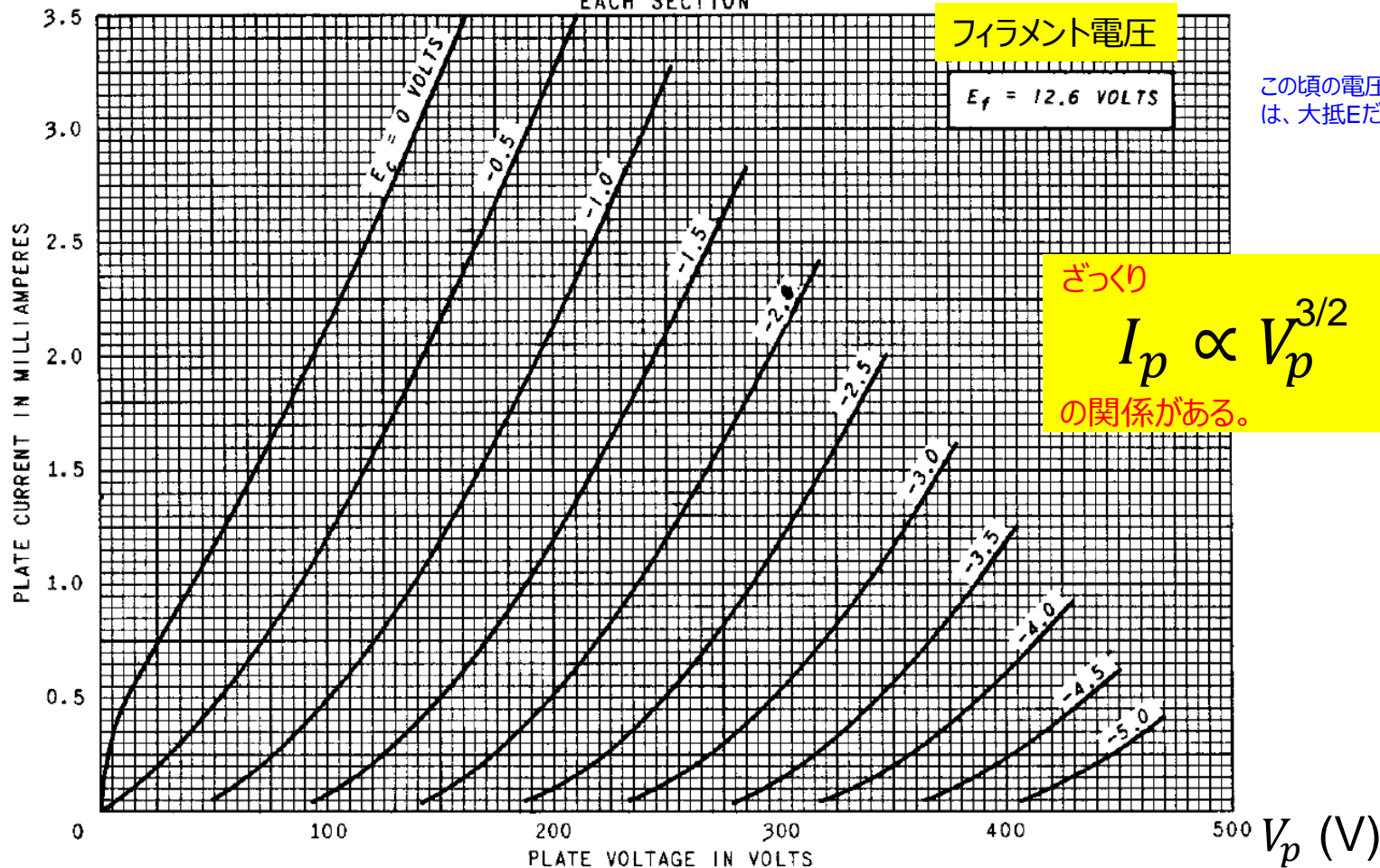
3極管のIV特性

12AX7

I_p (mA)

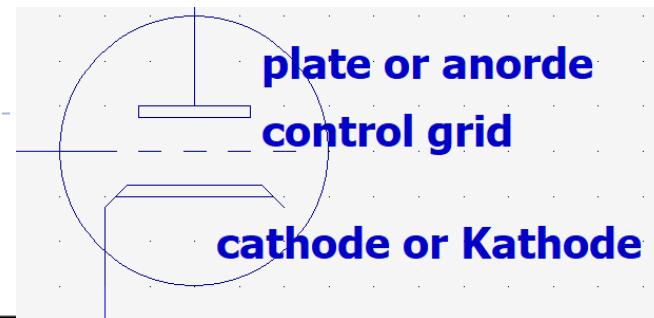
AVERAGE PLATE CHARACTERISTICS

EACH SECTION



General Electric ET-T509A dated 2-51

動作点の選択(3極管の例)

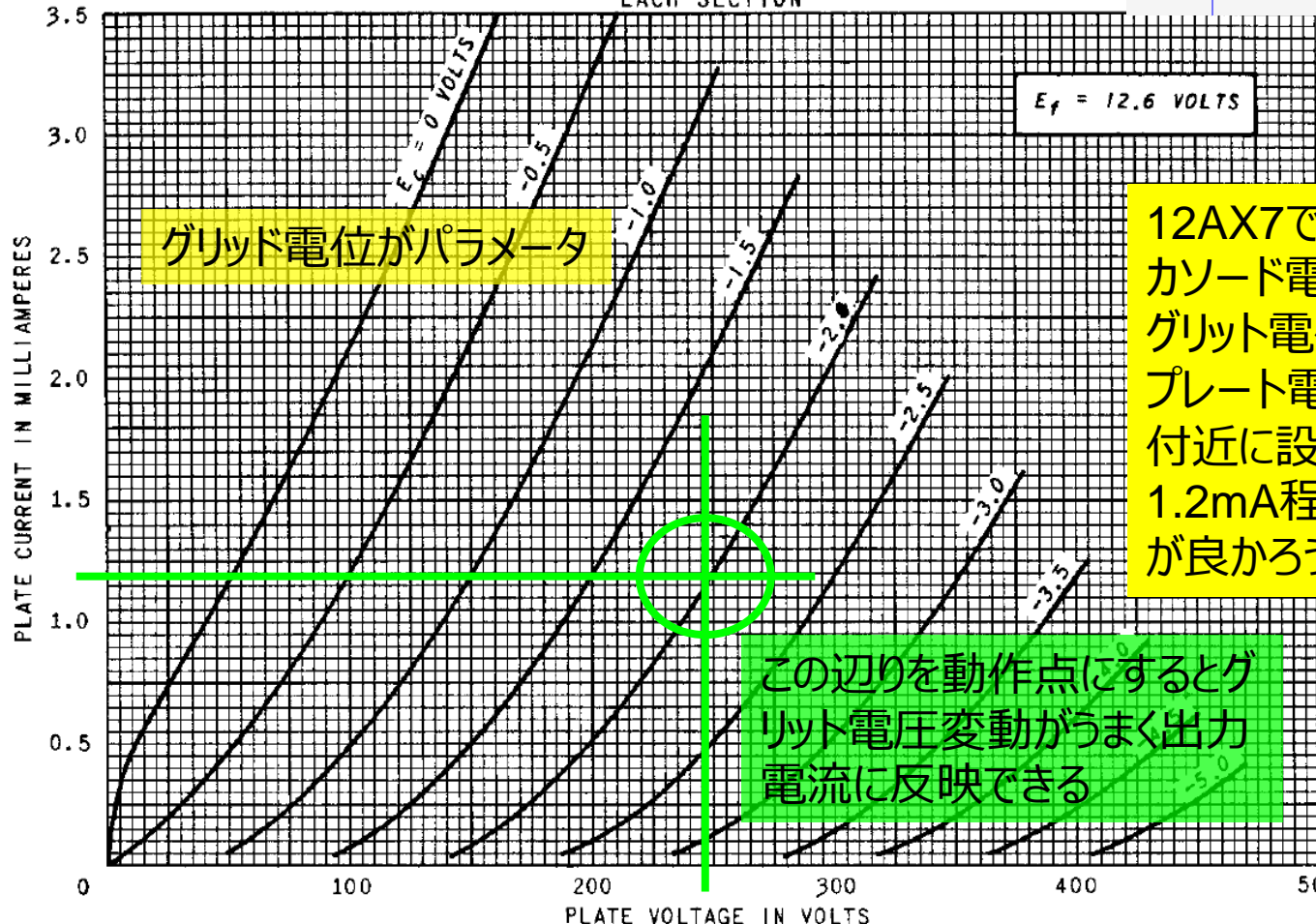


12AX7のIV特性

I_p (mA)

AVERAGE PLATE CHARACTERISTICS

EACH SECTION



グリッド電位がパラメータ

12AX7で増幅動作をさせるにはカソード電位に対し、グリッド電位を-2V、プレート電位を250V付近に設定し、プレート電流を1.2mA程度流す状態にするのが良からう。

この辺りを動作点にするとグリッド電圧変動がうまく出力電流に反映できる

ここでは、特性図に書かれているのは、真空管の望ましい動作範囲でに違いない、と無邪気に仮定している。妥当性は、自分で考えてみてね。

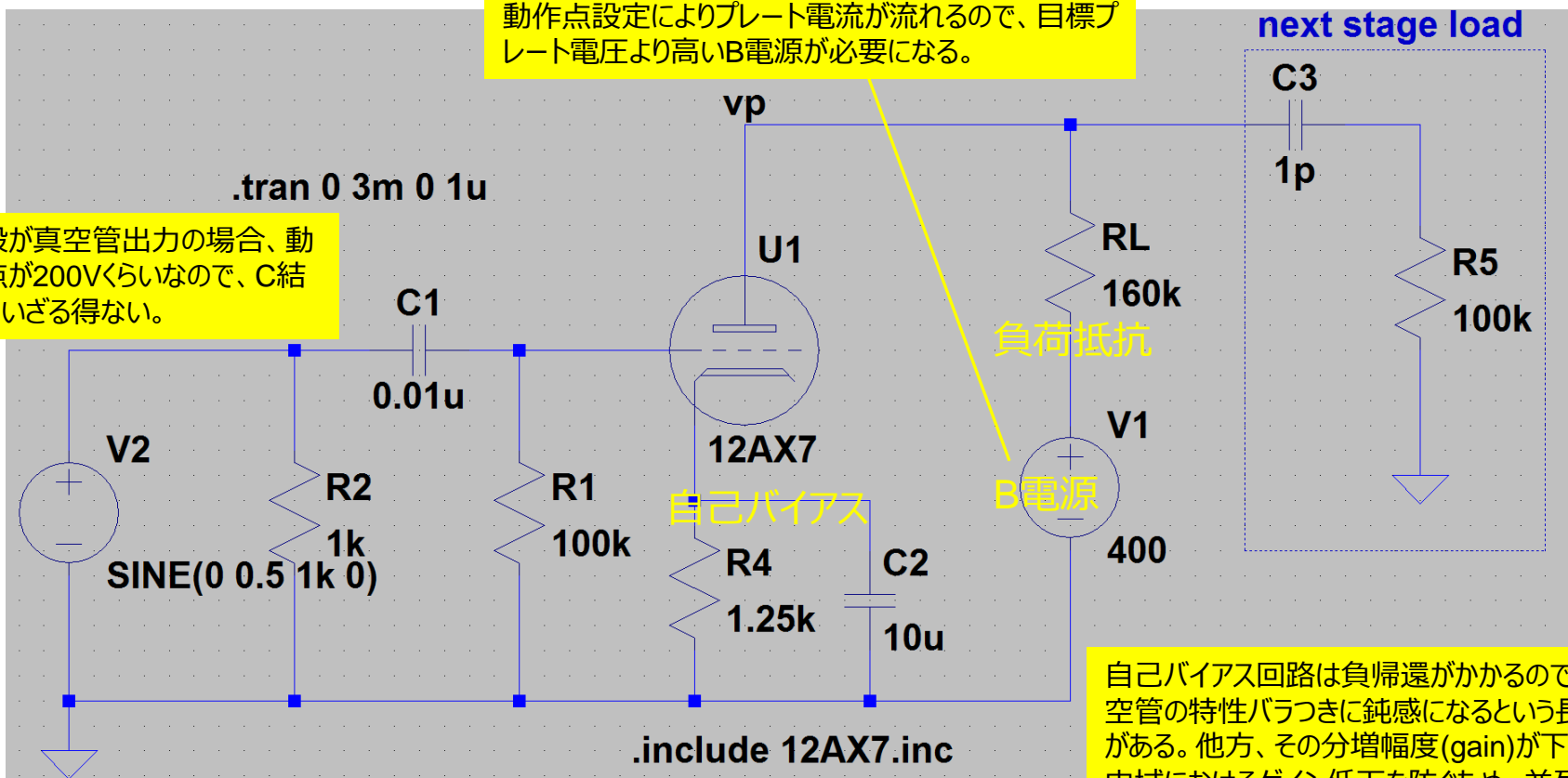
真空管の動作点設定と負荷抵抗

真空管が線形動作をするためには、グリッド電位をプレート電位より少し低くした状態で動作させる必要がある。この動作点を設定するものをバイアス回路と呼ぶ。真空管回路で良く用いられるのが下図のようにカソードに抵抗(下図R4)を入れる方法である。

真空管は入力の電圧変化 Δv_g を出力の電流変化 $\Delta I_p = g_m \Delta v_g$ に変換する素子なので、電流変化分を電圧に変換しないと次段で使えない。その方法としてプレートに負荷抵抗 R_L を接続する方法がある。その場合、入力電圧変動に伴いプレート電圧も変化することになるので、 $g_m R_L$ をそのままは電圧変化として取り出せなくなる。

動作点設定によりプレート電流が流れるので、目標プレート電圧より高いB電源が必要になる。

前段が真空管出力の場合、動作点が200Vくらいなので、C結を用いざる得ない。



自己バイアス回路は負帰還がかかるので、真空管の特性バラつきに鈍感になるという長所がある。他方、その分増幅度(gain)が下がる。中域におけるゲイン低下を防ぐため、並列に容量が接続されている。

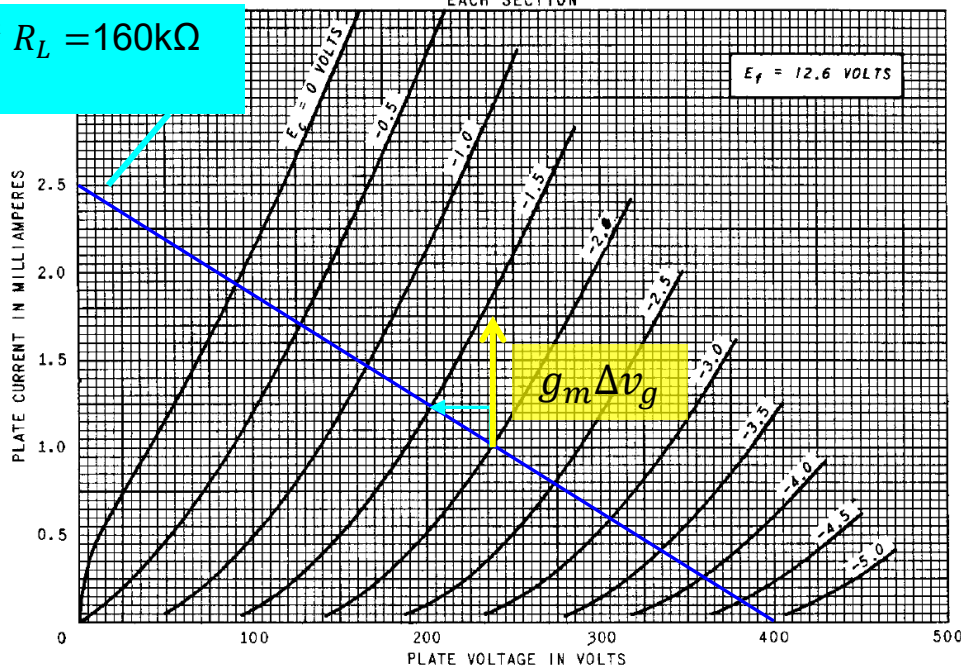
負荷直線

プレート電流によるプレート電圧はIV平面上に直線としてプロットできる。そこで、真空管のIV特性に、負荷直線(load line)を重ね書きすれば、出力電圧が交点として求まる。

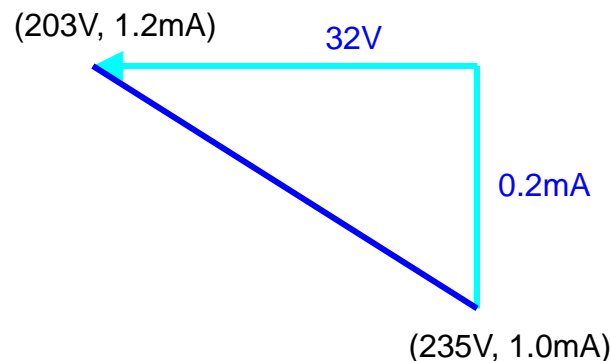
12AX7 AVERAGE PLATE CHARACTERISTICS

EACH SECTION

電源が400Vで $R_L = 160k\Omega$ の負荷直線



V_G が-2Vから-1.5Vに変化している部分を拡大すると



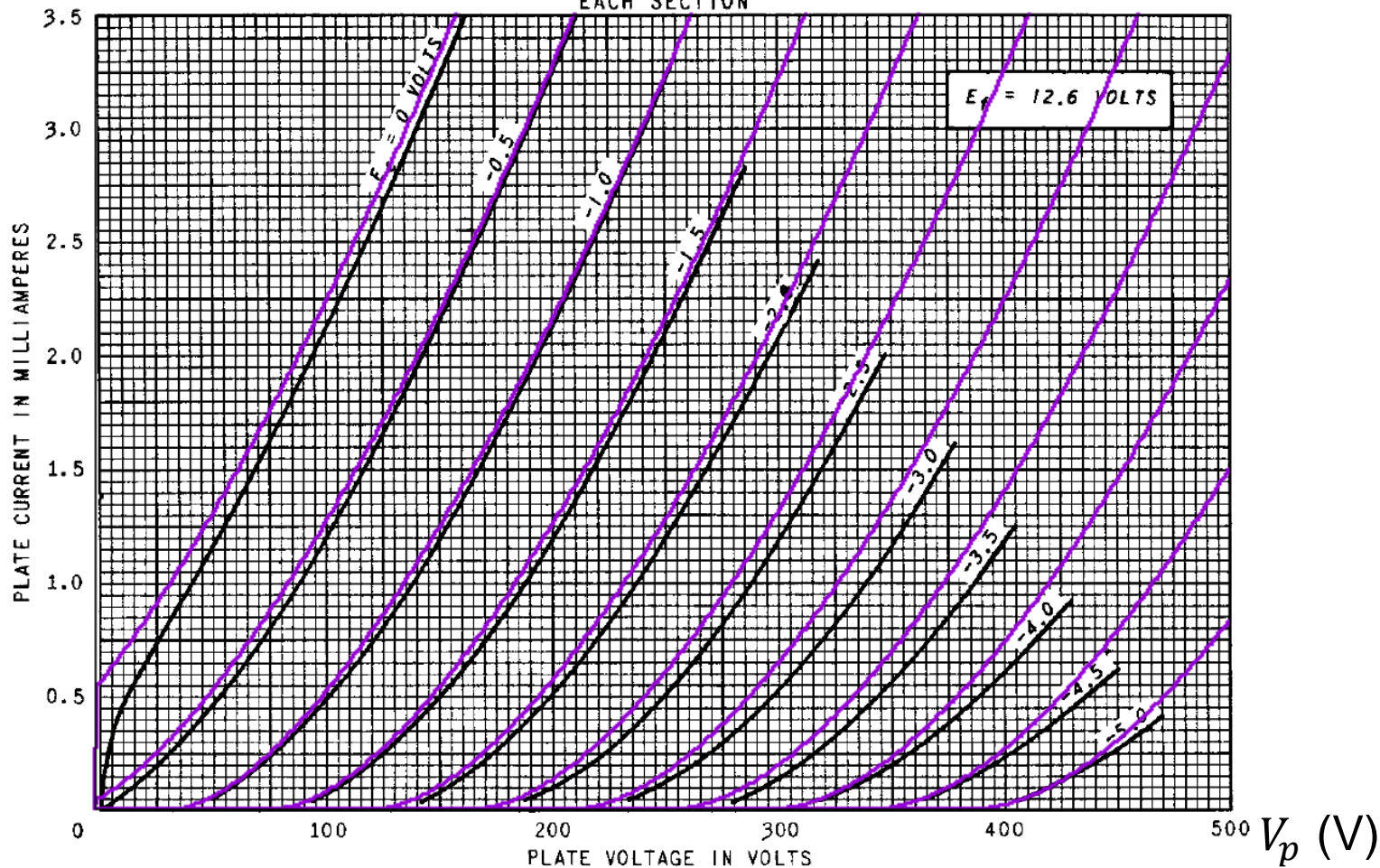
この場合、入力の0.5Vの電圧増が32Vのプレート電圧減になっているので、増幅率は-64倍になっている、と読み取れる。

図から本来、 $g_m = \frac{\Delta I_p}{\Delta v_g} = \frac{0.9\text{mA}}{0.5\text{V}} = 1.8\text{mS}$ がそのまま見れば0.9mA変わる筈のプレート電流が、0.2mAしか変化していない様子が観察される。

I_p (mA)

AVERAGE PLATE CHARACTERISTICS

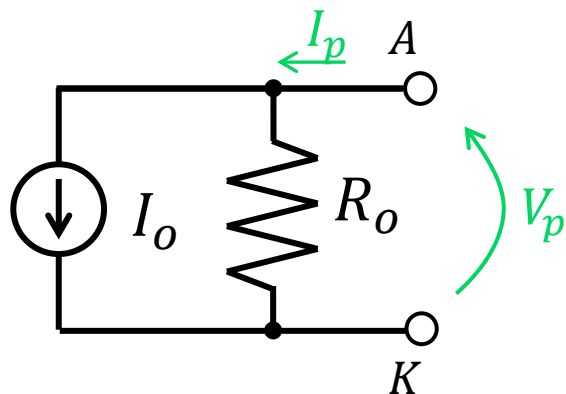
EACH SECTION



中林 歩: 真空管アンプの「しくみ」と「基本」, 技術評論社, 2009.

真空管出力のNorton等価回路

IV特性は、場所により等価回路が異なる。そこで、ある動作点を仮定してIV特性を近似する直線を引く。



$V_g = -2V$ で、 $V_p = V_A - V_K = 250V$ を動作点とすると、IV直線の式はsimulationから

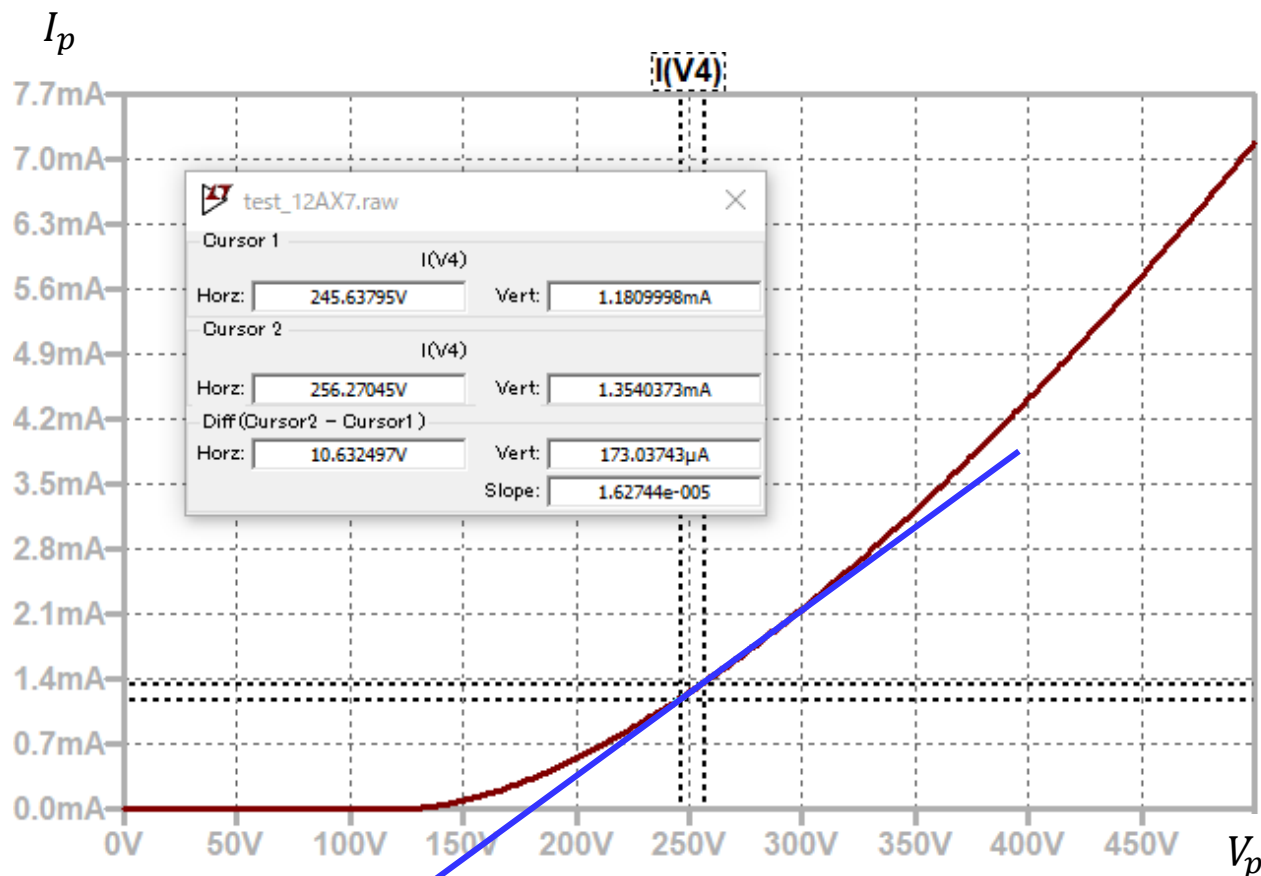
$I_p = 16.3^u (V_p - 250) + 1.3^m$ である。一方上図の等価回路から

$$I_p = \frac{V_p}{R_o} + I_o$$

が成り立つから、

$$\therefore R_o = \frac{1}{16.3^u} = 61.4k\Omega$$

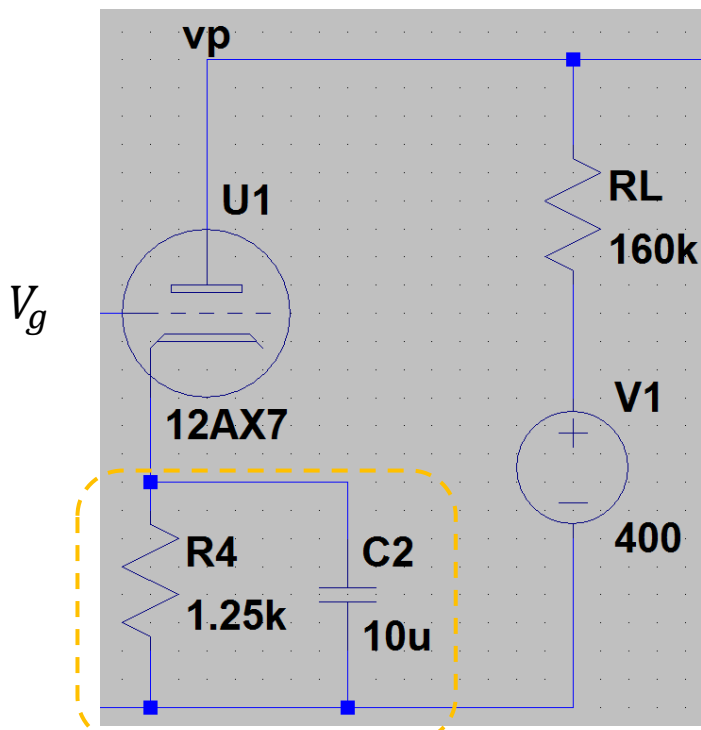
$$I_o = -250 \cdot 16.3^u + 1.3^m = -2.8 \text{ mA}$$



ここでSI接頭辞(mとかµとか)を右上に書く便法を使っている。手計算の時は便利であるが、答案に使うと減点されるかも。

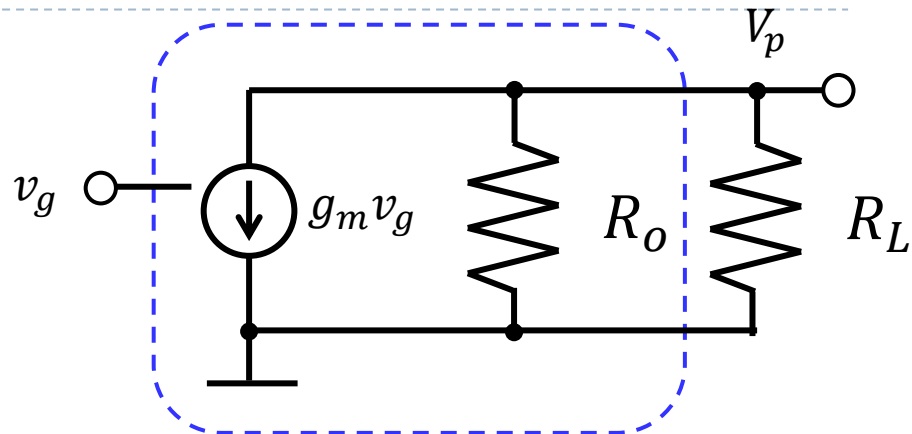
真空管回路の増幅度A

U1の小信号等価回路

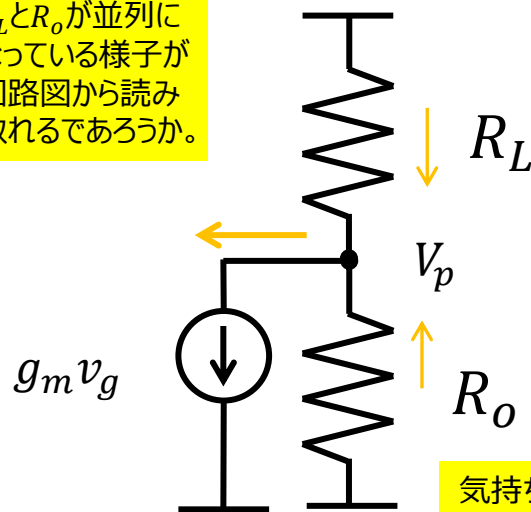


バイアス回路は、増幅度を概算するとき無視している。

増幅度を上げるため R_L を大きくしたいが、そうするとプレート電位が下がってしまい、出力振幅が取れなくなる。また、実際出力は R_L と次段の入力インピーダンスの並列接続なので、 R_L を大きくしても段々効かなくなってくる。この回路で増幅度は100倍程度までであろう。



R_L と R_o が並列になっている様子が回路図から読み取れるであろうか。

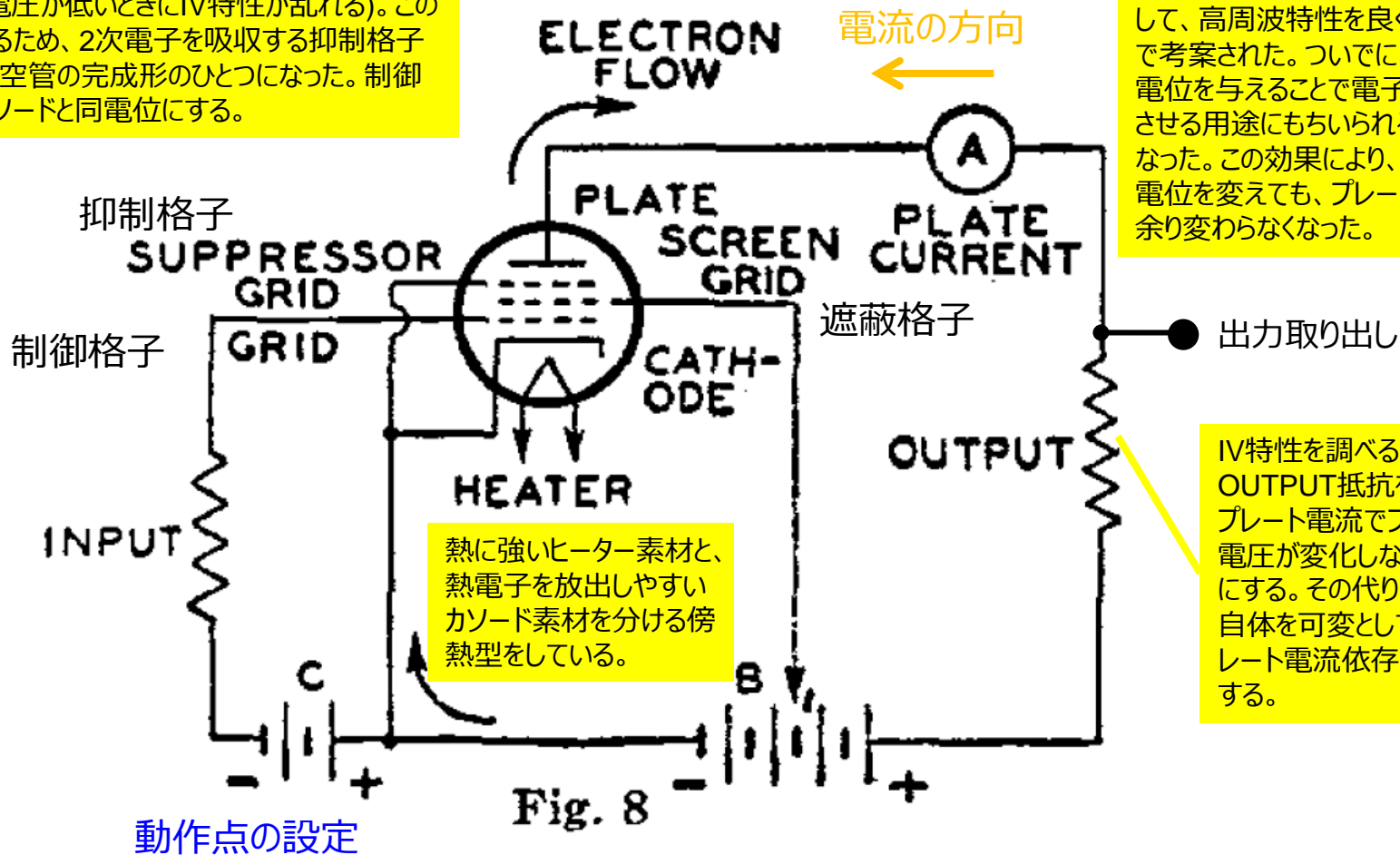


気持的には、全部 R_L に流れて欲しいが、 R_o からも電流が供給されてゲインが落ちてしまう。

$$A = \frac{\Delta V_p}{\Delta V_g} = -g_m (R_o \parallel R_L)$$

5極管の回路

遮蔽グリッドにより加速された電子は、プレートに当たって二次電子を放出する状況が発見された(ダイナトロン現象:プレート電圧が低いときにIV特性が乱れる)。この現象を抑止するため、二次電子を吸収する抑制格子が設けられ、真空管の完成形のひとつになった。制御格子は大抵カソードと同電位にする。

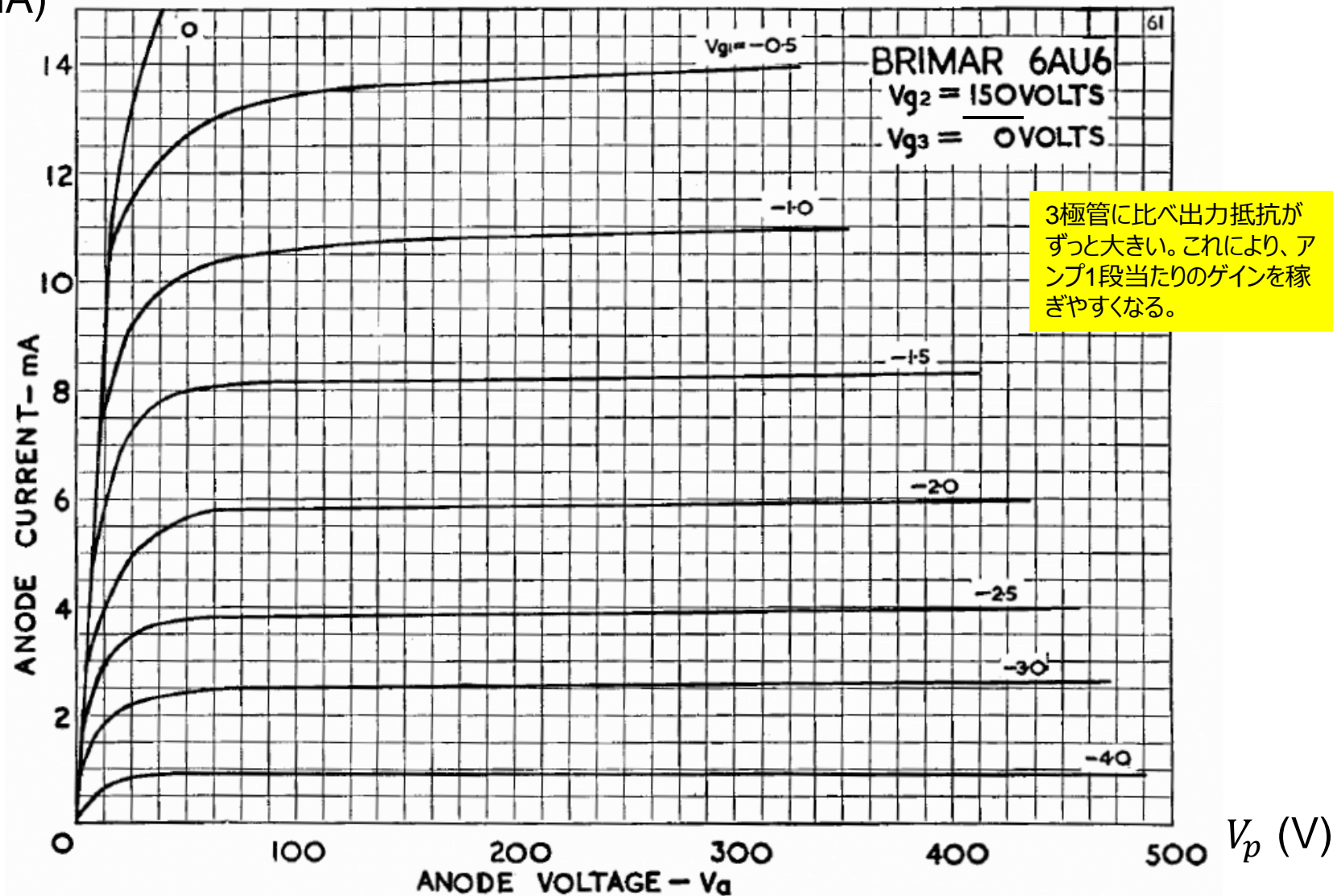


遮蔽グリッドは元々、制御グリッドとプレートとの間の寄生容量を遮断して、高周波特性を良くする目的で考案された。ついでに、プラスの電位を与えることで電子流を増大させる用途にもちいられるようになった。この効果により、プレート電位を変えても、プレート電流が余り変わらなくなった。

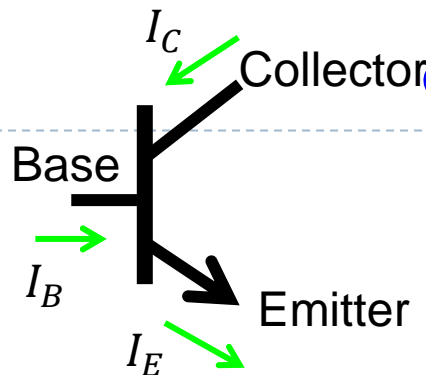
5極管のIV特性

6AU6

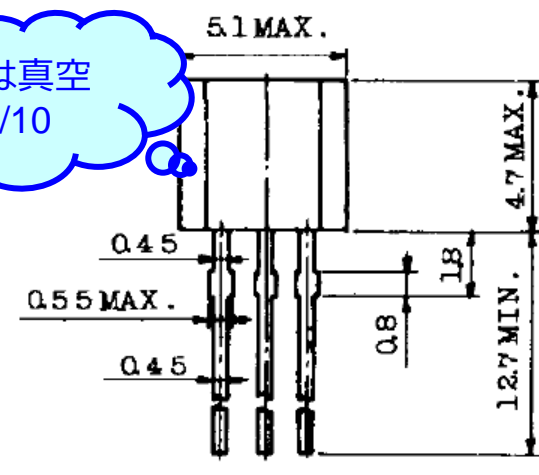
I_p (mA)



NPN Tr.のIV特性



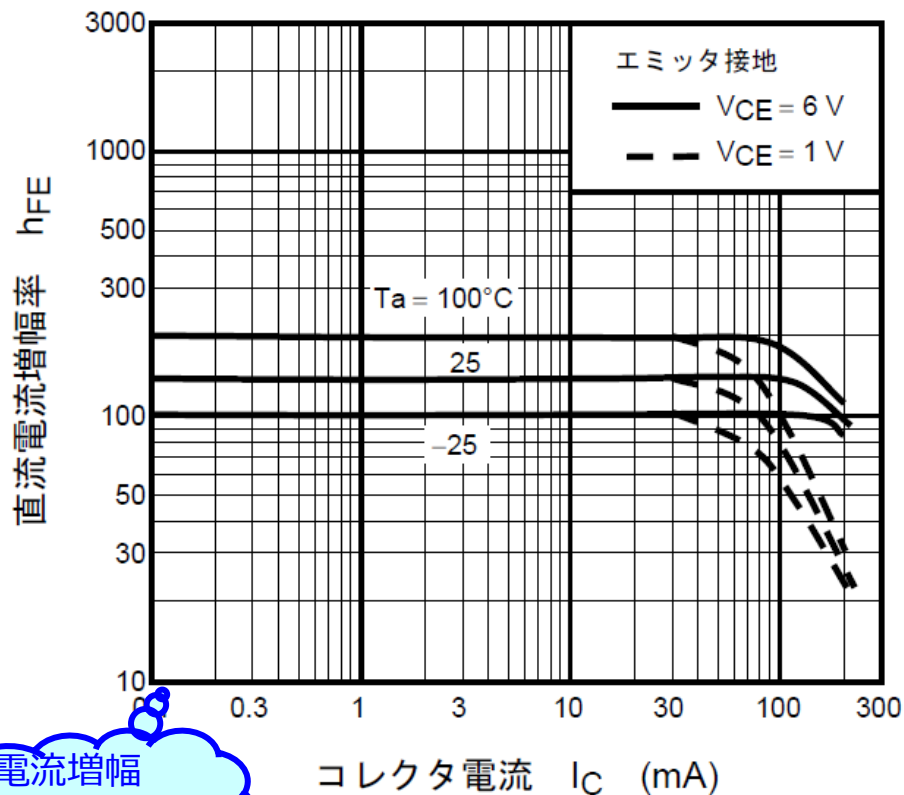
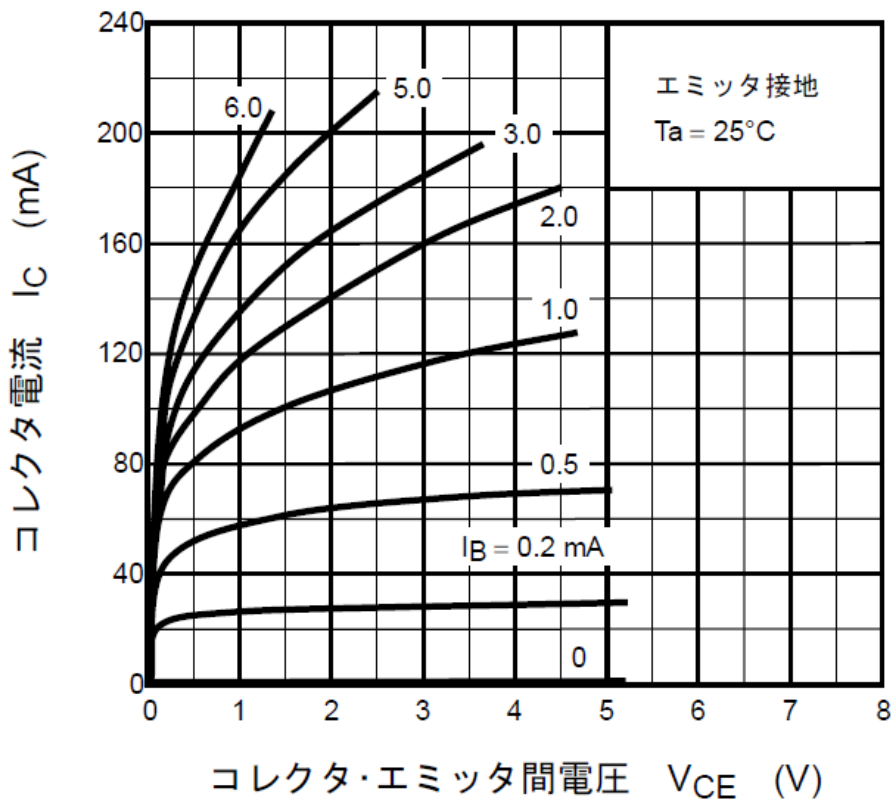
寸法は真空管の1/10



$$I_E = I_C + I_B \quad h_{fe} = \frac{I_C}{I_B}$$

$$I_C = I_s \exp \frac{V_{BE}}{V_T} \quad V_T = \frac{kT}{q} \approx 26mV$$

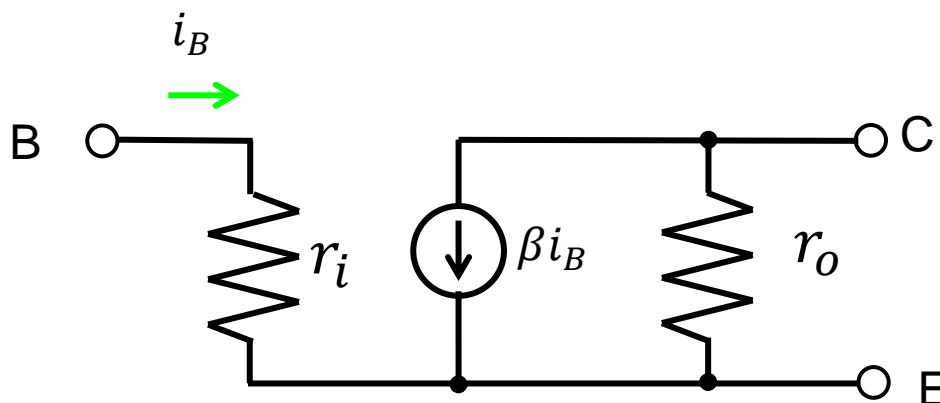
2SC1815 $I_C - V_{CE}$



電流増幅率は広い範囲で一定

バイポーラトランジスタの小信号等価回路

用途により様々な等価回路が用いられているが、電流増幅デバイスという観点からは、下記の(小信号)等価回路が分かり易いと思う。



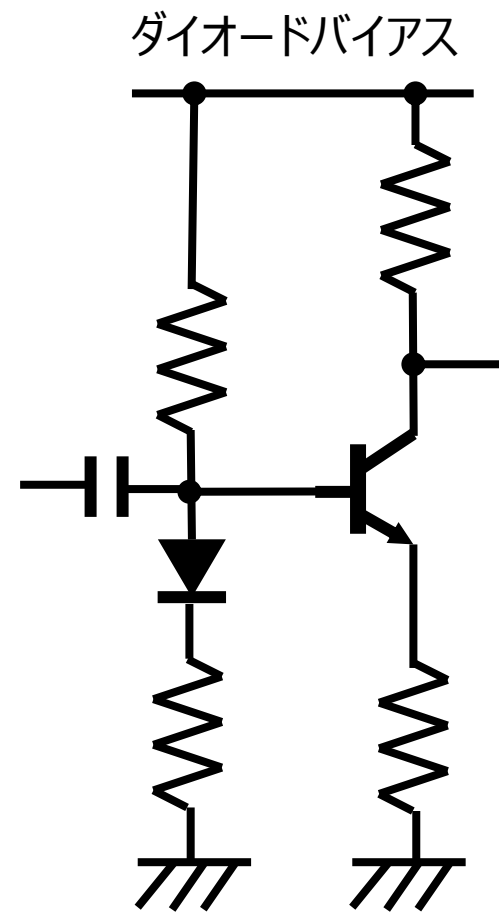
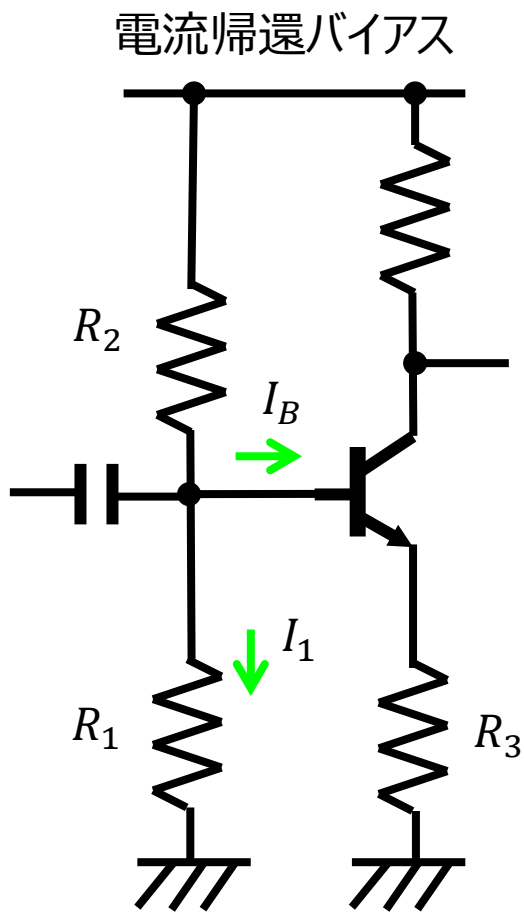
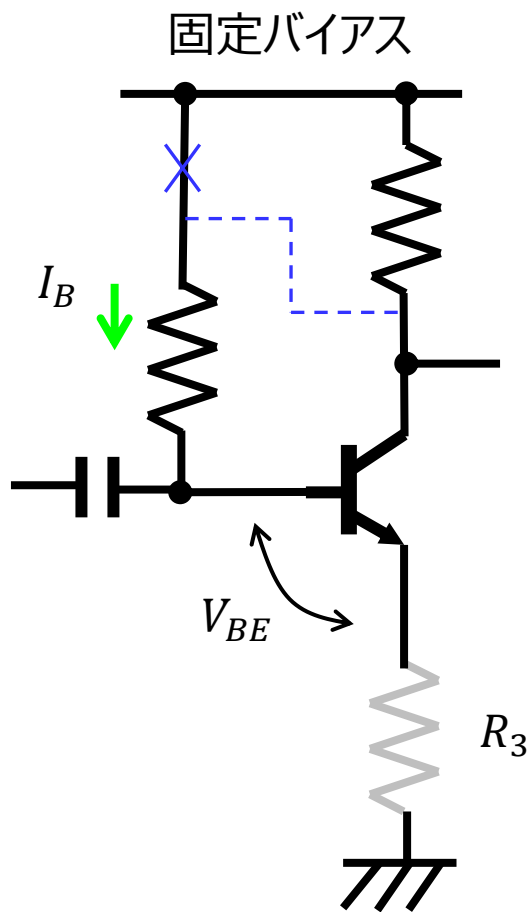
r_i は i_B が大きいほど大きくなるが、オーダーとしては $1\text{k}\Omega$ 程度である。真空管に比べ、何桁も小さい。

そのため、回路でC結するのに、容量値を何桁が大きくなる必要が出てきた。

その代り、入出力の電位差が 10V 以下になり、耐圧には余裕が出来た。

DC動作点としては V_{BE} は $0.6\text{V}\sim 0.7\text{V}$ になるのが普通である。直結回路を作りやすくなったが、実際には長い間、真空管時代から引き継いだ回路形式が使われた。

バイポーラトランジスタのバイアス回路

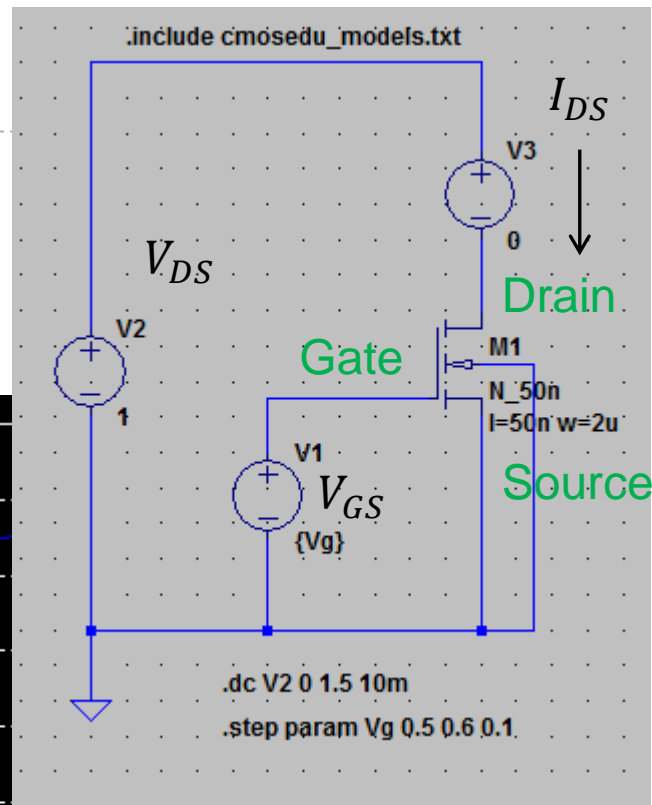
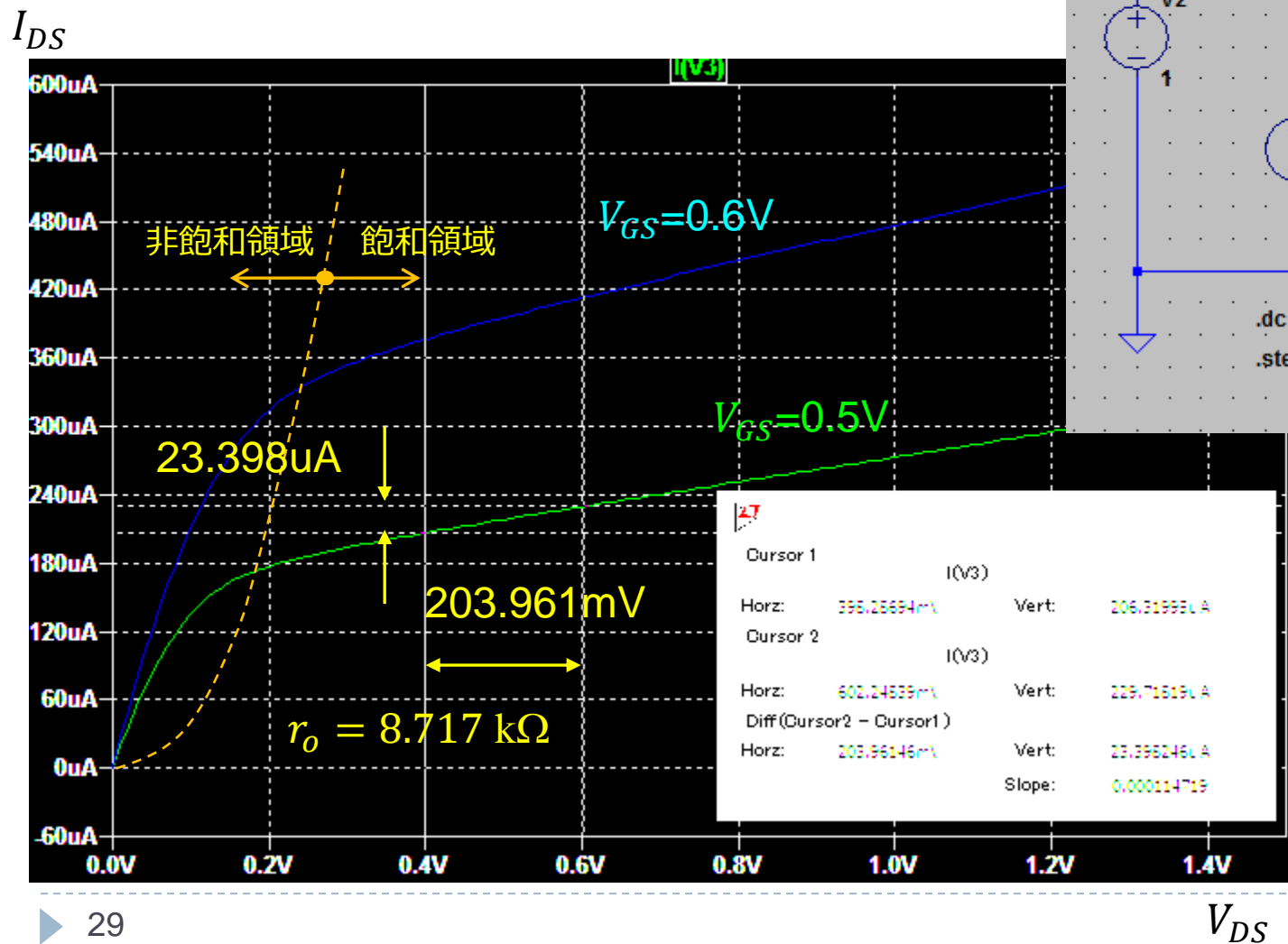


青線のように繋ぎ変えると自己バイアス回路
 R_3 なしも可

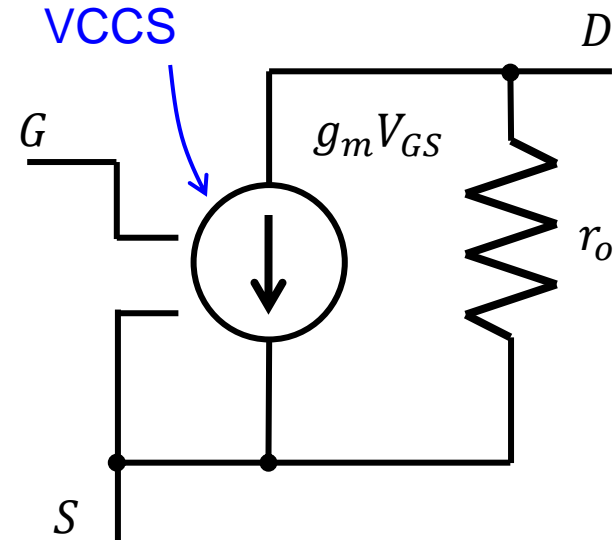
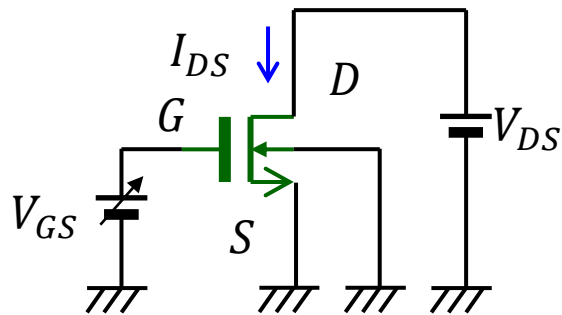
$$I_1 = \frac{V_{BE} + I_E R_3}{R_1}$$

MOS TrのIV特性

Baker, "CMOS 3rd Ed.," IEEE Press, 2010.
のshort channel NMOSモデル



MOS Trの小信号等価回路

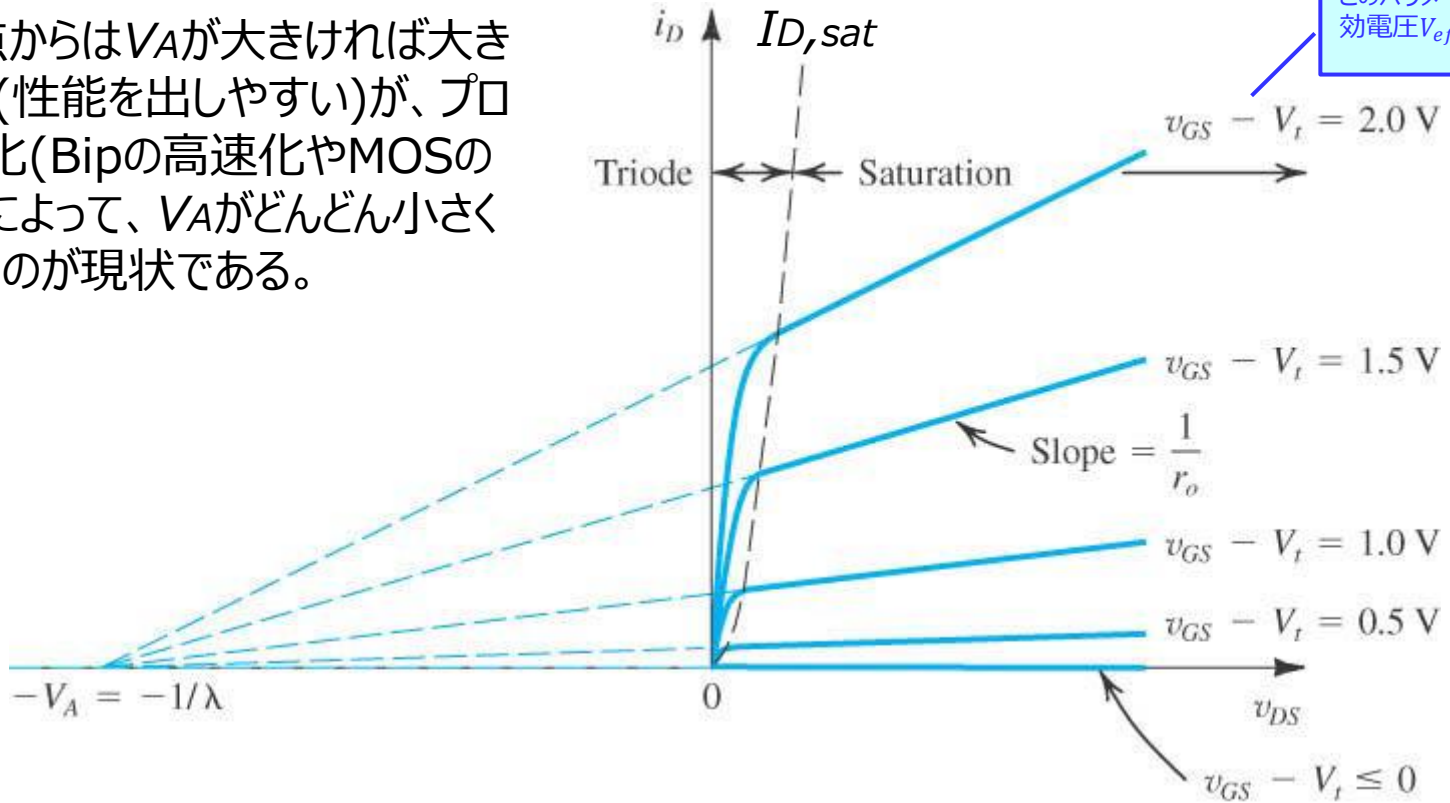


MOSトランジスタの小信号等価回路は真空管と同じになる。
回路的に最大の違いは、動作電位(ゲート電位)がプラスになる(ソース電位より高い)ところで動作することである。(enhancement型の場合。)

アーリー電圧 (Early voltage)

飽和領域のIV特性は $\lambda I_{D,sat}$ に比例する直線になる。飽和直線は1点 $-V_A$ で交わることになる。この V_A をEarly電圧という。出力抵抗とは $r_o = 1/\lambda$ の関係がある。バイポーラTrでも同様な現象があり、先に確立していた認識である。

回路観点からは V_A が大きければ大きい程良い(性能を出しやすい)が、プロセスの進化(Bipの高速化やMOSの微細化)によって、 V_A がどんどん小さくなっているのが現状である。



<https://www.google.co.jp/url?q=http://www.ittc.ku.edu/~jstiles/312/handouts/Drain%2520Output%2520Resistance.pdf&sa=U&ei=GQBFU8XtPMLfkAWgxIDICw&ved=0CFMQFjAH&usg=AFQjCNFBbJxo1f3yzgTqXCbqbjwtSLLipw>

MOS TrのIV特性まとめ

$$\beta = \mu_{eff} C_{ox} \frac{W}{L}$$

	非飽和領域 $V_{DS} < V_{GS} - V_T$	飽和領域 $V_{DS} > V_{GS} - V_T$
強反転領域 $V_{GS} > V_T$	$I_D = \beta \left((V_{GS} - V_T) - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS}$	$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$
弱反転領域 $V_{GS} < V_T$	$I_D = I_0 \exp\left(\frac{V_{GS}}{S}\right)$	

$$V_{OV} = V_{eff} = V_{GS} - V_T = V_{sat} \quad : \text{オーバードライブ電圧, 有効電圧, 飽和電圧}$$

$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS}=const.} = \frac{2I_D}{V_{OV}} \quad : \text{相互コンダクタンス(飽和領域での)}$$

$$g_o = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right|_{V_{GS}=const.} = \lambda I_D = \frac{I_D}{V_A} \quad : \text{出カドレインコンダクタンス(飽和領域での)}$$

参考文献

- ▶ RCA Manufacturing Company, Inc. "Vacuum Tube Design," Harrison, 1940.
- ▶ 原島修, "真空管," 岩波全書, 1956.
- ▶ 川上正光, "電子回路I" 共立全書, 1953. ~Vまで、全5巻のシリーズ
- ▶ 黒川達夫, "デジタル時代の真空管アンプ," 誠文堂新光社, 1989.
- ▶ 中村歩, "真空管アンプの「しくみ」と基本," 技術評論社, 2009.
- ▶ Ayumi's Lab., <http://ayumi.cava.jp/>
- ▶ 阿部豊比古 訳, Richard F. Shea, "トランジスタ増幅器の設計," 無線従事者教育協会, 1955.
- ▶ 安田順一, "設計・応用 トランジスタ回路," 電波技術社, 1959.
- ▶ グレイ 他, "システムLSIのためのアナログ集積回路設計技術," 培風館, 2003.
- ▶ Behzad Razavi, "アナログCMOS集積回路の設計," 丸善, 2003. 基礎編と応用編の2分冊、原書は1巻
- ▶ Behzad Razavi, "A Circuit for All Seasons," IEEE Solid-State Circuit Magazine, from Summer 2014 to Spring 2020.