

回路を考える

第4回 素材(素子)に親しもう

ザインエレクトロニクス株式会社
源代 裕治

第1回 2018年10月23日(火) 歴史と今 --- 先人たちの苦闘、今に残る混乱

第2回 2018年11月 6日(火) 回路網の話(オフセット付き抵抗編)

第3回 2018年11月13日(火) 回路網の話(変化に応答する回路編)

 第4回 2018年11月27日(火) 素材(素子)に親しもう

第5回 2018年12月 4日(火) もっと回路と話そう。話せば分かる。

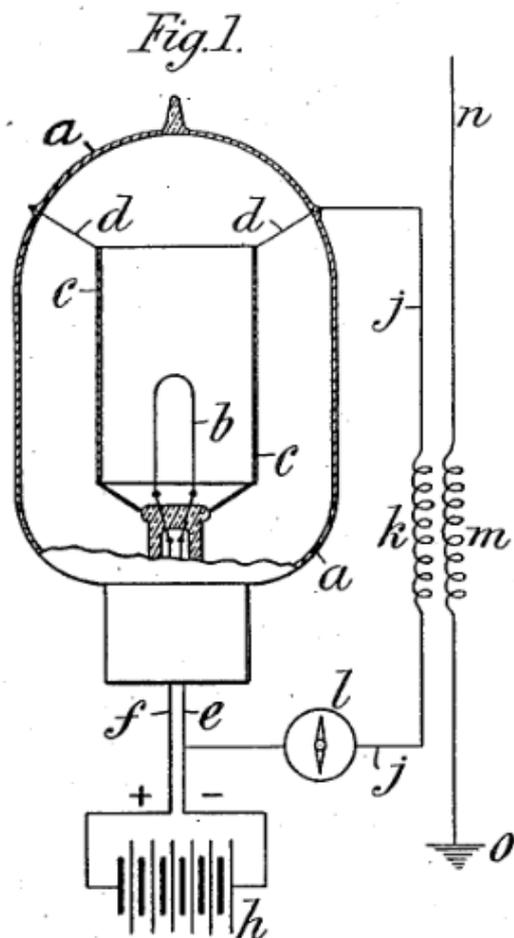
今回の内容は実質的に12/4の最終講義に回します。第5回も資料は作ったので、興味があれば見てください。最終レポート課題もそちらにあります。必ず提出ください。

真空管の発明

1905

1907

Flemingの2極管



signal
indicating
device

DeForestのAudion

アンテナ

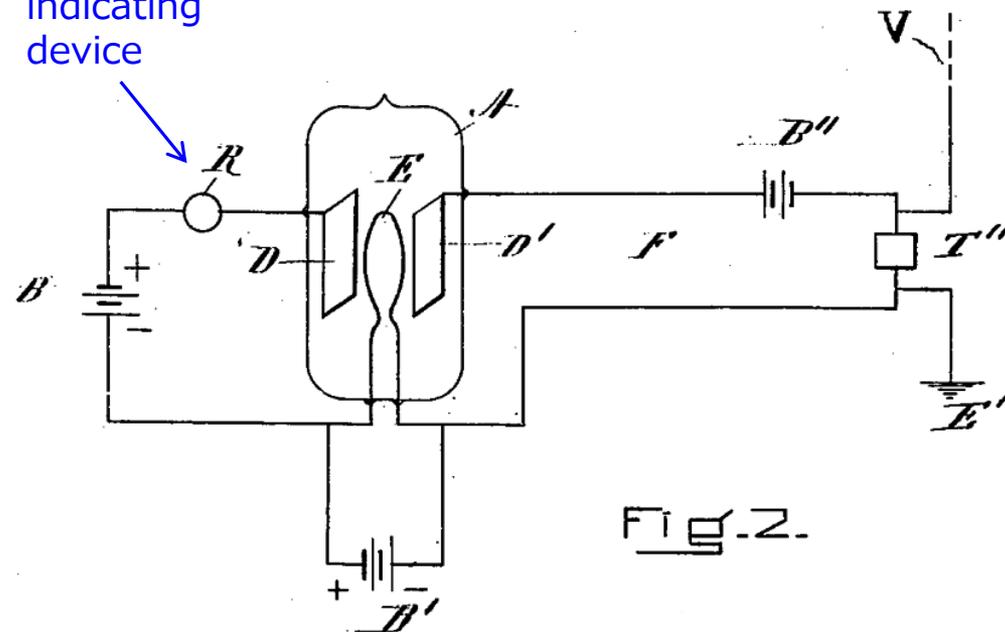


Fig. 2.

DeForestの発明は、もともとFlemingの特許を回避するために工夫された。プレート検波みたいな動作であろうか。明細書中には増幅するとの記載があるが、3極管とは違い、グリッドがプレートの反対側に配置されている。

発明家DeForestはArmstrongらによって開拓された3極管理論は、最後まで理解できなかったのではないかとされている。

J. A. Fleming, "Instrument for Converting Alternating Electric Currents into Continuous Currents," US Patent Number 803,684, patented Nov. 7, 1905

L. De Forest, "Device for Amplifying Feeble Electrical Currents," US Patent No. 841,387, patented Jan. 15, 1907

真空管の極数

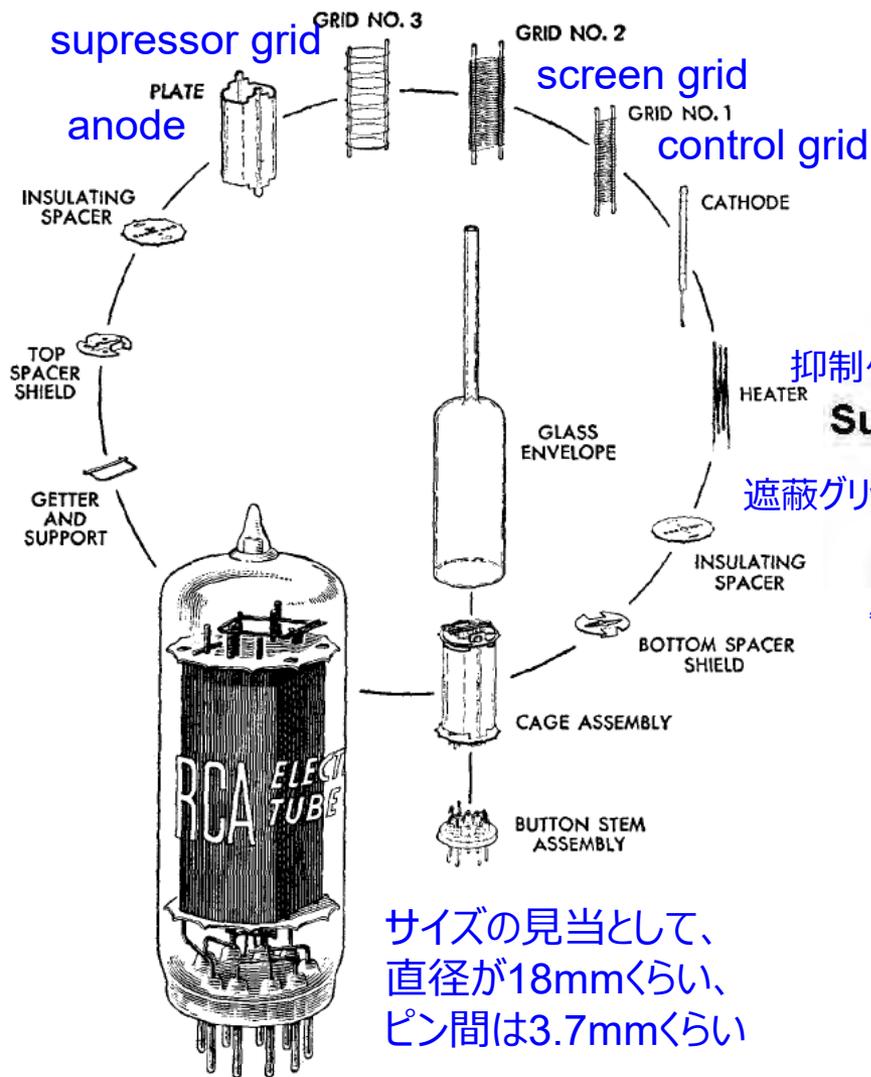
極数	英語名	発明者と当初の命名	公開年
2極管	diode	Fleming / Valve	1905
3極管	triode	DeForest / Audion	1907
4極管	tetrode	Schottky / Screen Grid Tube	1915
5極管	pentode	Round	1927

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。

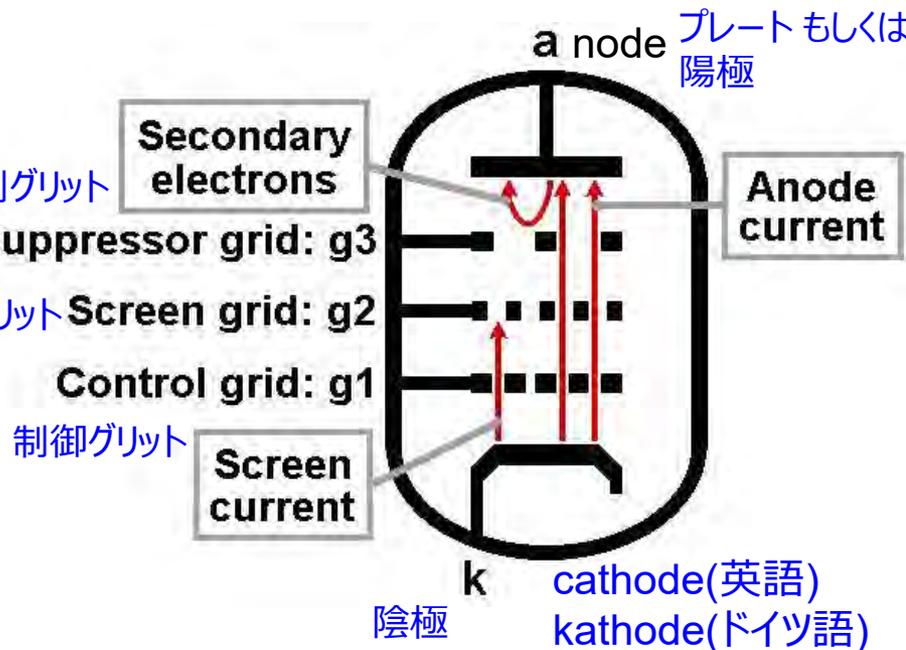
ラジオ受信機では初段に7極管が広く用いられたが、特殊真空管の一種だろう。

真空管(5極管)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)

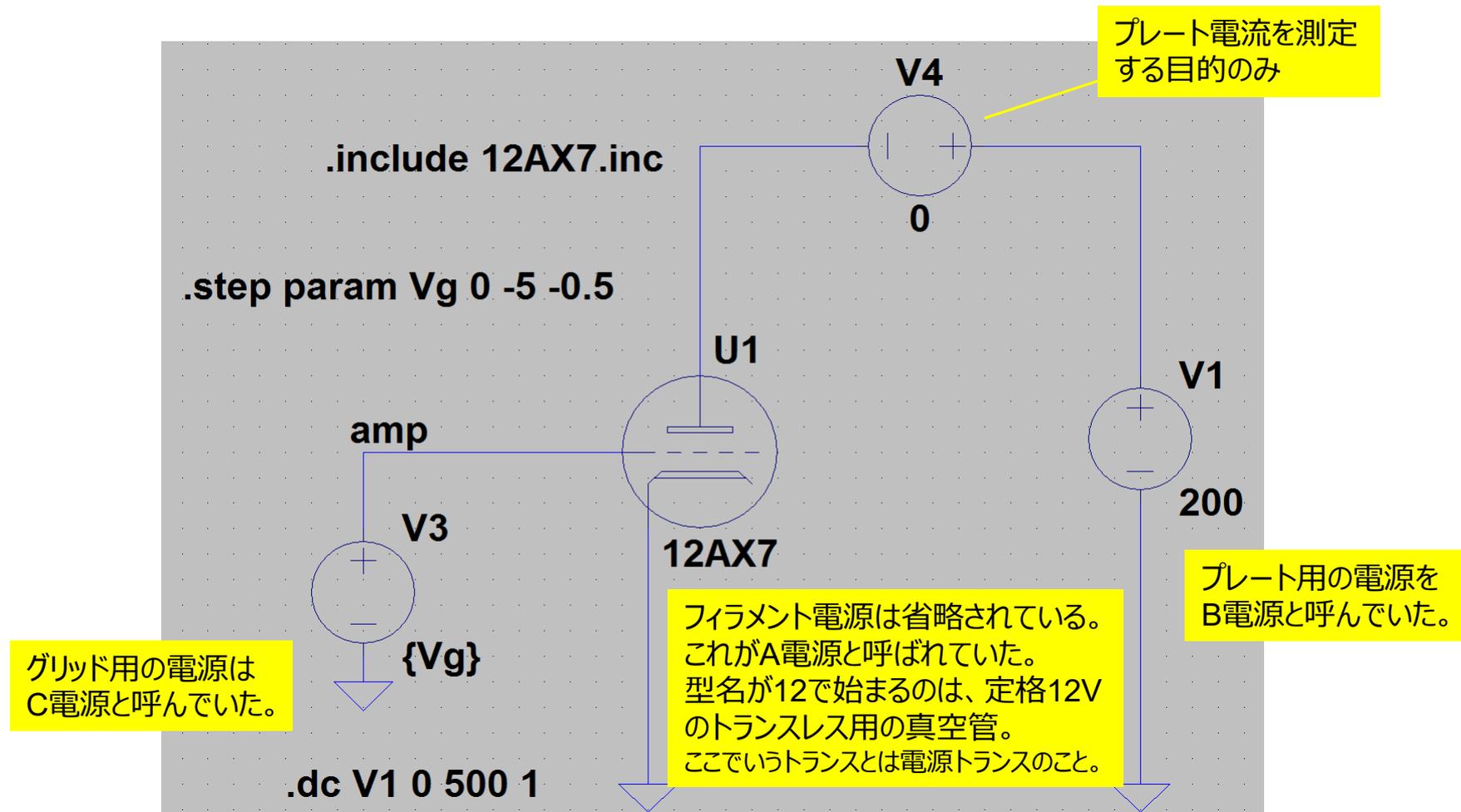
MT管
(6AV6)

ピンの荷重を、直
接ガラスが受ける
構造

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

3極管の基本回路

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)



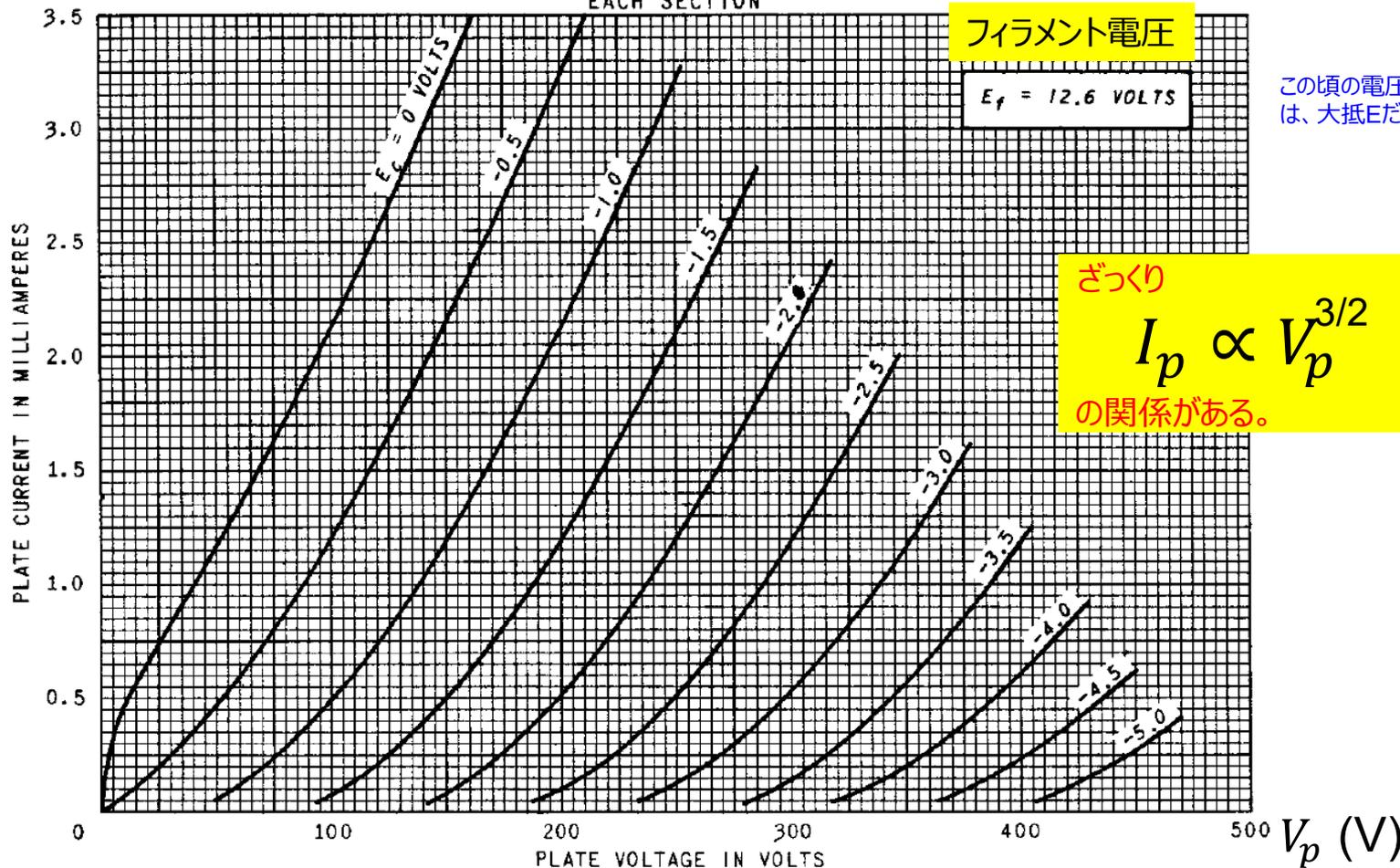
3極管のIV特性

12AX7

I_p (mA)

AVERAGE PLATE CHARACTERISTICS

EACH SECTION



General Electric ET-T509A dated 2-51

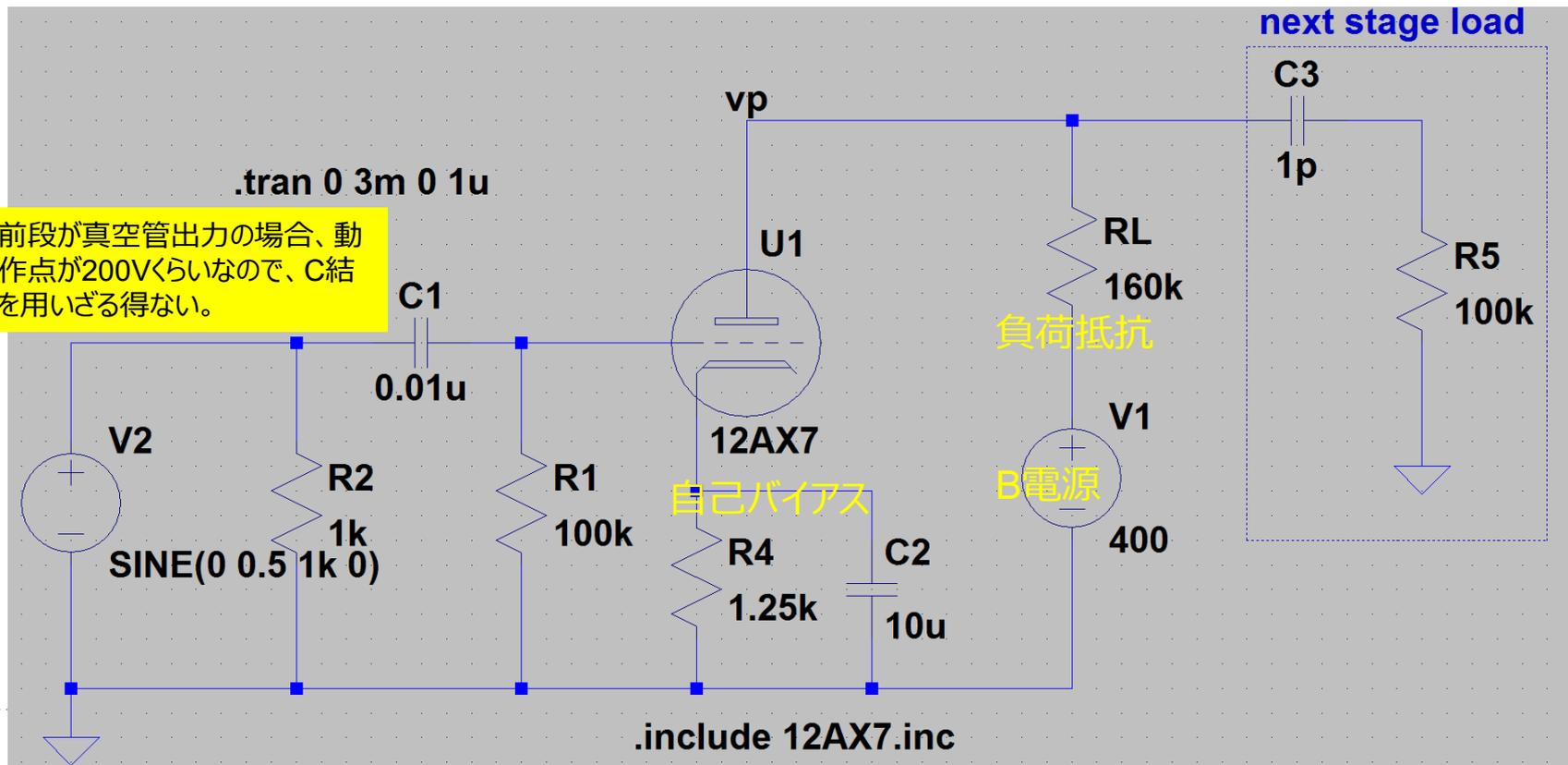
相互コンダクタンス

真空管は、入力の電圧変化 Δv_g を出力の電流変化 ΔI_p に変換する素子である。

この変換比はコンダクタンスの次元となり、かつ違うブランチでの比であるため、**相互コンダクタンス** g_m と呼ばれる。

$$g_m = \frac{\Delta I_p}{\Delta v_g}$$

電流変化分を電圧に変換しないと次段で使えない。そこでプレートに負荷抵抗 R_L を接続することが行われる。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。

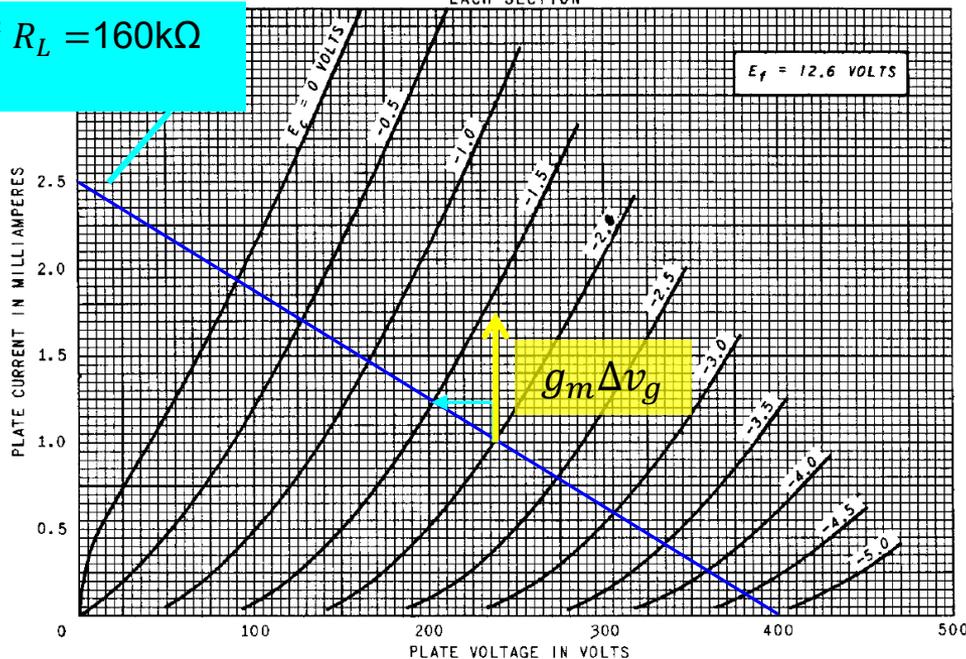


負荷直線

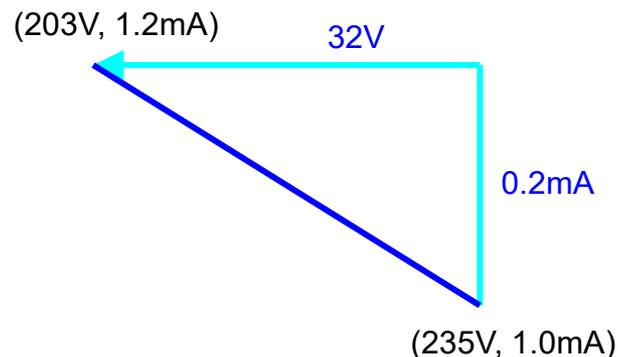
プレート電流によるプレート電圧はIV平面上に直線としてプロットできる。そこで、真空管のIV特性に、負荷直線(load line)を重ね書きすれば、出力電圧が交点として求まる。

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

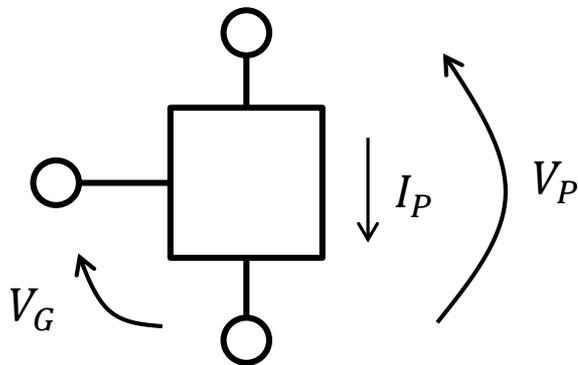


この場合、入力の0.5Vの電圧増が32Vのプレート電圧減になっているので、増幅率は-64倍になっている、と読み取れる。

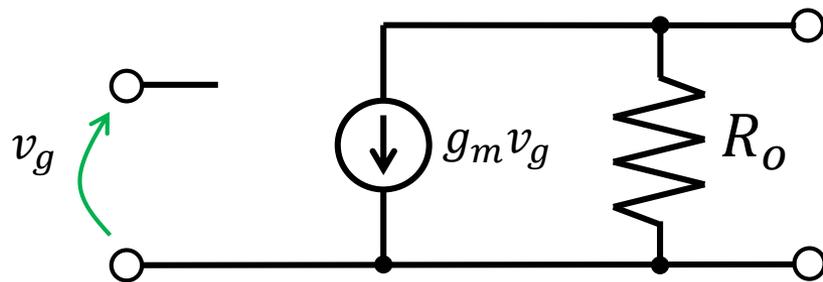
図から本来、 $g_m = \frac{\Delta I_p}{\Delta v_g} = \frac{0.9\text{mA}}{0.5\text{V}} = 1.8\text{mS}$ がそのまま見れば0.9mA変わる筈のプレート電流が、0.2mAしか変化していない様子が観察される。

真空管の等価回路

真空管は、入力端子と出力ブランチを持つ3端子素子である。このような複合素子の特性を表現にはどうすれば良いか？



動作点付近で局所線形化して変化分だけを見るなら、下図のような合成ブランチで表現できよう。ポイントは、他ブランチの電圧で駆動される電流源ブランチを用いている所にある。



ここでは、変化分を小文字で表す表記法を用いた。

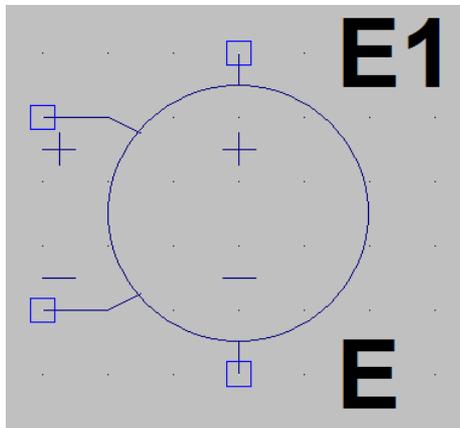
入出力が大きく変動すると等価回路の抵抗値などが定数でなくなるため、小信号モデルと呼ばれる。シミュレータでは、どのような状況でも正しいIV特性を示すことが求められるため、非常に複雑な等価回路を用いる必要がある。(それでも、あらゆる状況で適切な結果を返すことは不可能に近い。) 回路動作を考えるとときには、ずっと単純化した等価回路の方が、本質を理解しやすい。

従属電源ブランチ

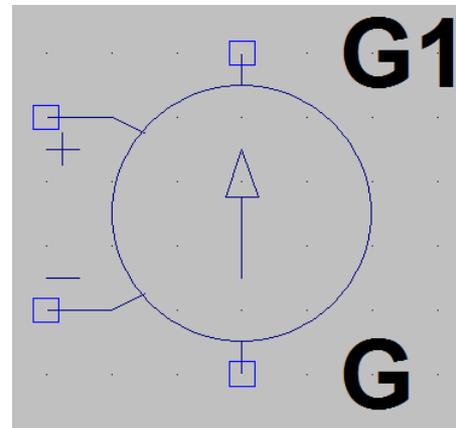
記号はLTspiceのもの。
デバイスの先頭文字割り当ては、Spiceでの決まり

他所の電圧や電流をパラメータとする電源ブランチをdependent sourcesと称する。
実回路図には存在しない仮想的な素子である。シミュレーションで(シミュレータ内部でも)多用する。

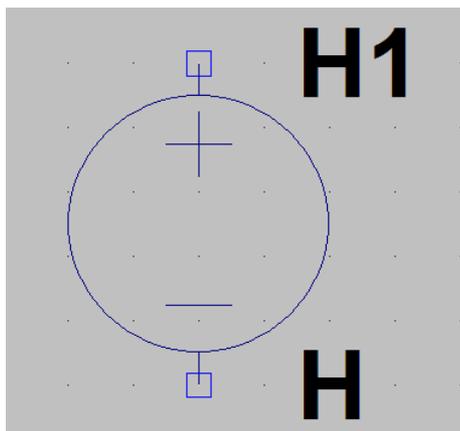
VCVS: Voltage Controlled Voltage Source



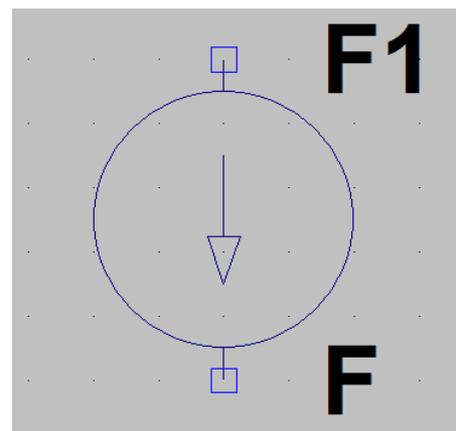
VCCS: Voltage Controlled Current Source



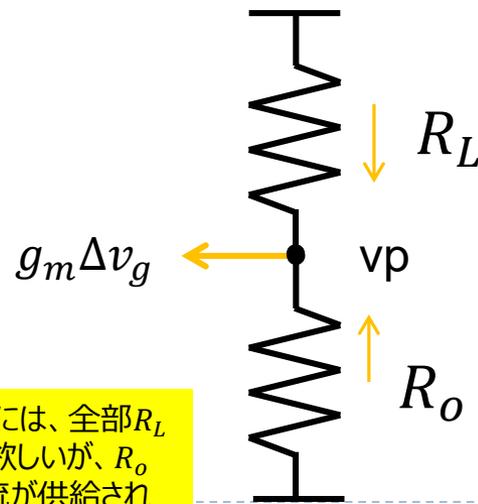
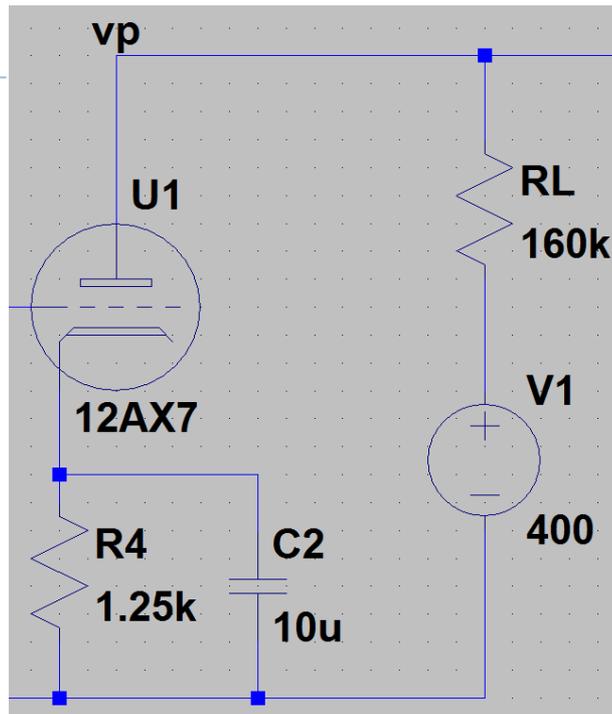
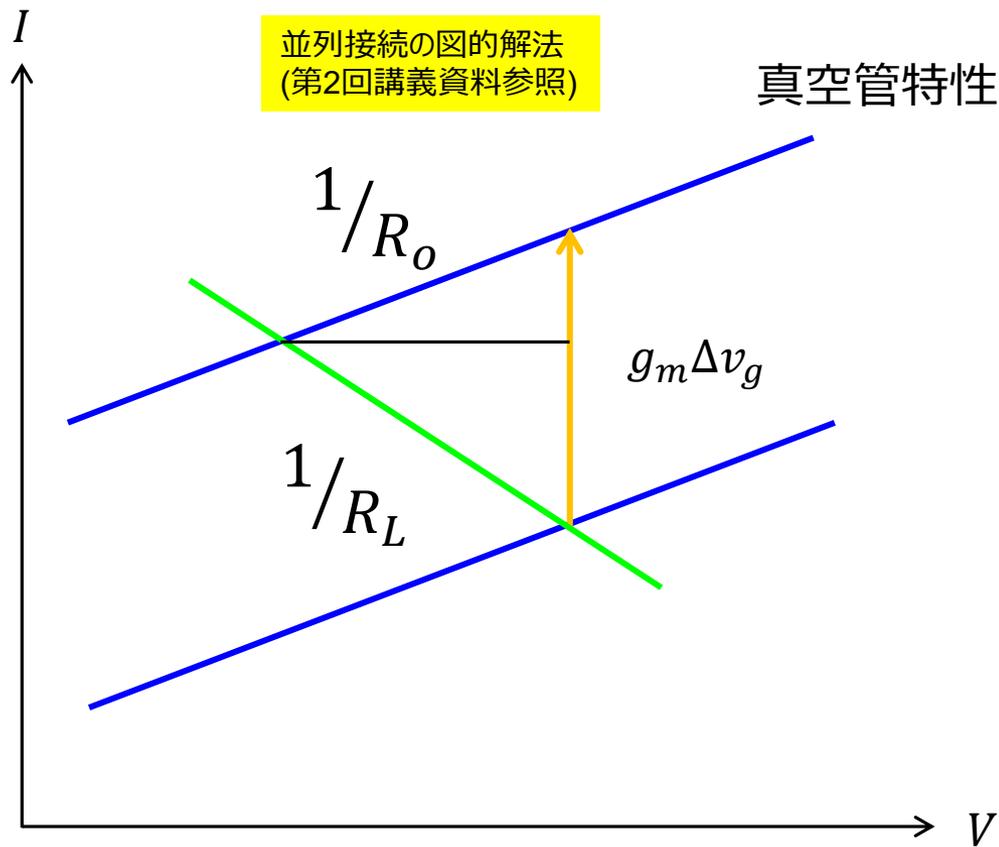
CCVS: Current Controlled Voltage Source



CCCS: Current Controlled Current Source



増幅率の図的考察

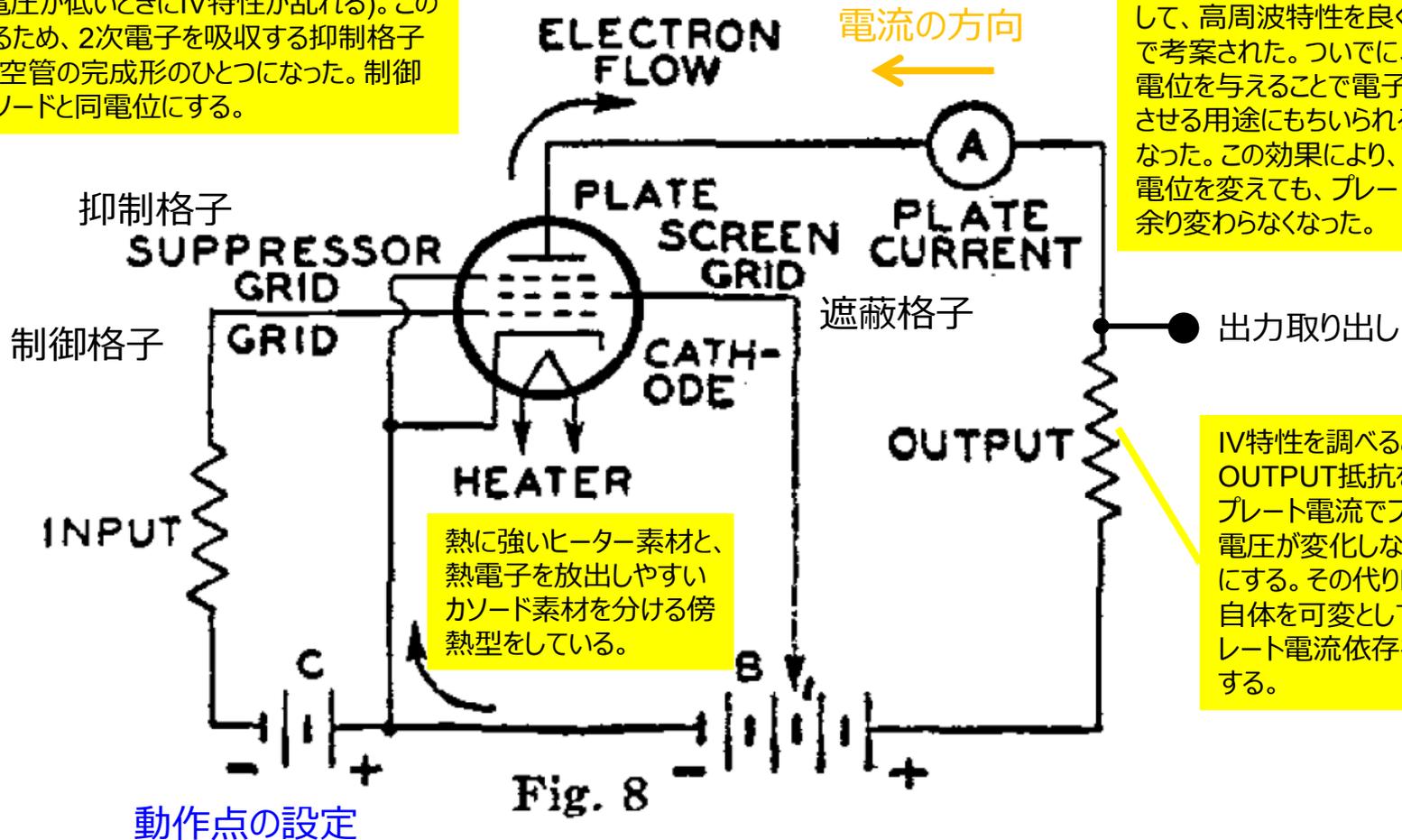


R_L と R_o が並列になっている様子が回路図から読み取れるであろうか。

気持ち的には、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しまう。

5極管の基本回路

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。



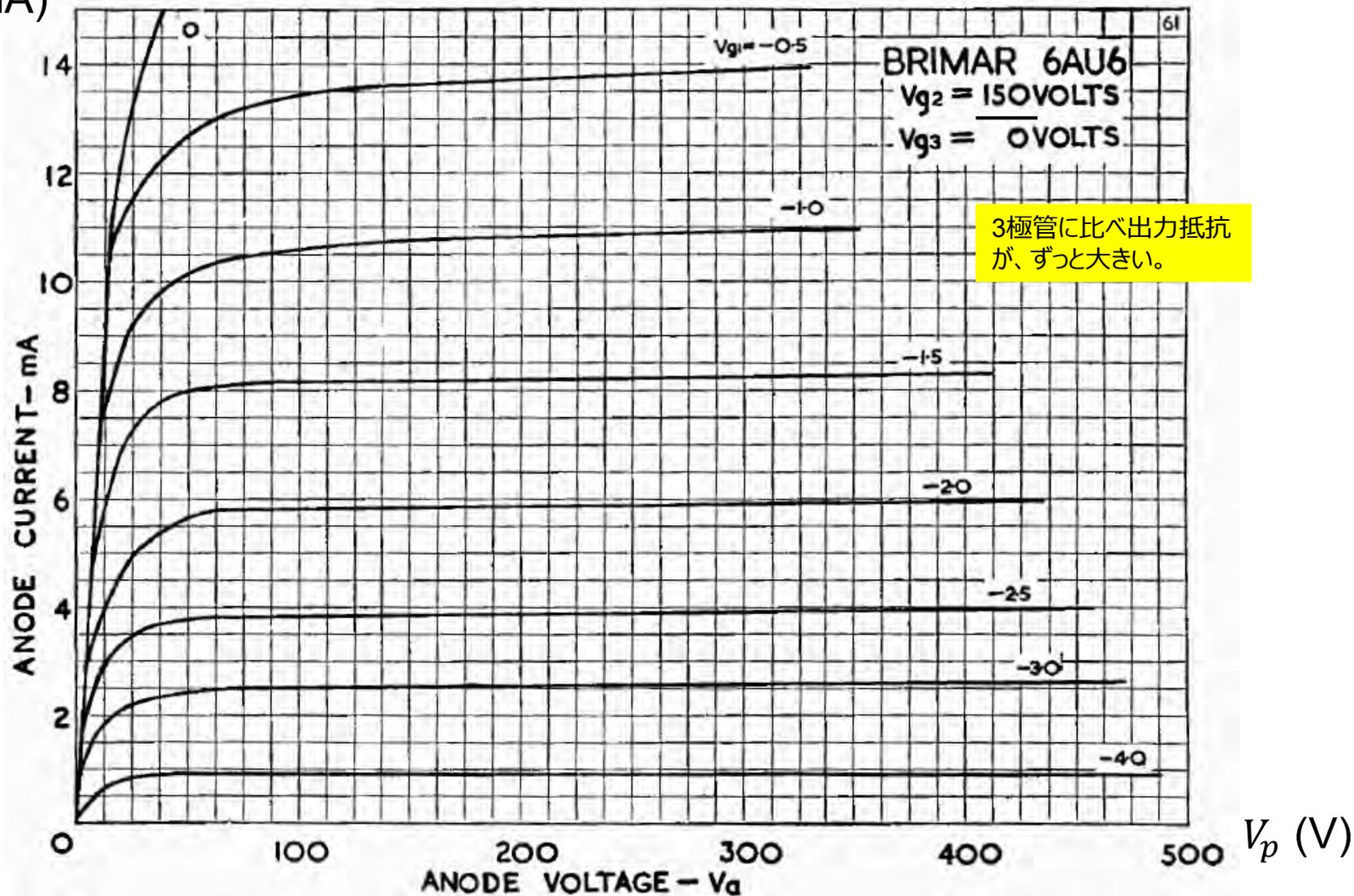
遮蔽グリッドは元々、制御グリッドとプレートとの間の寄生容量を遮断して、高周波特性を良くする目的で考案された。ついでに、プラスの電位を与えることで電子流を増大させる用途にもちいられるようになった。この効果により、プレート電位を変えても、プレート電流があまり変わらなくなった。

IV特性を調べるときは、OUTPUT抵抗を外し、プレート電流でプレート電圧が変化しないようにする。その代りB電源自体を可変として、プレート電流依存を測定する。

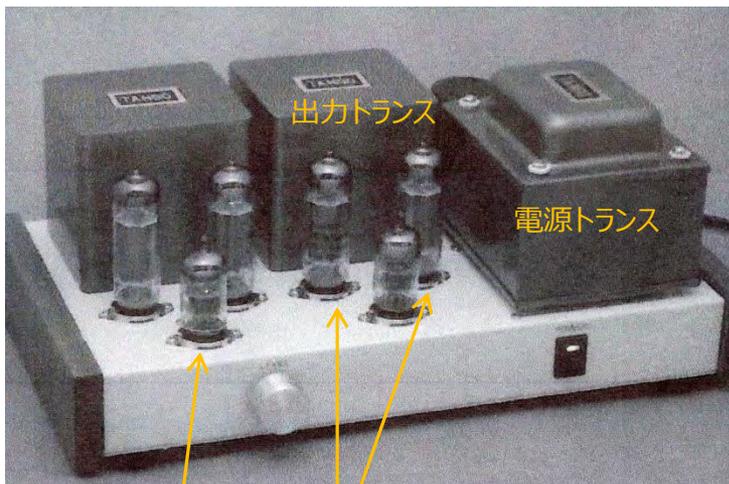
5極管のIV特性

6AU6

I_p (mA)

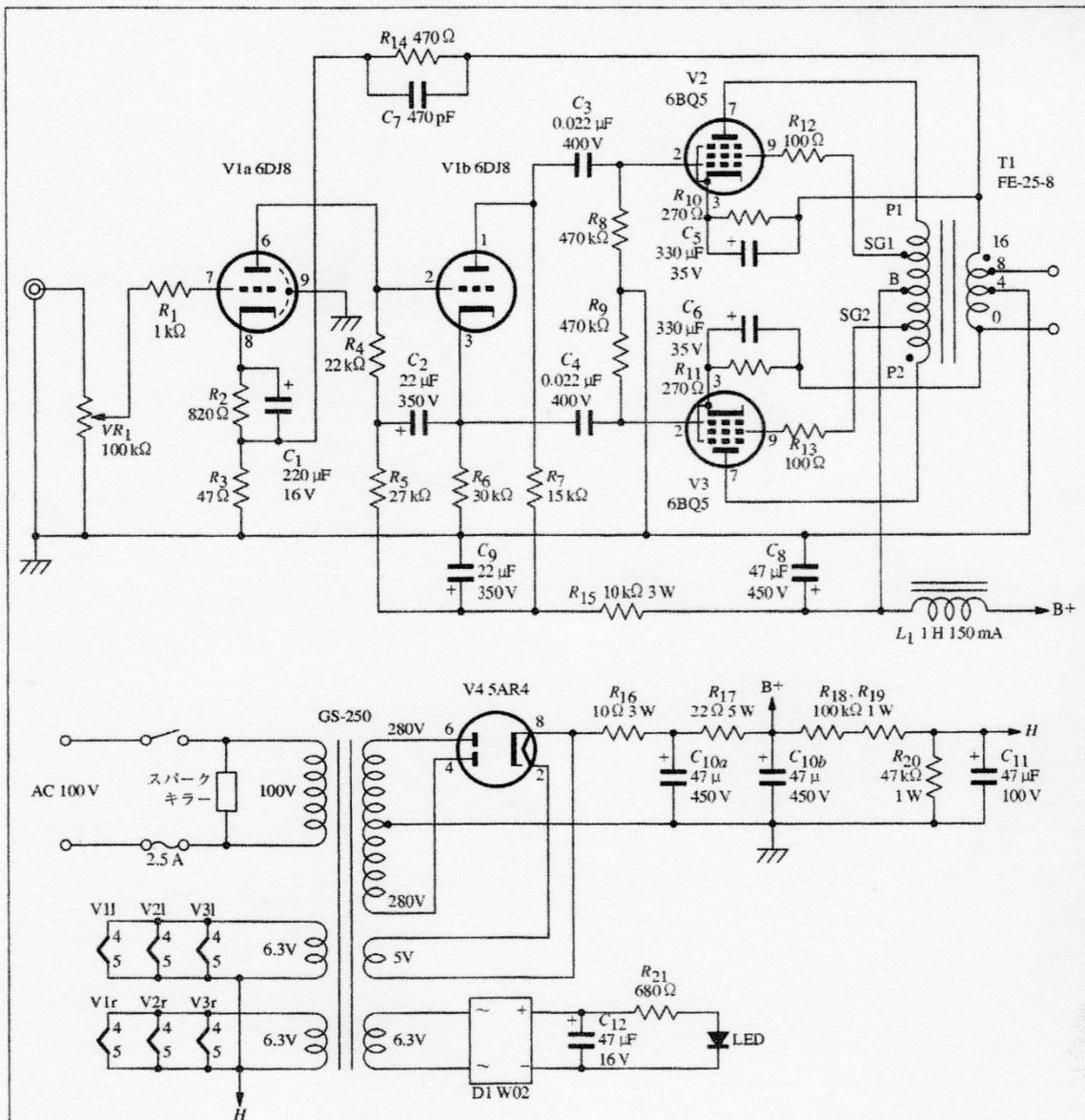


オーディオ用真空管アンプ回路図

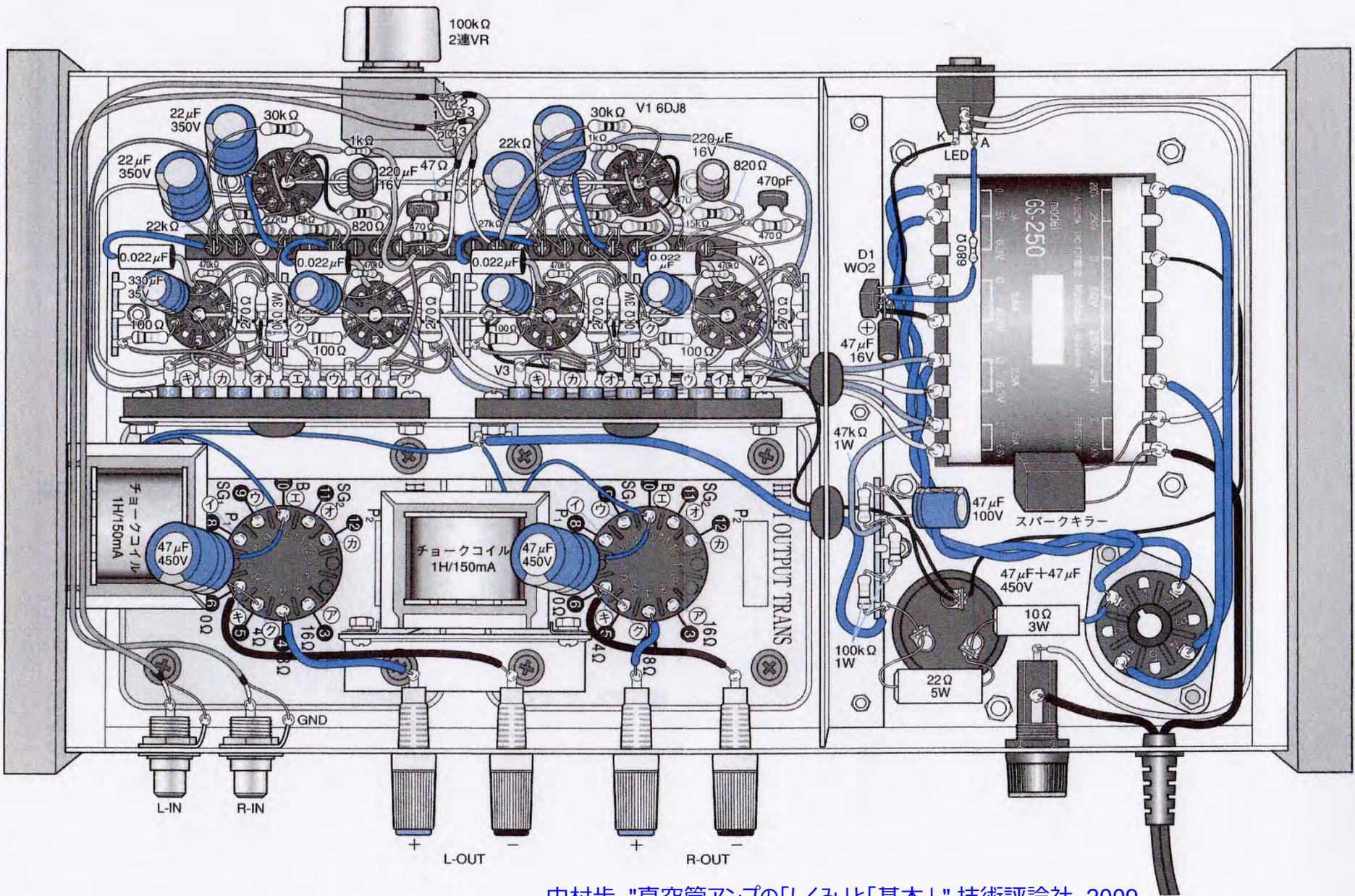


双3極管 6DJ8
 プッシュプル5極管 6BQ5

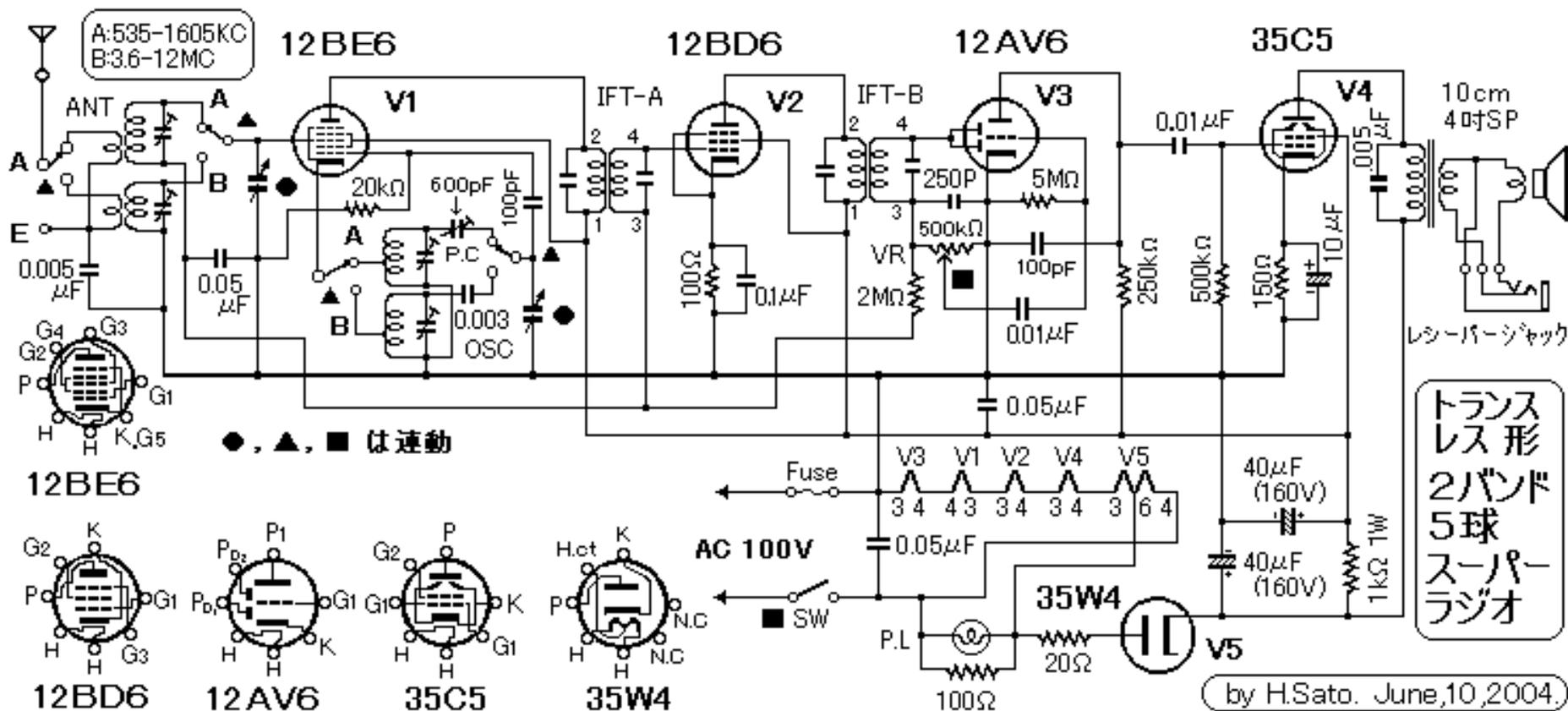
トランスの大きさを感じて欲しい。しかも重い。銅と鉄の塊なのである。音質に与えるトランスの影響は大きい。このアンプでは初段の3極管が直結されているが、真空管の時代には稀な構成であった。



オーディオ用真空管アンプ実体図



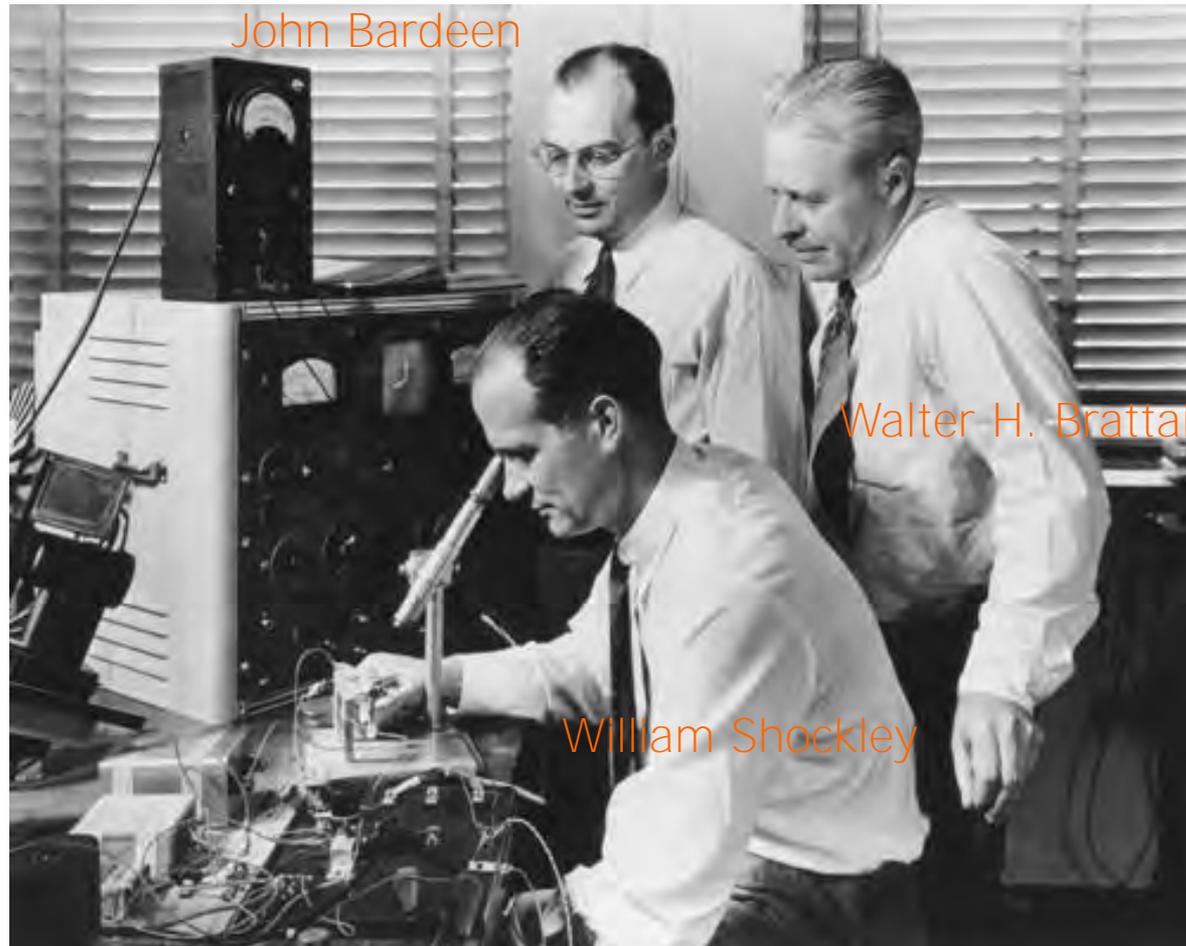
5級スーパーラジオ回路図



高価で重い電源トランスを省くため、真空管のヒーターを直列にする構成が、低価格ラジオの主流になった。(昭和28年頃から盛んに生産された)

そのためシャーシアースだと感電する危険がある。(フローティングアースなら、地面から絶縁されているので感電しない。)

<http://ja7bal.la.cocan.jp/5super.htm>



John Bardeen

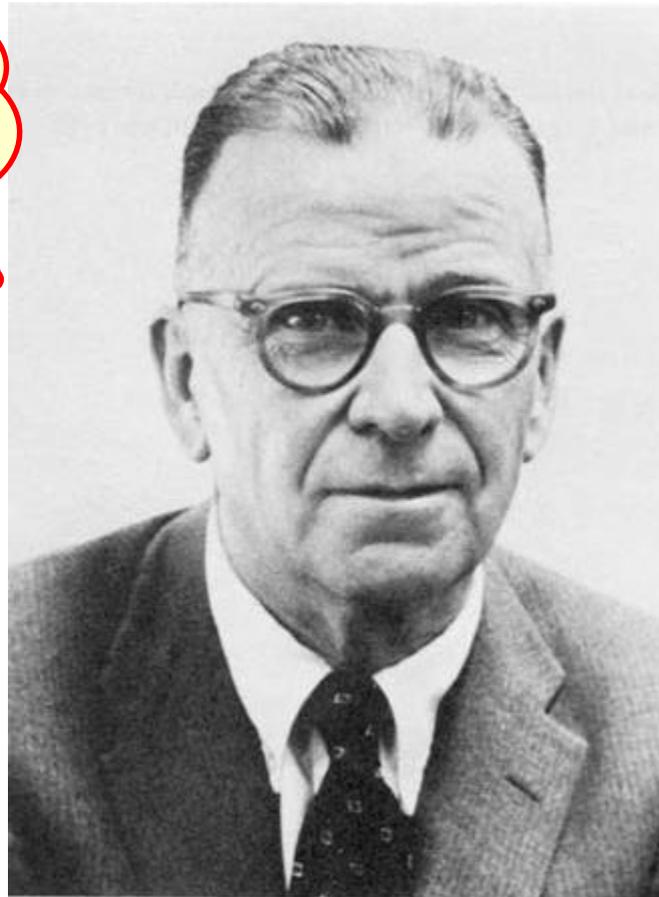
Walter H. Brattain

William Shockley

<http://www.computerhistory.org/collections/accession/102618866>

トランジスタの祖父

10年間成果の出
ないShockleyを
支え続けた。

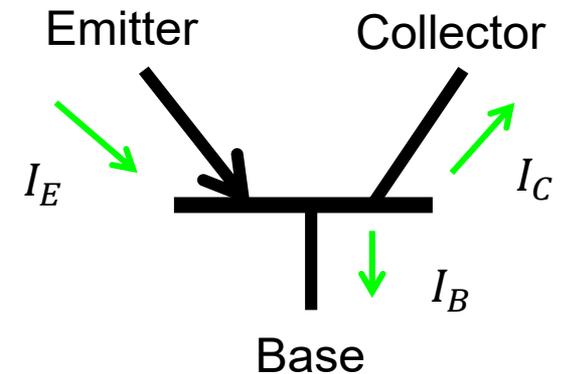


Mervin Joe Kelly (1894-1971)

<http://books.nap.edu/html/biomems/mkelly.pdf>

最初のトランジスタ

1947年12月23日に発明された最初のトランジスタ（複製品）

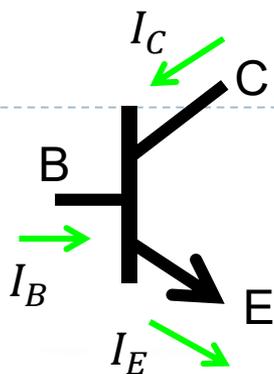


I_B の β 倍が I_C になるという
電流増幅素子である。

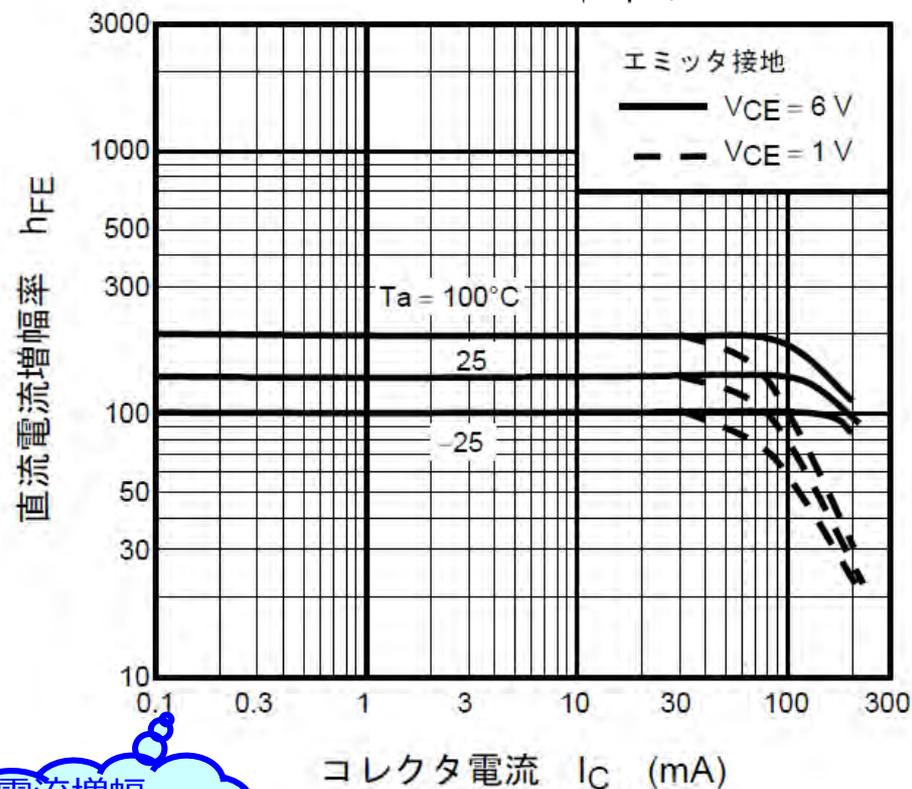
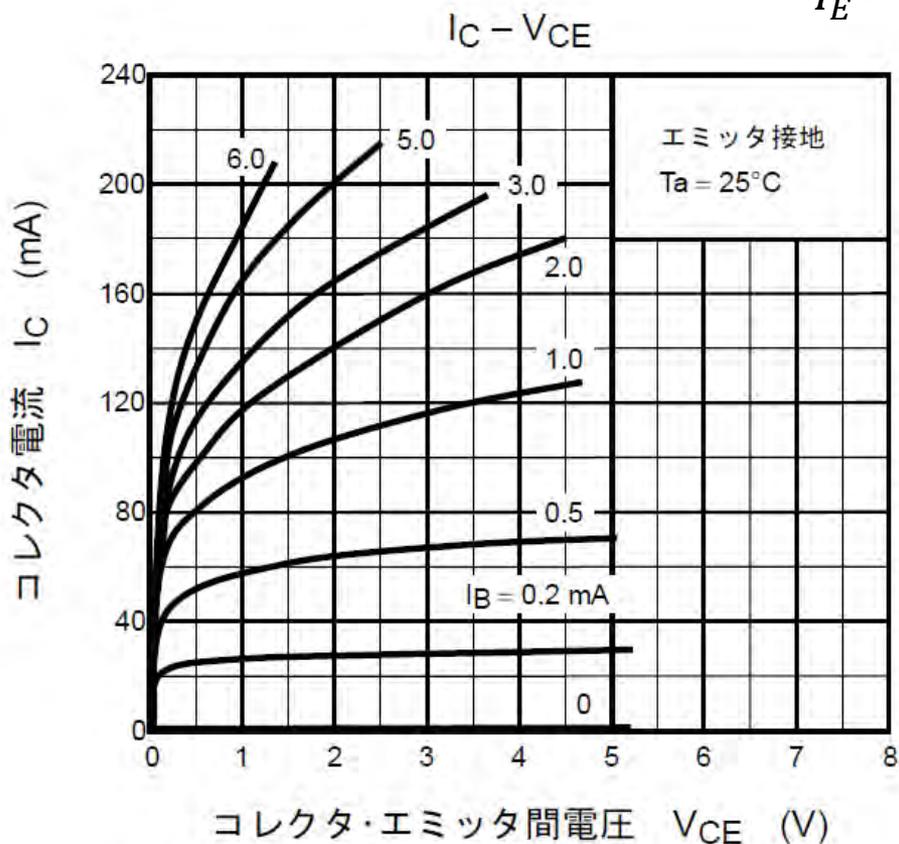
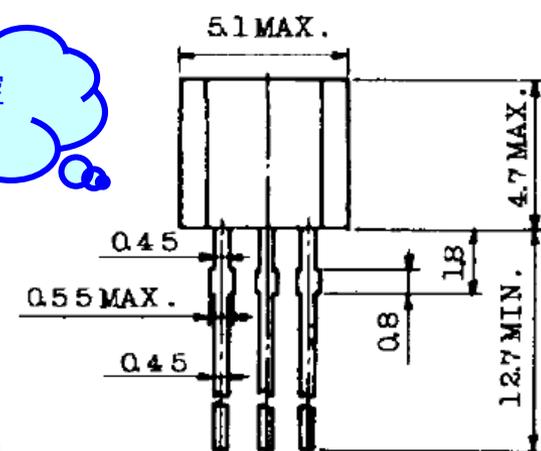
<https://clintonwhitehouse4.archives.gov/Initiatives/Millennium/capsule/mayo.html>

NPN Tr.のIV特性

2SC1815



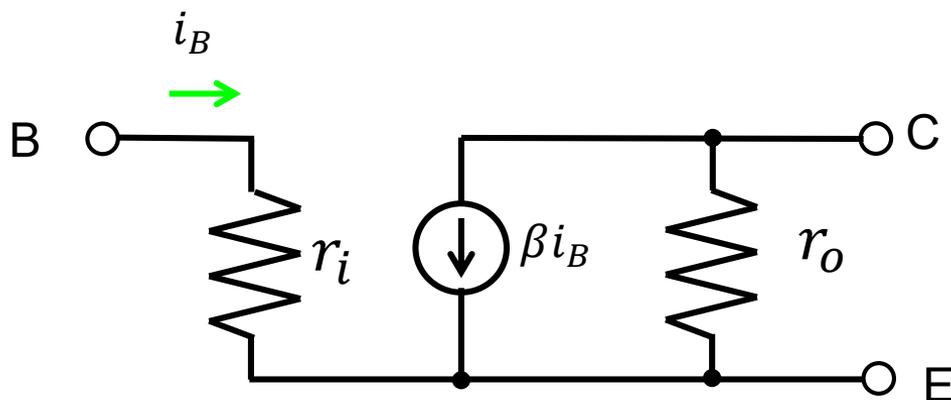
寸法は真空管の1/10



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等価回路

文献により、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。

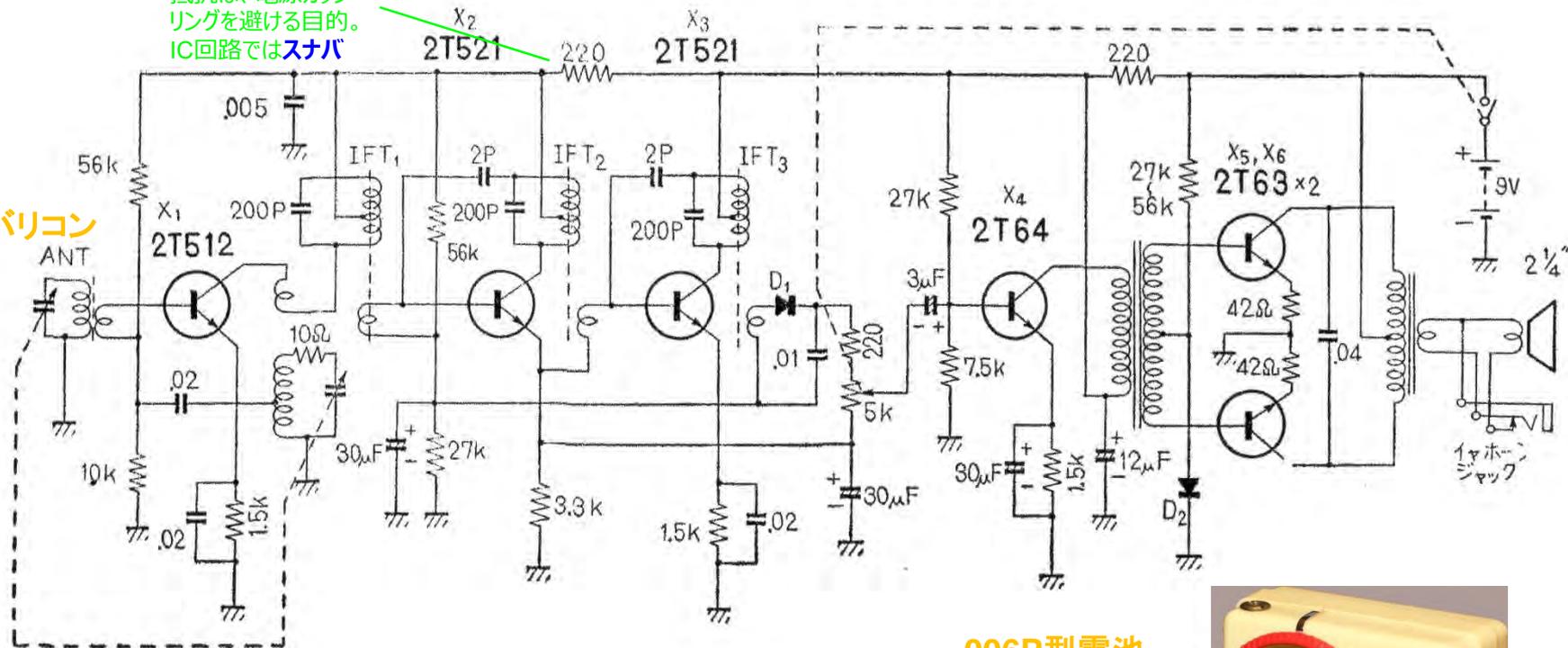
Sony TR-63

6石スーパー(Super Heterodyne方式)

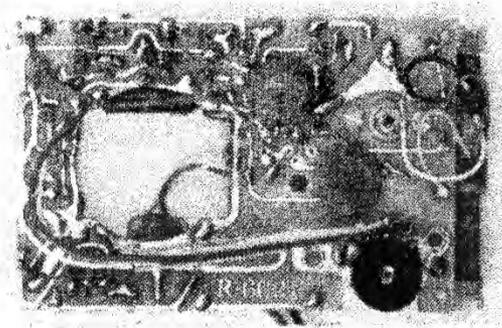
1957年発売

電源に直列に入る
抵抗は、電源カップ
リングを避ける目的。
IC回路ではスナバ

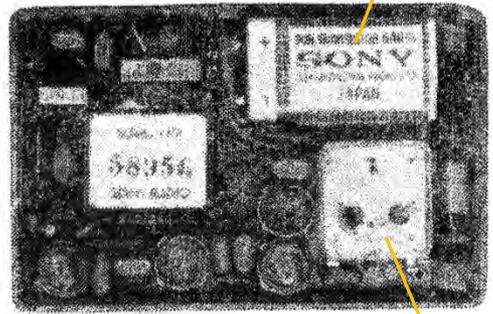
ポリバリコン



プリント基板と配線



部品マウント図



外観写真

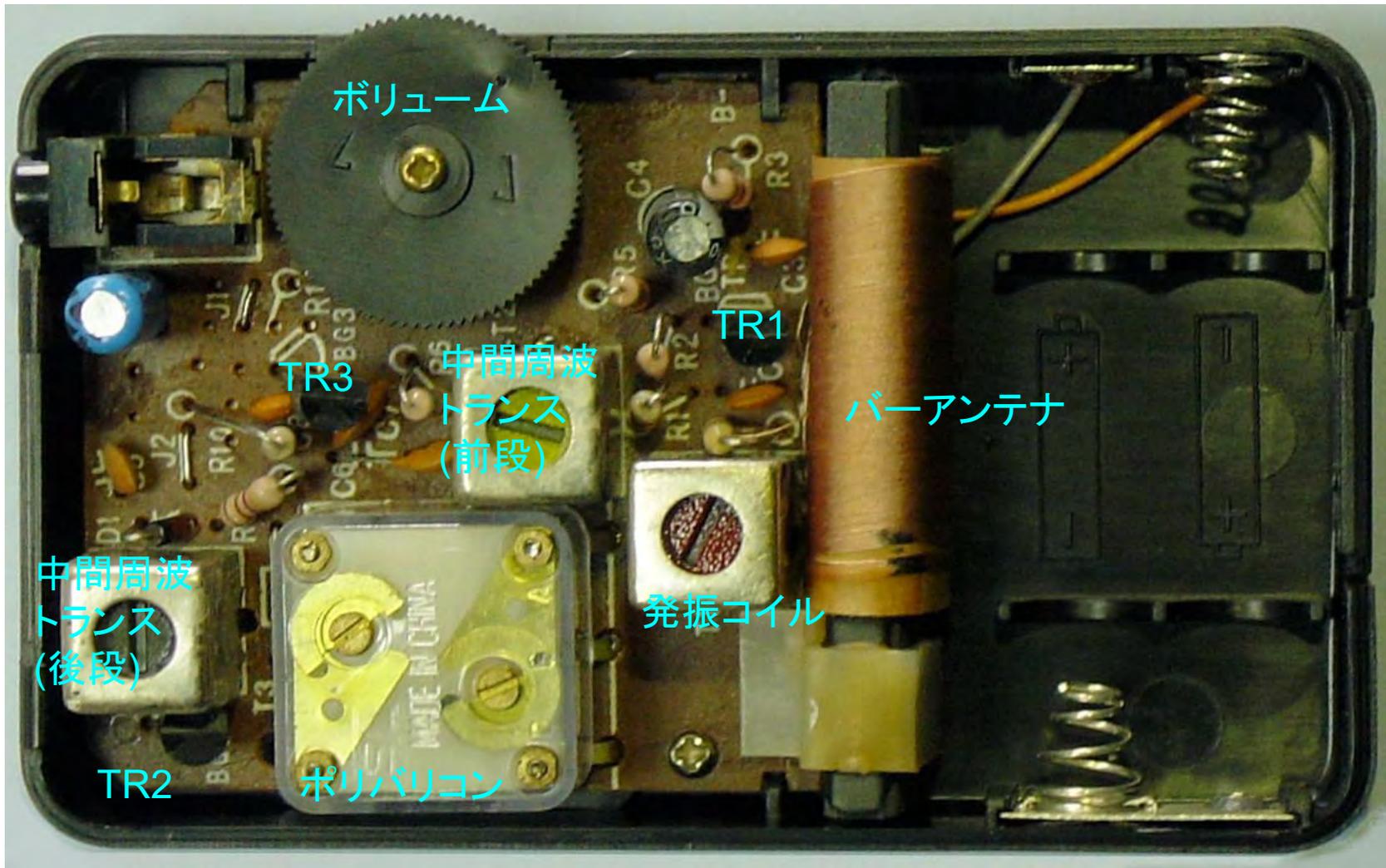


006P型電池

ポリバリコン

ダイソー100円AMラジオ

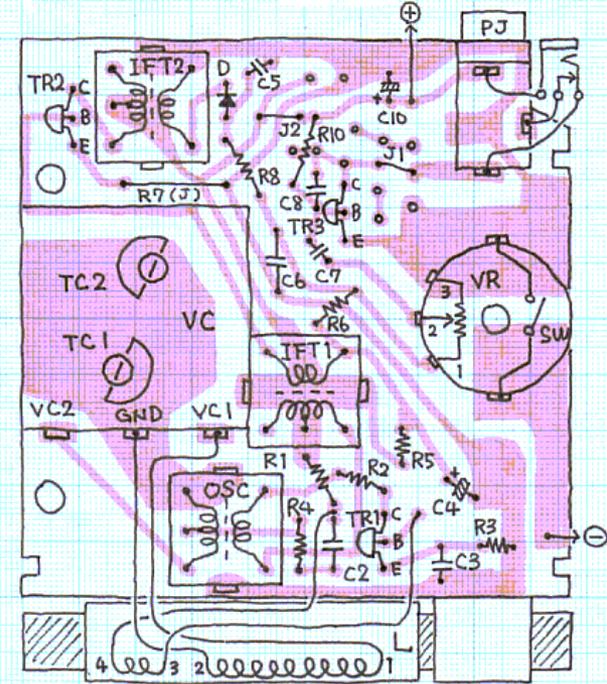
2000年頃?



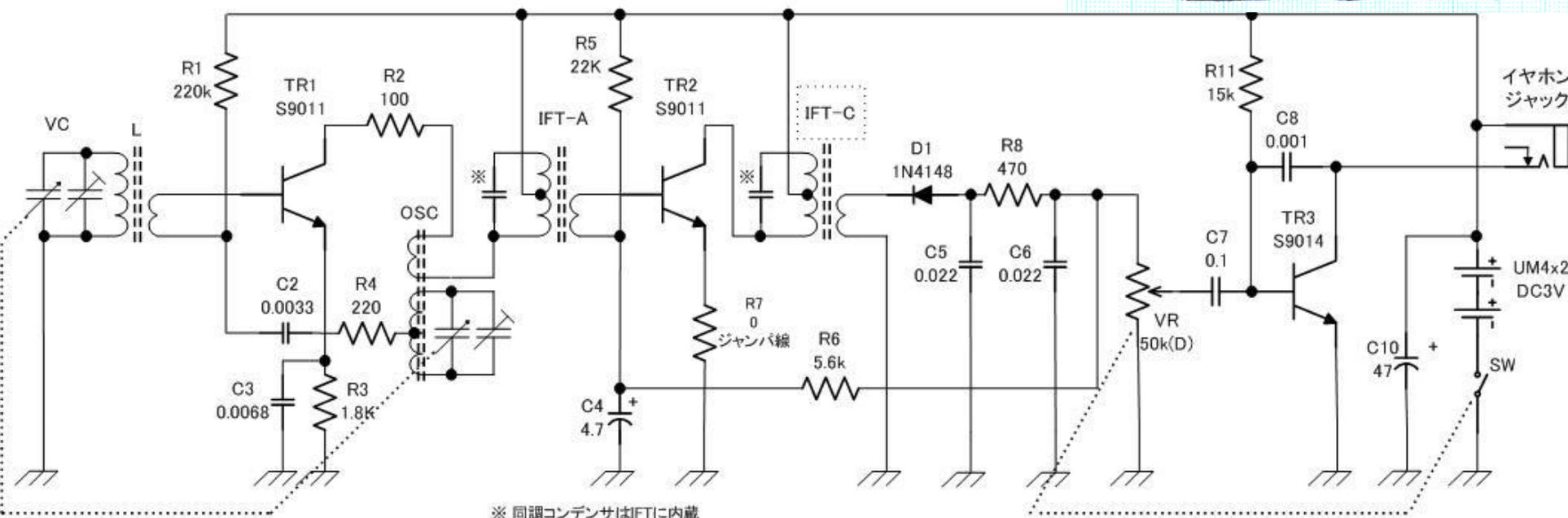
100円ラジオ回路図と実体図

<http://bbradio.sakura.ne.jp/100am/100am.html>

標準的な3石スーパーである。無駄がない。
 設計もレイアウトも素晴らしい。かなりの技術力である。
 TR-63からの進化を感じる。しかし製造は雑である。

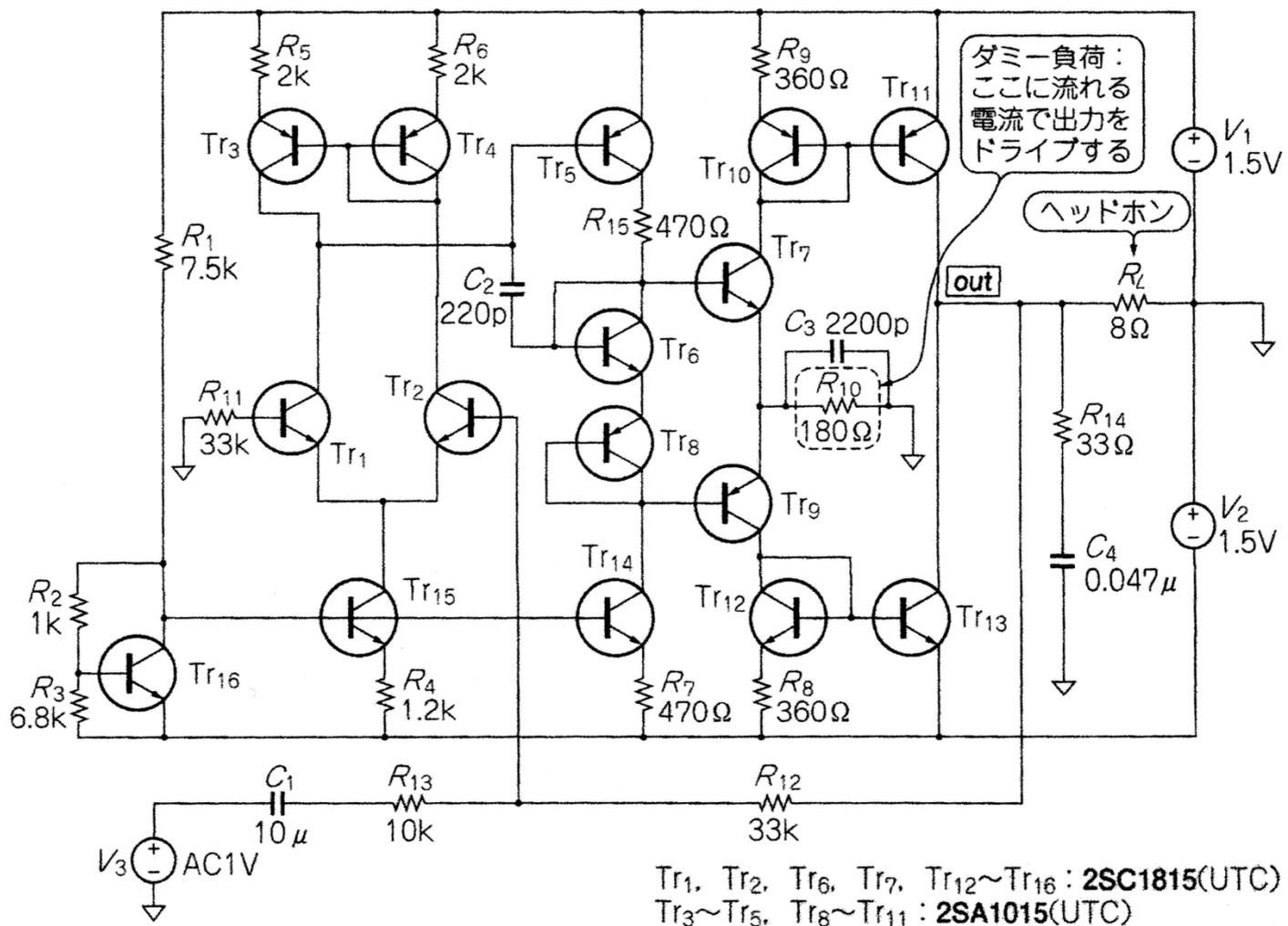


ダイソー100円ラジオ回路図



※ 同調コンデンサはIFTに内蔵

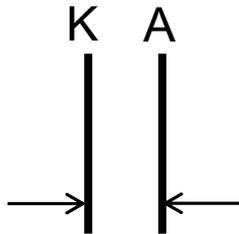
スピーカーも鳴らせるヘッドフォンアンプ



加藤 大, トランジスタ技術 2018年10月号 図12

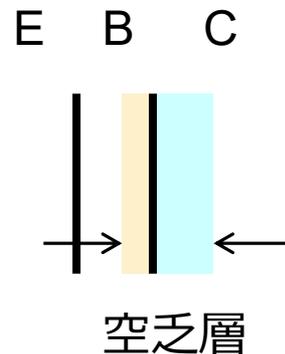
真空管は300V, トランジスタは9V

真空管



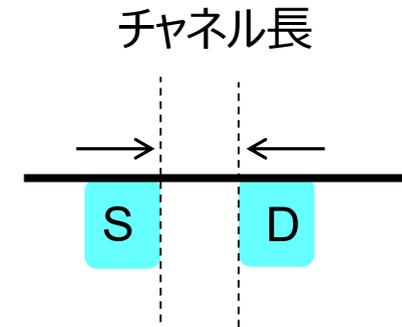
$$E = \frac{300 \text{ V}}{3 \text{ mm}} = 100 \text{ kV/m}$$

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。

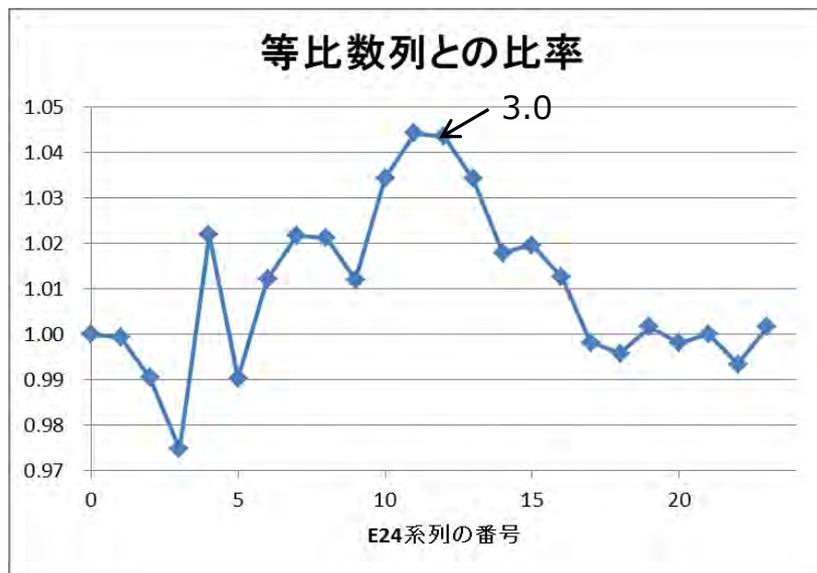
参考文献

- ▶ 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.
- ▶ 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.

E系列について

E3系列	E6系列	E12系列	E24系列
1.0	1.0	1.0	1.0
			1.1
		1.2	1.2
			1.3
	1.5	1.5	1.5
			1.6
		1.8	1.8
			2.0
2.2	2.2	2.2	2.2
			2.4
		2.7	2.7
			3.0
	3.3	3.3	3.3
			3.6
		3.9	3.9
			4.3
4.7	4.7	4.7	4.7
			5.1
		5.6	5.6
			6.2
	6.8	6.8	6.8
			7.5
		8.2	8.2
			9.1

抵抗やコンデンサの値は、E系列が定められる(1948年以)前は、500Ωとか25Ωとかの切りの良い値が用いられていた。製造バラツキは比率で発生するため、これでは歩留まりが低下する。そこで等比数列で規格化するのが合理的であるが、既に用いられていた5%、10%、20%の規格とも整合させるため、 $r=10^{(1/24)} \approx 1.10$ であるE24系列等が考案された。ただし正確な比率からはズレがある。



このずれの理由は知られていないが、私の想像では、1, 2, 3を規格に入れたかったのではないかと思います。ならば4や5も入れれば良いではないかと思います。特に50ΩピッタリがE系列にないことが、終端抵抗値にこだわる人たちには気持ちが悪いようだ。

カラーコード

色	数値	許容差(%)
黒	0	
茶	1	±1
赤	2	±2
橙	3	
黄	4	
緑	5	
青	6	
紫	7	
灰	8	
白	9	
金	-	±5
銀	-	±10
無着色	-	±20

下は1970年頃に『ラジオの製作』という雑誌のおまけについていた抵抗のカラーコード表。長年愛用しているが、経年変化が激しいなあ。

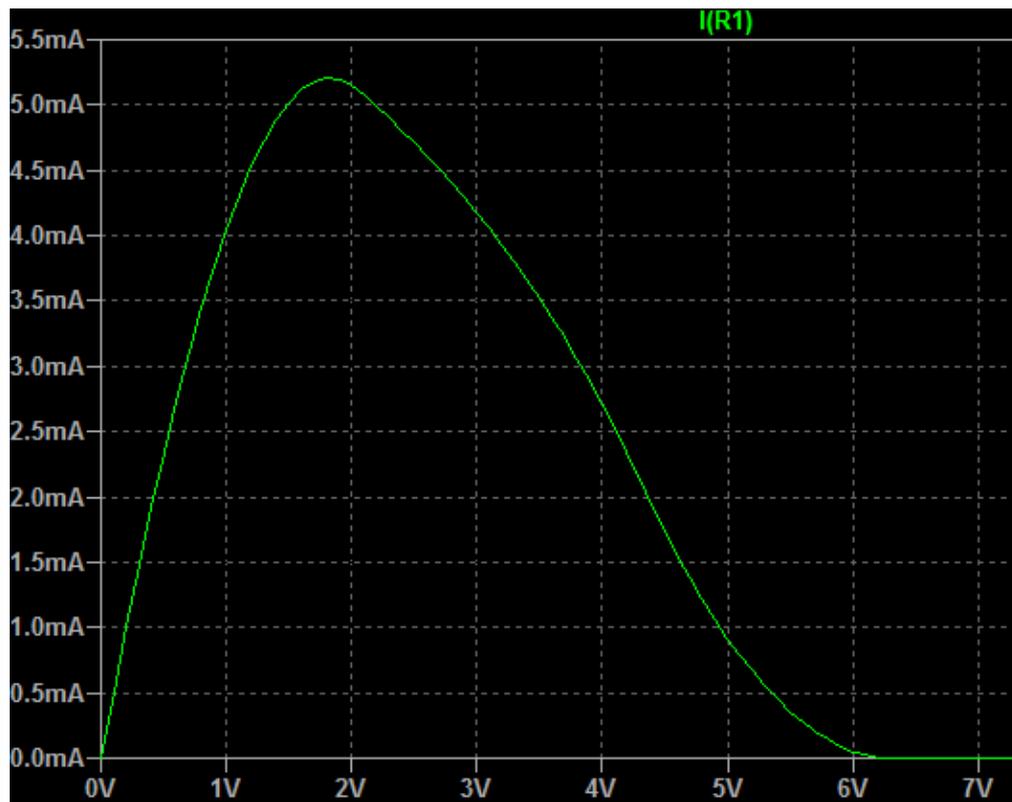
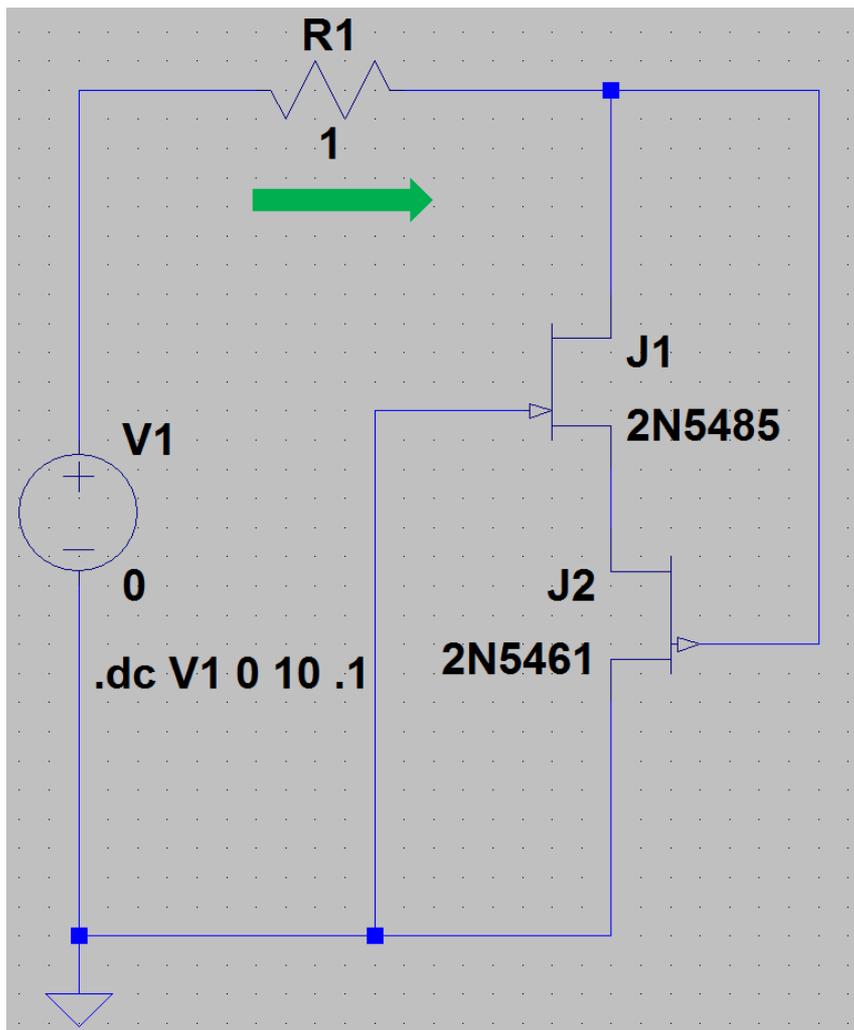


コンデンサはuFかpFで表記され、nFは用いないことが多い。
基板回路図に10nFと書いてベテランエンジニアからあきれられる、なんて時代もあった。
この場合、部品の値としては、いまでも大抵0.01uFと表記されるのである。
ただし現在ではnFという単位を表記に使うことに、殆ど抵抗がなくなっている。
CADツールに至っては0.01uと入れても、10nと書き直してしまうものがあるくらいである。

コンデンサで、なぜnFが伝統的には使われて来なかったかについて、定説はなさそうである。
が、もっとも確からしいのは、uと言う接頭辞はかなり昔から使われていたが、nやpはまだ規定されていなかった。一方コンデンサの値としてはそれよりずっと小さい数値の部品が必要になり、ベンダーがuuFという表記を使い始めていたという説である。のちにpFという表記が制定されるたが、それまでの数値を変えると分かり難いので、1000uuFと書いていた部品が1000pFと表記されるようになったというのである。

Lambda Diode

Depletion MOSを下記のように接続すると、IV特性に負性抵抗領域が現れる。
その形がギリシャ文字の λ に似ていることからLambda Diodeと呼ばれる。



負性抵抗領域