

集積電子回路
2020年11月24日

電気電子工学特別講義Ⅱ 回路の回り道 ～基本回路

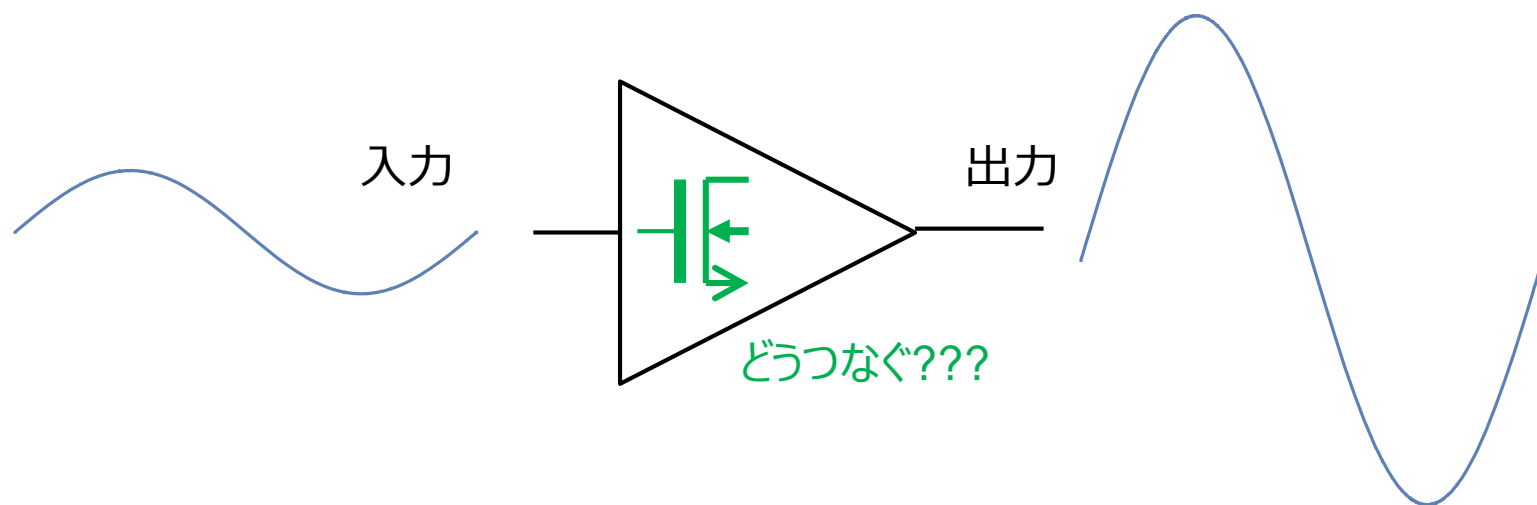
ザインエレクトロニクス株式会社
源代 裕治
yuji.gendai@gunma-u.ac.jp

第1章 動作点の設定

信号がないときの回路の状態

増幅器

回路動作の目的の一つは、微弱な信号を拡大することにある。

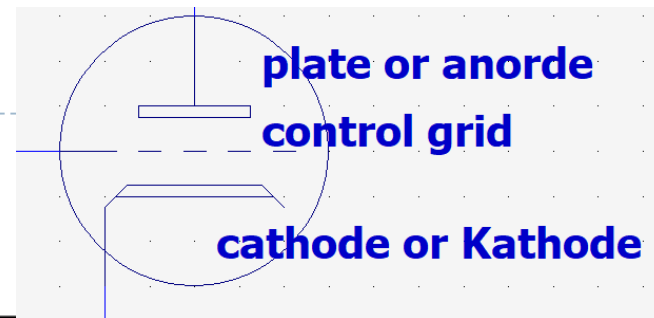


基本的な能動素子はしかし、入力信号を入れれば出力信号が拡大されて出て来る、という動作はしない。各端子に適切な電位差を与えておくことで、そこからの差分として所望の動作をする。その基本となる状態設定を**動作点**と言う。

(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はある。)

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。

動作点の選択(3極管の例)

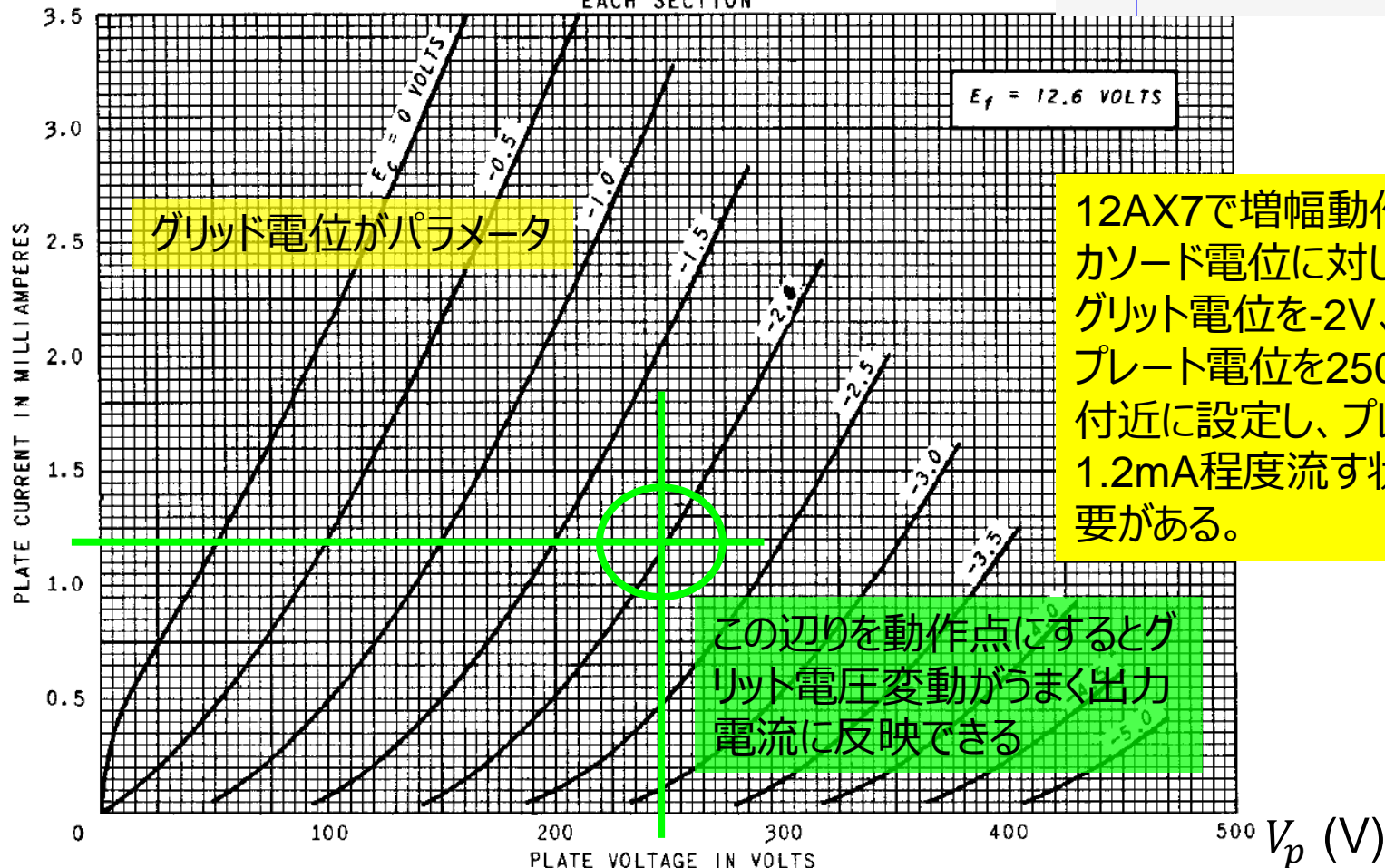


12AX7のIV特性

I_p (mA)

AVERAGE PLATE CHARACTERISTICS

EACH SECTION



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必要がある。

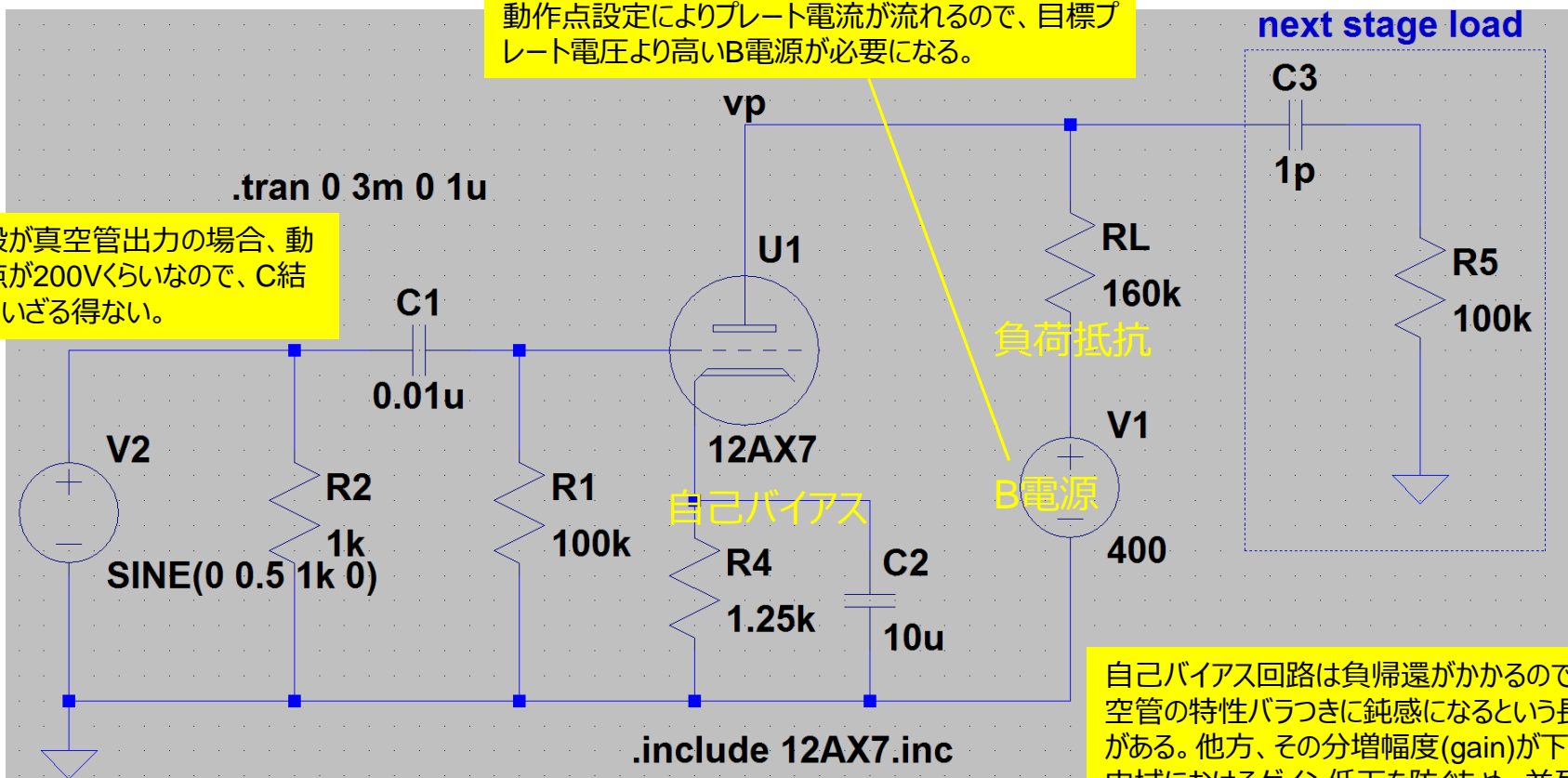
真空管の動作点設定と負荷抵抗

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。



負荷抵抗

自己バイアス

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。

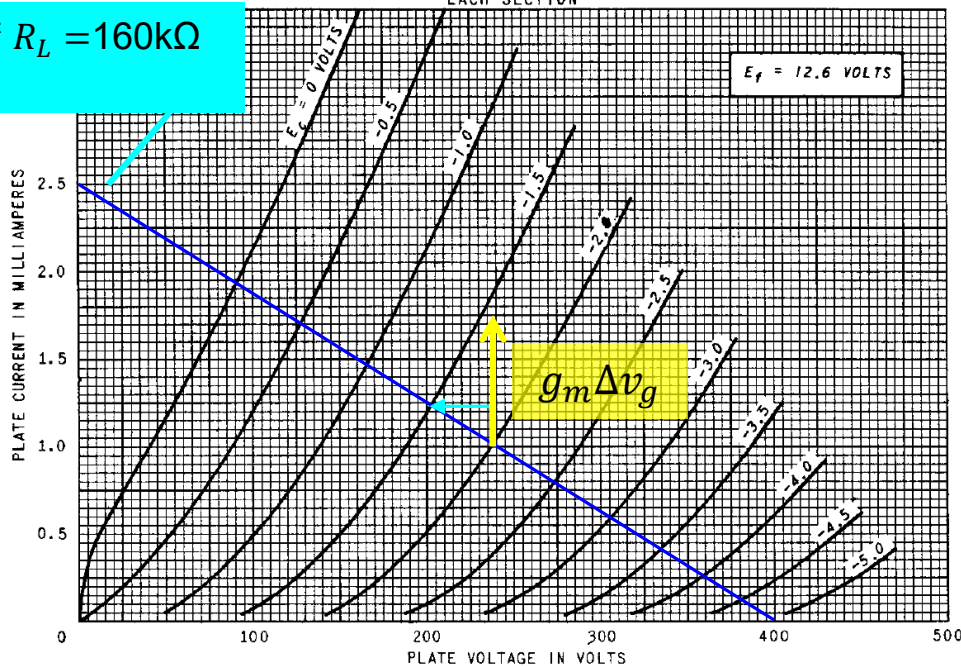
負荷直線

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

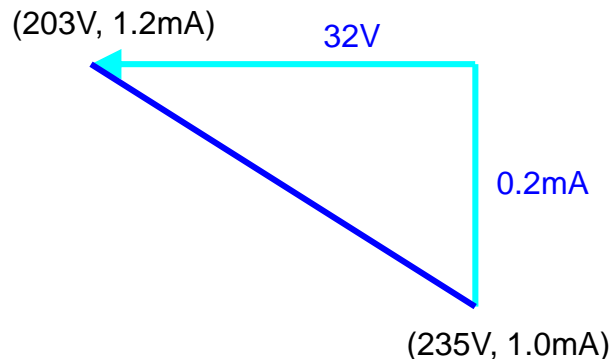
EACH SECTION

$E_f = 12.6 \text{ VOLTS}$



電源が400Vで $R_L = 160 \text{ k}\Omega$ の負荷直線

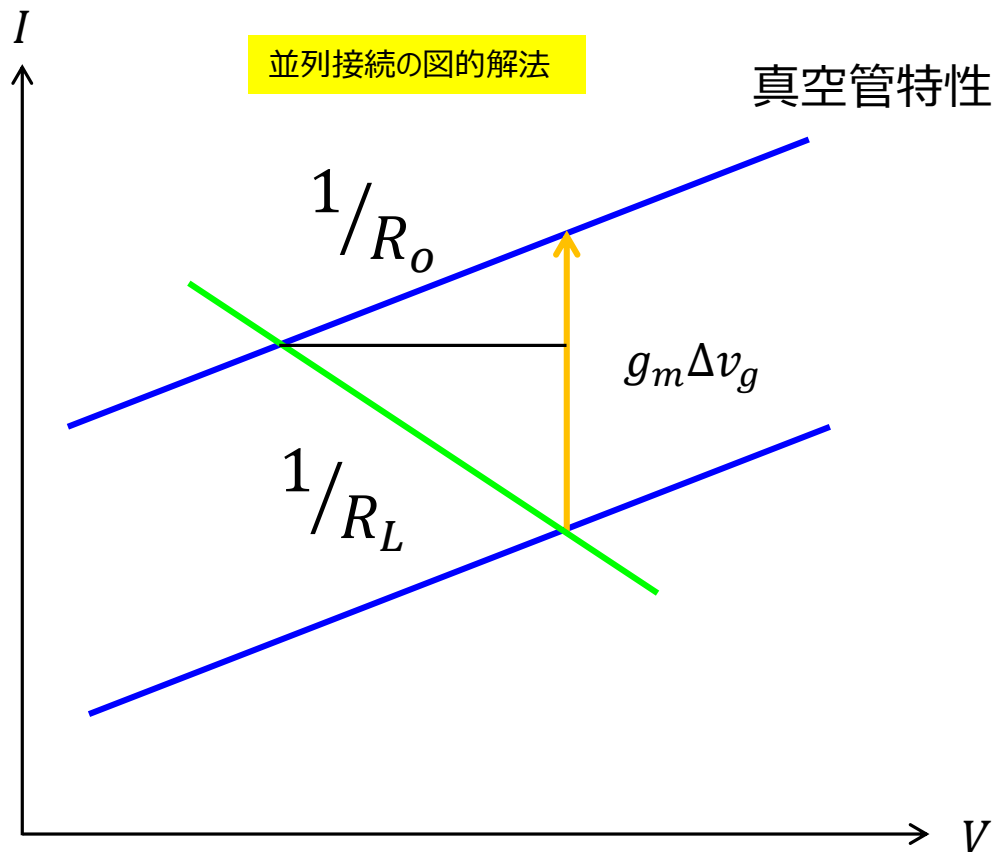
V_G が -2 V から -1.5 V に変化している部分を拡大すると



この場合、入力の 0.5 V の電圧増が 32 V 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。

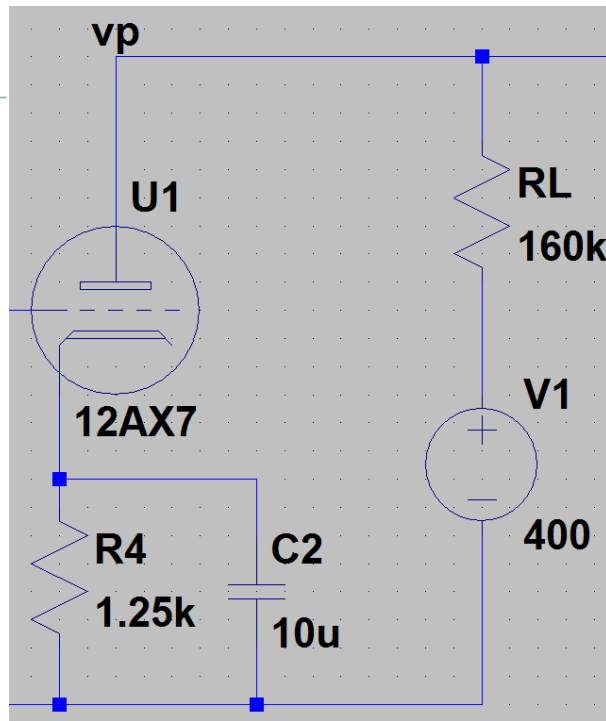
図から本来、 $g_m = \frac{\Delta I_p}{\Delta v_g} = \frac{0.9 \text{ mA}}{0.5 \text{ V}} = 1.8 \text{ mS}$ がそのまま見れば 0.9 mA 変わる筈のプレート電流が、 0.2 mA しか変化していない様子が観察される。

増幅度の図的考察

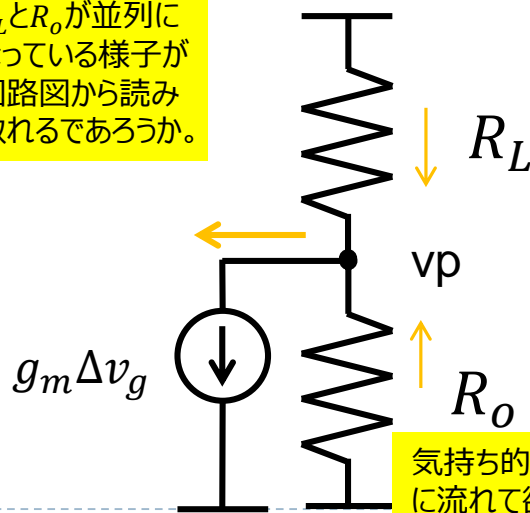


増幅度を上げるため R_L を大きくしたいが、そうするとプレート電位が下がってしまい、出力振幅が取れなくなる。また、出力は R_L と次段の入力インピーダンスの並列接続なので、 R_L を大きくしても段々効かなくなってくる。

1段当たりの増幅度はざっくり100倍程度が限界であろう。



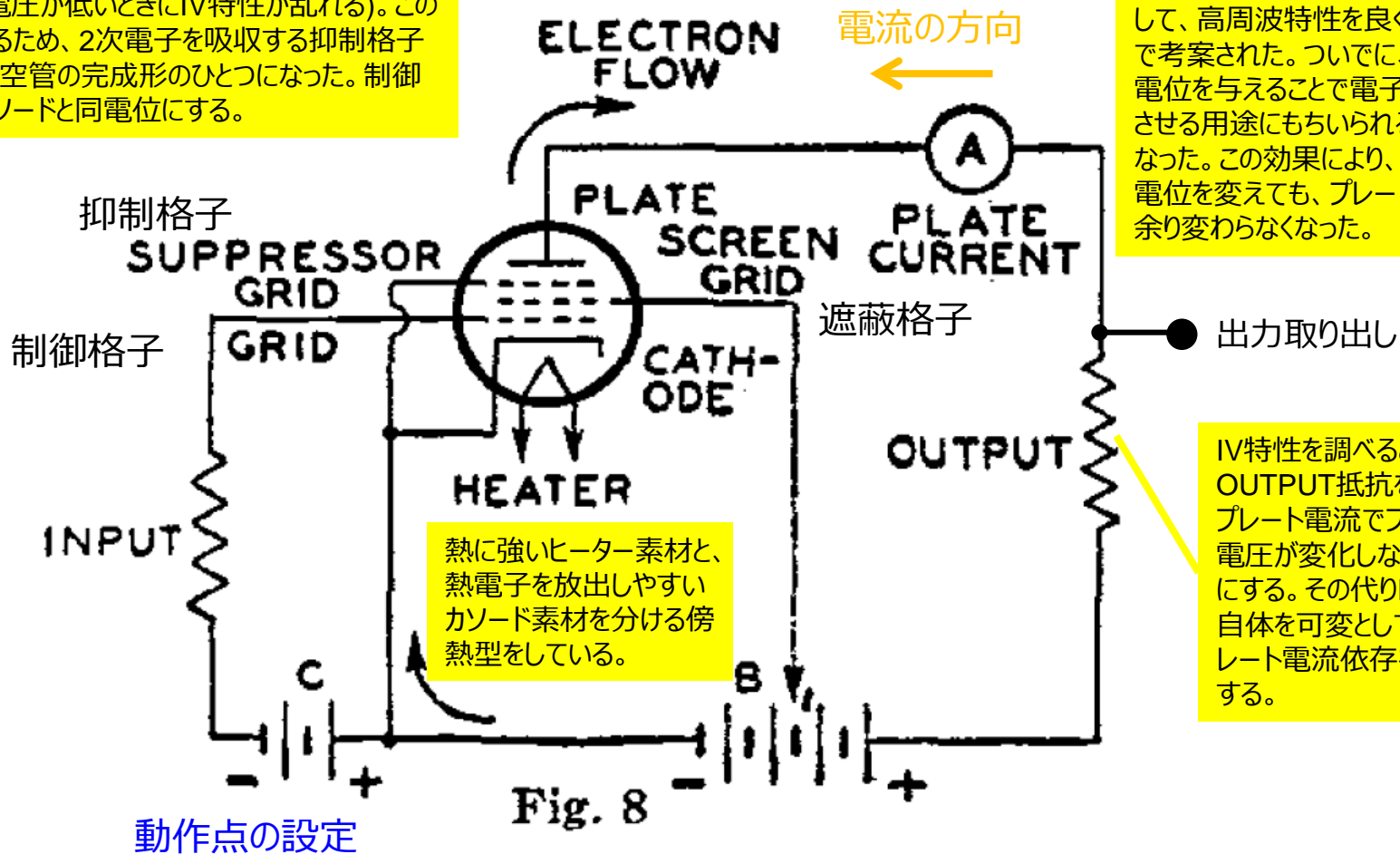
R_L と R_o が並列になっている様子が回路図から読み取れるであろうか。



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しまう。

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。



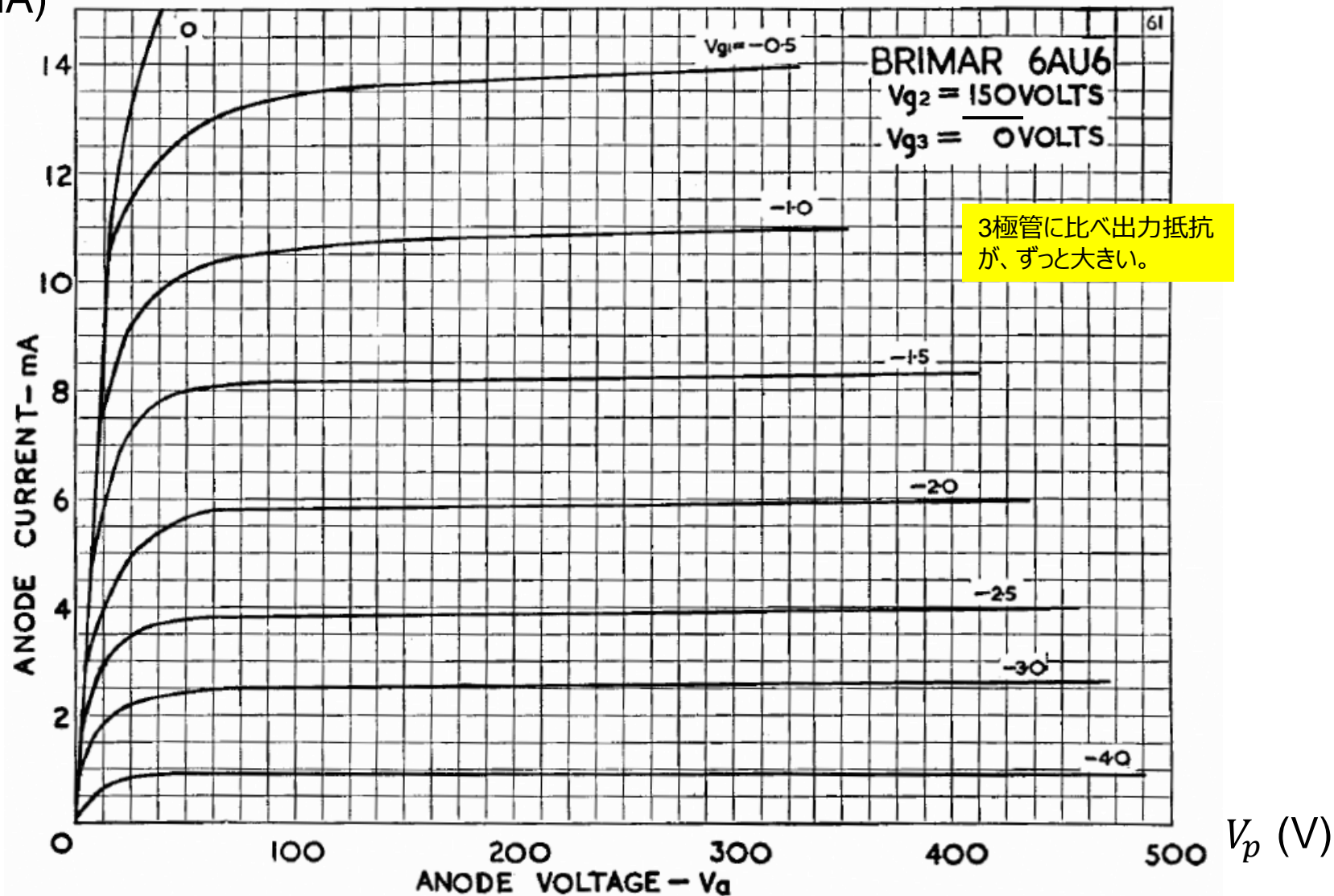
遮蔽グリッドは元々、制御グリッドとプレートとの間の寄生容量を遮断して、高周波特性を良くする目的で考案された。ついでに、プラスの電位を与えることで電子流を増大させる用途にもちいられるようになった。この効果により、プレート電位を変えても、プレート電流が余り変わらなくなった。

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。

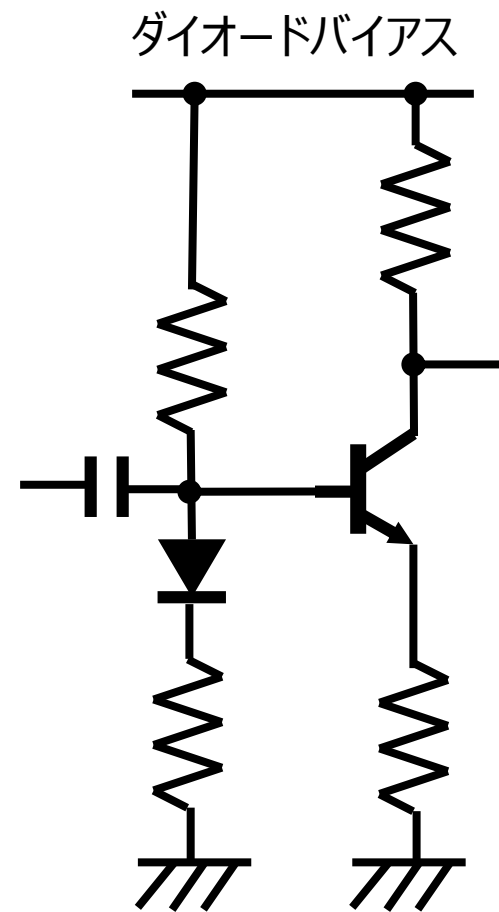
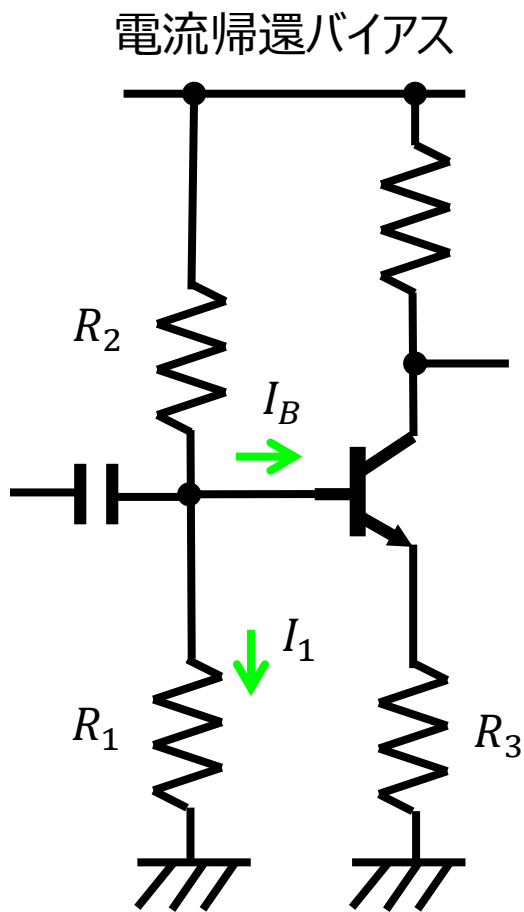
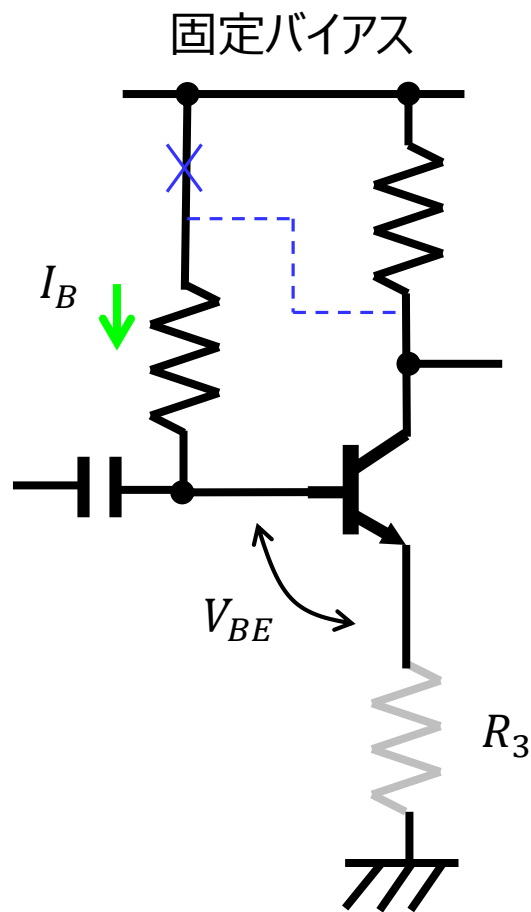
5極管のIV特性

6AU6

I_p (mA)



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

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

第2章 基本回路



カレントミラーの登場

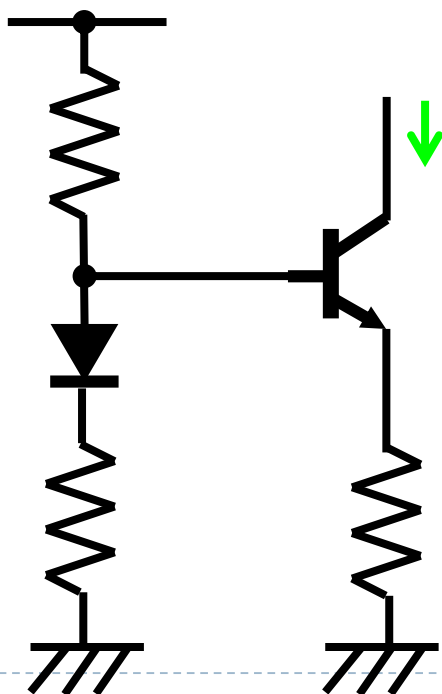
発明者不詳。古典的論文としては

Widlar, "Some Circuit Design Techniques for Linear Integrated Circuits," IEEE Tran. on Circuit Theory, Vol. CT-12, No. 4, pp. 586-590, December 1965

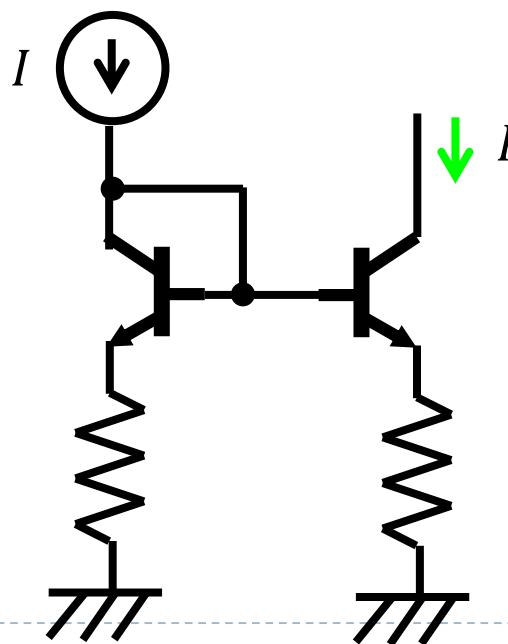
IC時代になってCやLがTrより相対的に高価になることで、段間を直結することが経済的に合理的になった。その一方で、トランジスタは温特が真空管よりずっと悪く、電流入力素子であることと相まって、動作点の安定には苦労していた。

温特を抑えるために工夫していたダイオードバイアスであるが、TrのCB間ショートがダイオードと同様の特性を持つことと、IC内で同じTrを用いると温度変化に同じ変化をすることで電流比が保たれることが分かってきた。カレントミラーの登場である。

ダイオードバイアス回路

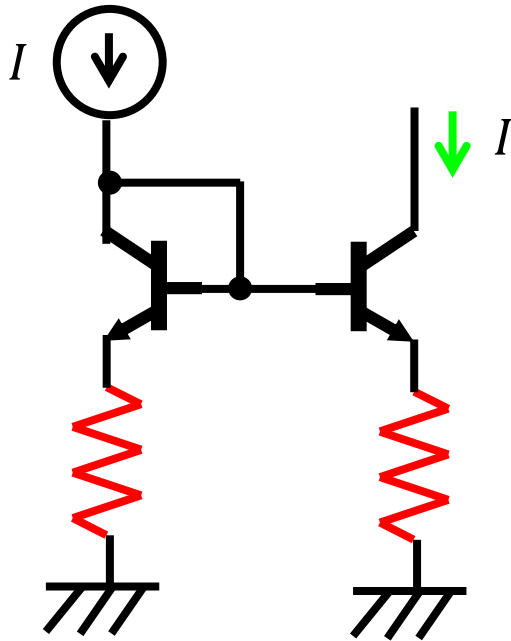


カレントミラー回路

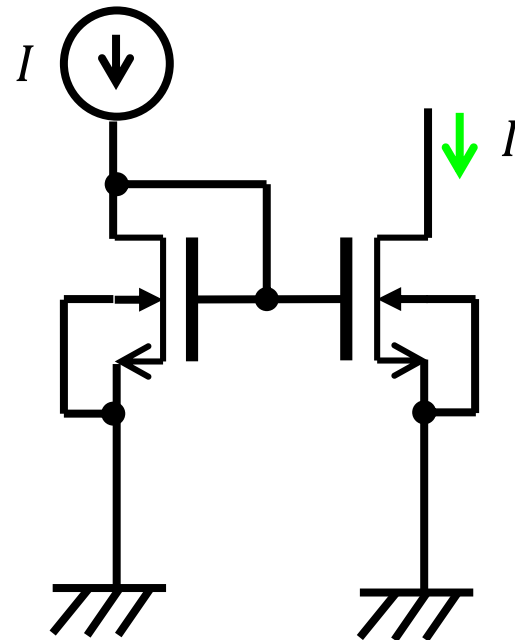


カレントミラー回路のBip/MOS比較

Bipolar Current Mirror



MOS Current Mirror

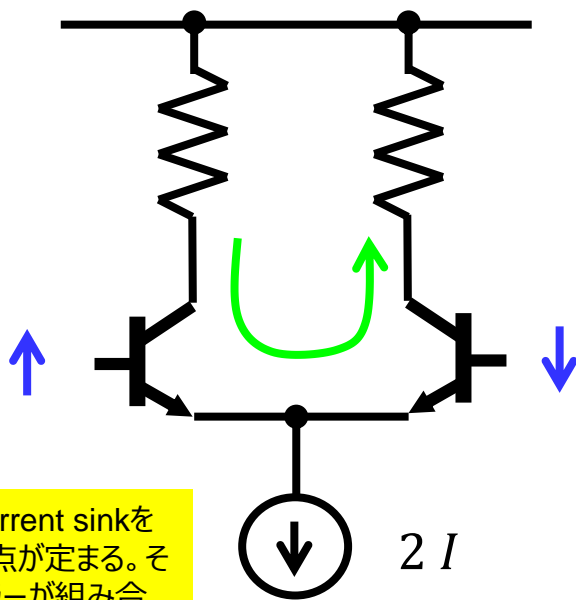


Bipolar ICからMOS ICに代わるときに、カレントソースから抵抗が無くなった。
この変化は形式的には、電流増幅素子から g_m 素子(トランスインピーダンス素子)に変わったことに依るものと解釈できる。ただし現実的には、電流バラツキの観点から説明すべきである。また実際のレイアウトでも、MOSと抵抗の接続がBipより面積を食う感じがする。

差動対の発明

Alan Blumlein GB482740, 1938

差動対は真空管時代から既に知られていたが、広く用いられるまでには至らなかった。回路を差動化すると、コモンモードノイズや電源揺れに強くなり、素子のペア比が取れば絶対バラつきに強くなることなど大きなメリットがある反面、真空管数が2倍必要というコスト増に見合わなかったのである。真空管が、抵抗やコンデンサに比べ、ひときわ高価な部品だったのである。IC時代になって、コスト構造が一変する。素子の値段はざっくり面積比例。Trは抵抗と同等か、それ以下、キャパシタはかなり大きく、インダクタになると内蔵は非現実的になった。差動のメリットが活きてくるようになったのである。



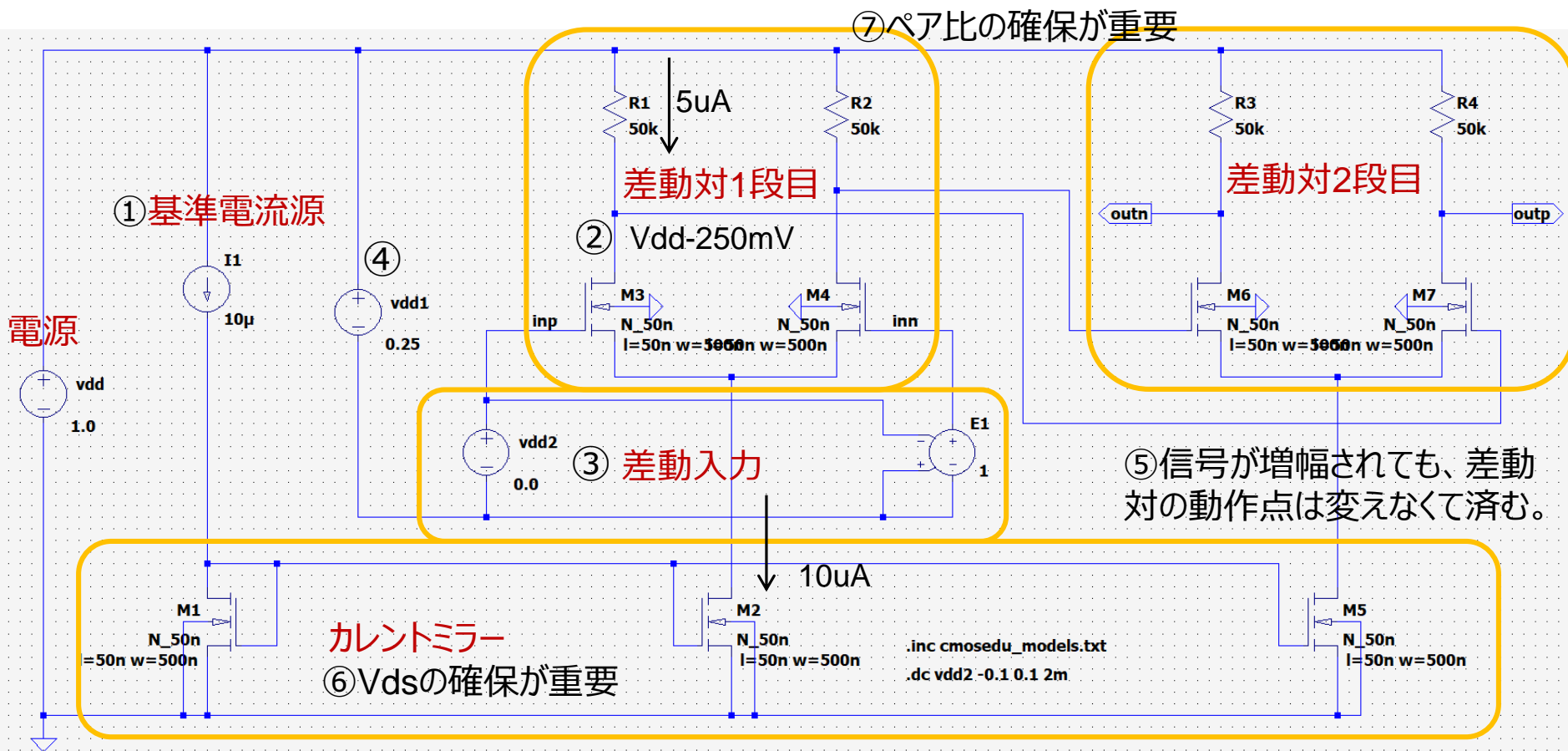
差動対は、current sinkを与えると動作点が定まる。そこにカレントミラーが組み合わされる。

入力が同電位するとき、電流源の電流は等分され、各Trに同じ電流 I が流れる。左の入力が上がり、右の入力が同じだけ下がると、各Trは電流を増減させるが、電流源に流れる電流の総和は変わらないため、左のTrで増えた分は右のTrにそのまま流れることになる。

回路を追うには、電圧を逆流している電流が見えるよう訓練すると良い。

差動対の多段接続

カレントミラーと差動対は抜群の相性を持つ。



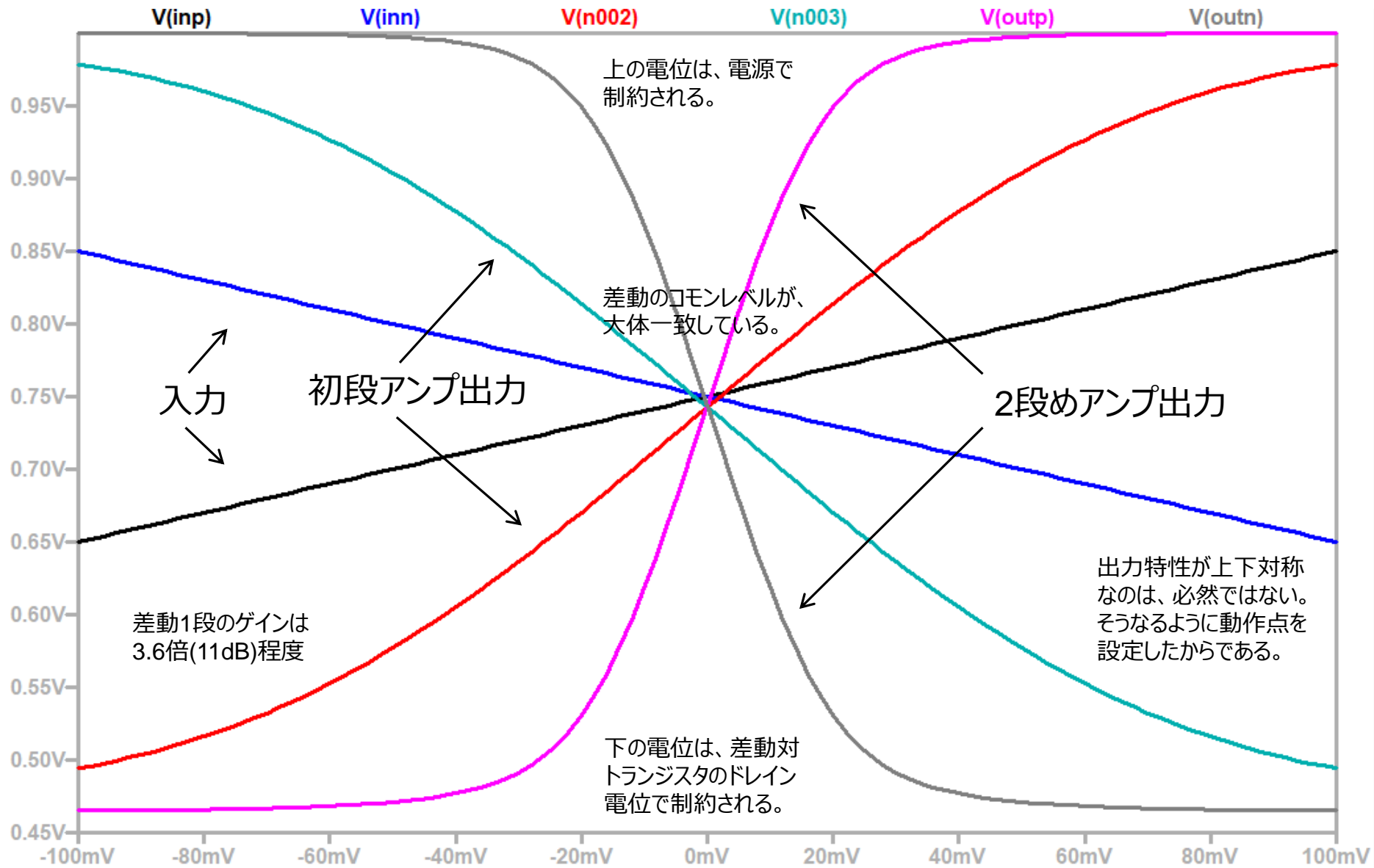
① 基準電流はband-gap reference回路から作ることが多い。DOI: 10.1109/MSSC.2016.2577978

② 差動対の動作点は、電流源(Current Sink)電流が二つに分かれ、それが抵抗に流れることにより決まる。

③ テストベンチで用いる差動入力の作り方の定番のひとつは、VCVSを用いる。

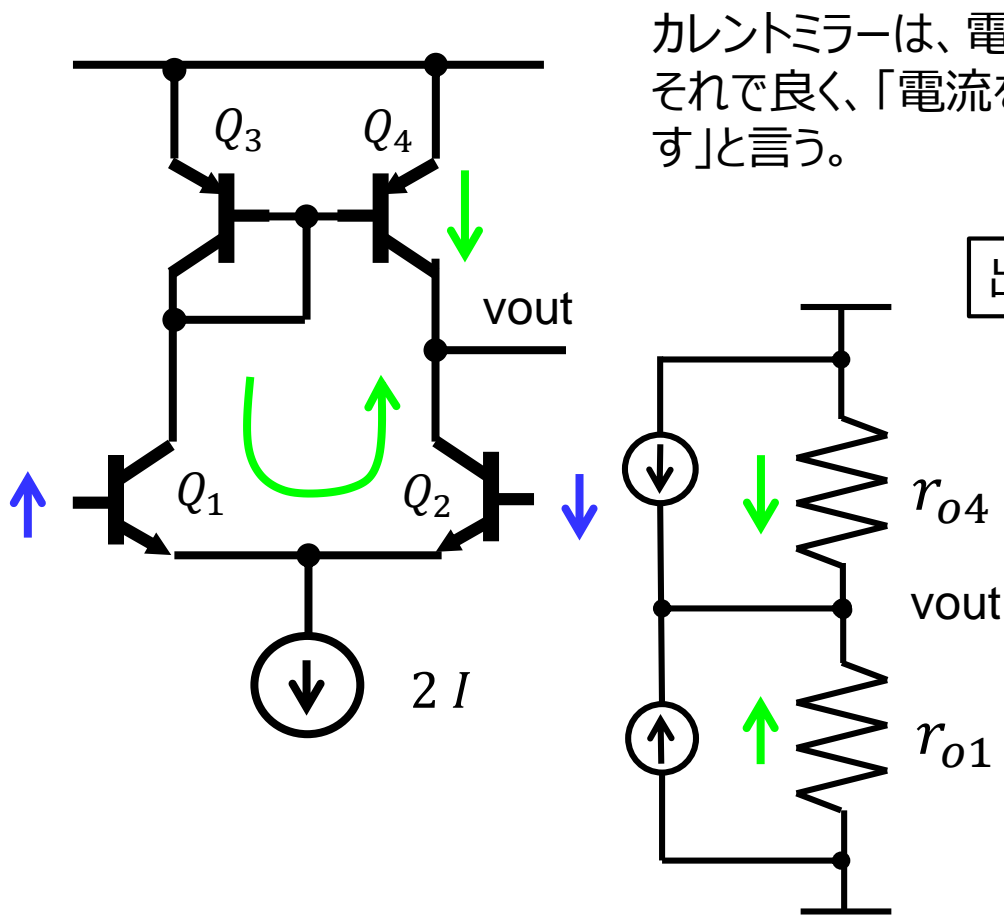
④ この差動対の信号は電源基準である(IC回路で抑えるべきポイントのひとつ)。そこで入力も電源基準で作る。

シミュレーション波形



Active Loadに流れる電流

カレントミラーの発明から大分経って、負荷にカレントミラーを使う動きが出てきた。これを active load と言う。# おそらく発想自体は、カレントミラー発明からはそんなに遅れていない。



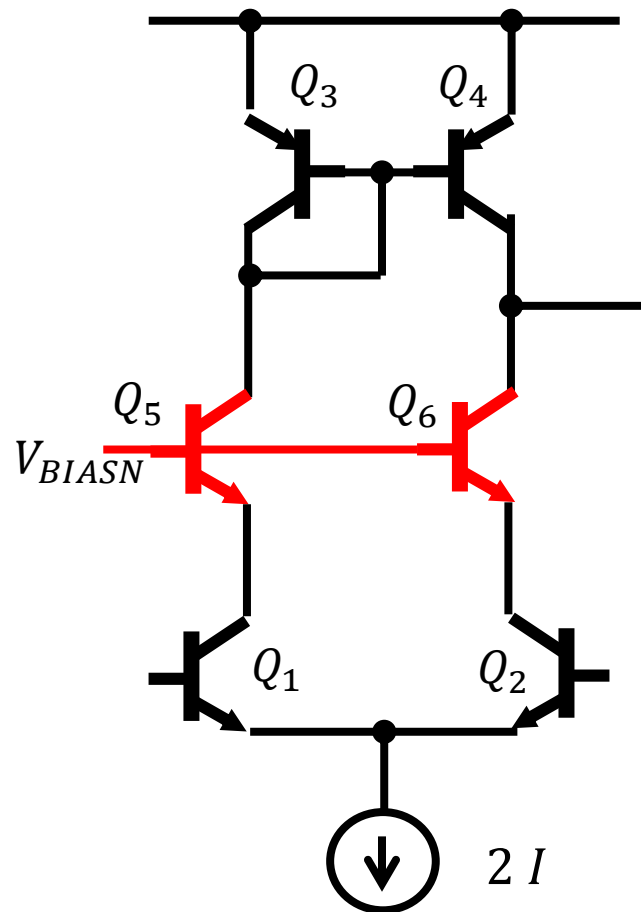
カレントミラーは、電流の向きを逆にする。それで良く、「電流をカレントミラーで折り返す」と言う。

出力部はNorton等価回路の合成

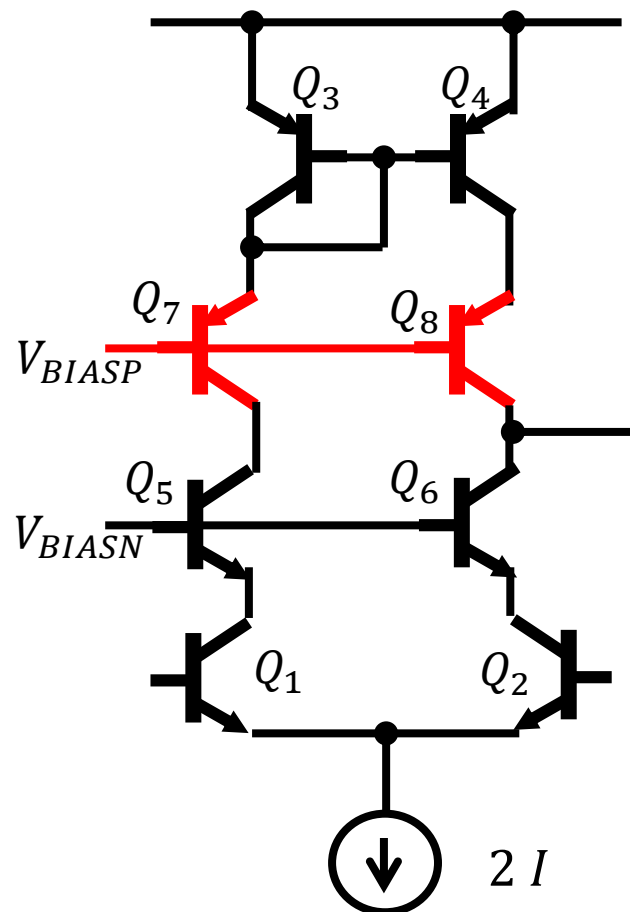
出力端子では Q_4 と Q_2 の出力抵抗が並列接続されて見える。その合成抵抗値は(かつては)抵抗素子では作れないほど大きく、アクティブロードはゲインを上げるのに好適であった。ただし負荷が低抵抗だと、この利点は享受できない。そこでEmitter Followerなどのインピーダンス低減回路と併用されることが多くなる。

カスコード接続

フルスイングする差動対や重い負荷(=低インピーダンス負荷)では無力



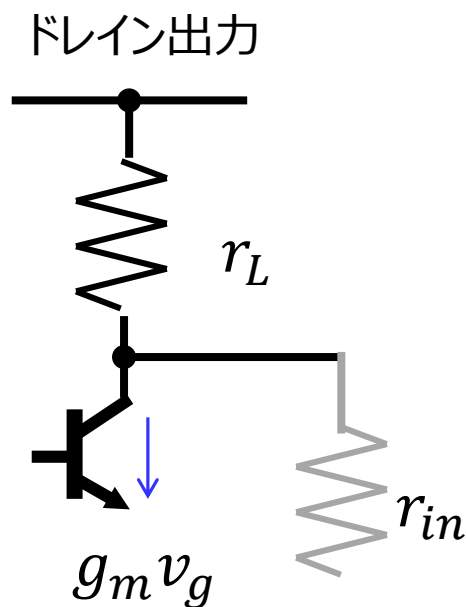
Q_6 のエミッタ電位はエミッタ電流にあまり依存せず決まるため Q_2 の r_o が見え難くなる。



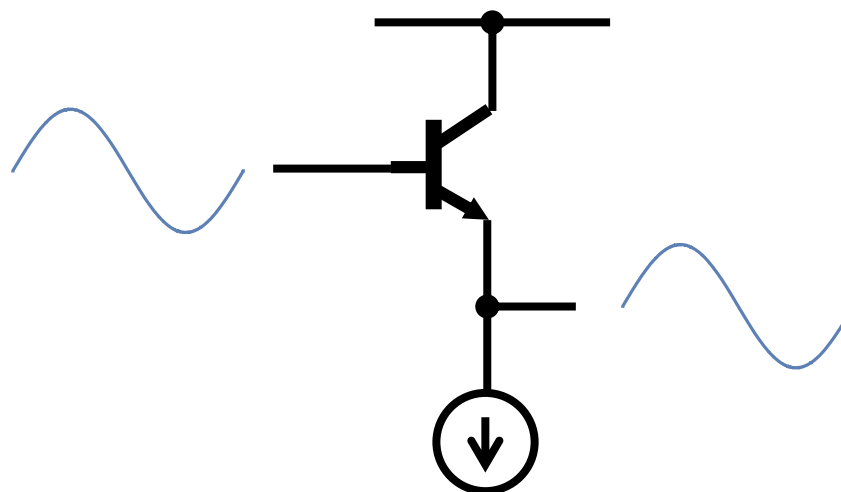
Q_8 も追加すると Q_4 の r_o も見え難くなる。

Emitter(Source) Follower

EF もしくは SF と略記



負荷 r_{in} (とドレイン抵抗)がなければ、ゲインは $g_m r_L$ になるのだが、



Emitter Followerは、Base電位の変化をほぼそのまま(実際には若干小さくなって)Emitterに伝える。MOS Trでは増幅率がさらに小さく、0.8倍程度になる。

ゲイン1以下のアンプが、何の役にたつのだろうか。

→ 負荷が重くても、SFを挟むとゲインが減らない。

バイポーラとMOSのIV特性比較

	Bipolar	MOS
微分形	$I_C = V_T \frac{dI_C}{dV_{BE}}$	$V_{GS} = \beta \frac{dI_D}{dV_{GS}}$
直接形	$V_{BE} = V_T \ln \frac{I_C}{I_S}$	$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2$

出力電流を入力電圧で微分したものが、Bipolarでは出力電流、MOSは入力電圧になる。その結果が、Bipolarにおいては指数特性、MOSにおいては自乗特性となっている。

何か理屈はあるのかもしれないが、寡聞にして知らず。

R. Wiegand, "Analysis and Synthesis of MOS Translinear Circuits," Springer, 1993.

ICで回路が変わったこと

特性

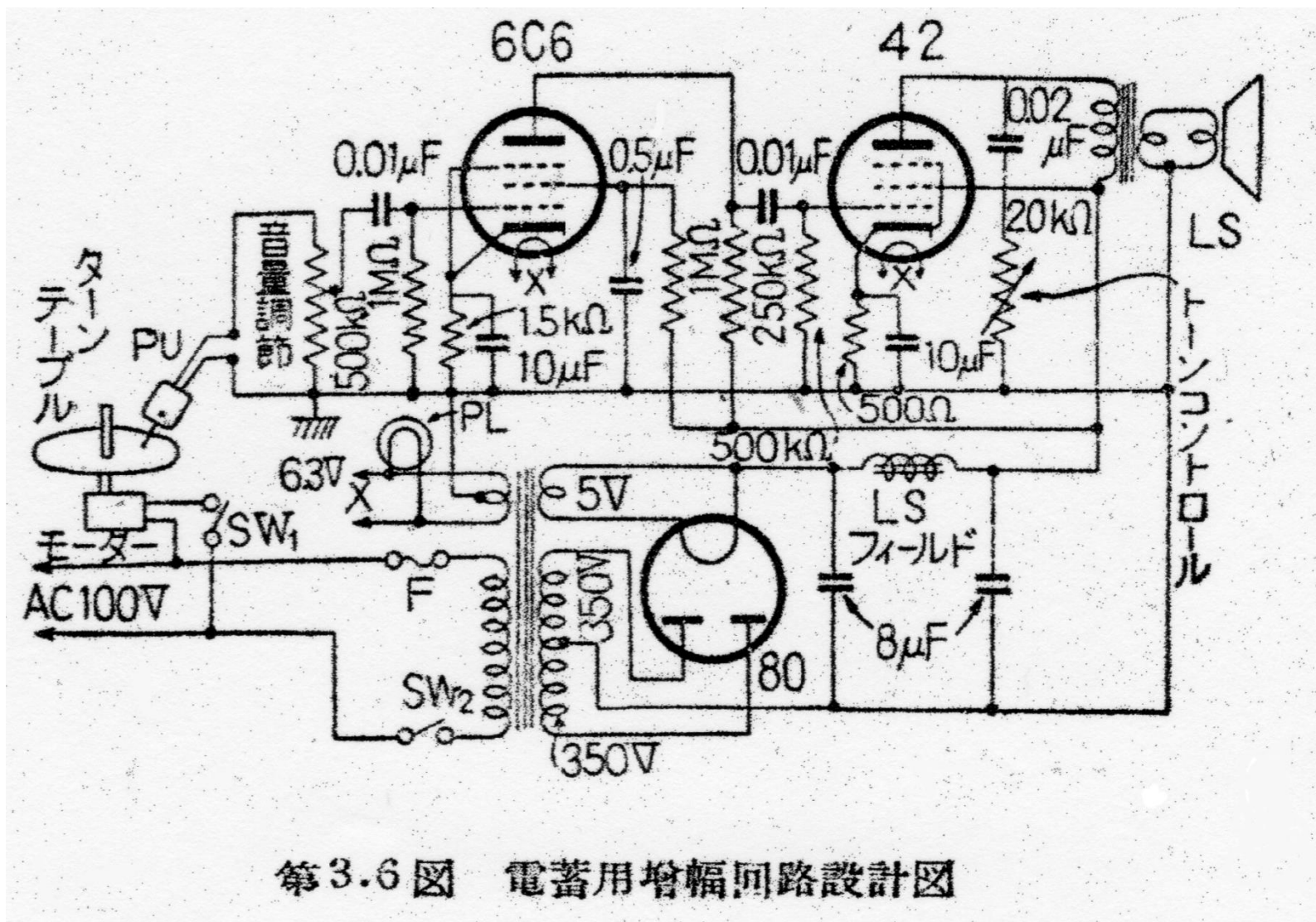
	ディスクリート	IC
素子の値段	$R < C < L < T, \text{Valve}, \text{Tr}$	$\text{Tr}, R < C \ll L$
		$\propto \text{Masks} * \text{Area} / \text{Yield}$
精度	単体は良い 組合せは別途ケア	ペア比は良い 絶対精度は $\pm 15\%$ 程度

回路上の変化

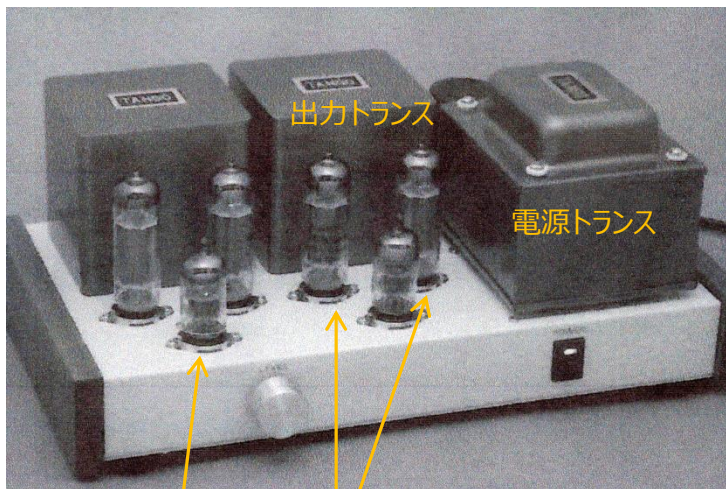
	ディスクリート	IC	コメント(IC観点)
ゲイン段構成	単体	差動対	直結でもバラつきに耐える。
バイアス	自己バイアス	カレントミラー(CM) バンドギャップリファレンス (Band Gap Reference)	差動対と相性が良い。 BGRを使うと電源や温度 のバラツキに強くなる。
出力IV変換	抵抗	アクティブロード(CM)	gmの低さを補う
段間接続	コンデンサ(orトランス)	直結	素子の値段比が劇的に変 わった。
インピーダンス変換	トランス	ソースフォロア	真空管と違いDCレベル変 動が0.7V以下で済むデバ イスである。

第3章 実用回路たち

電蓄用増幅器回路図



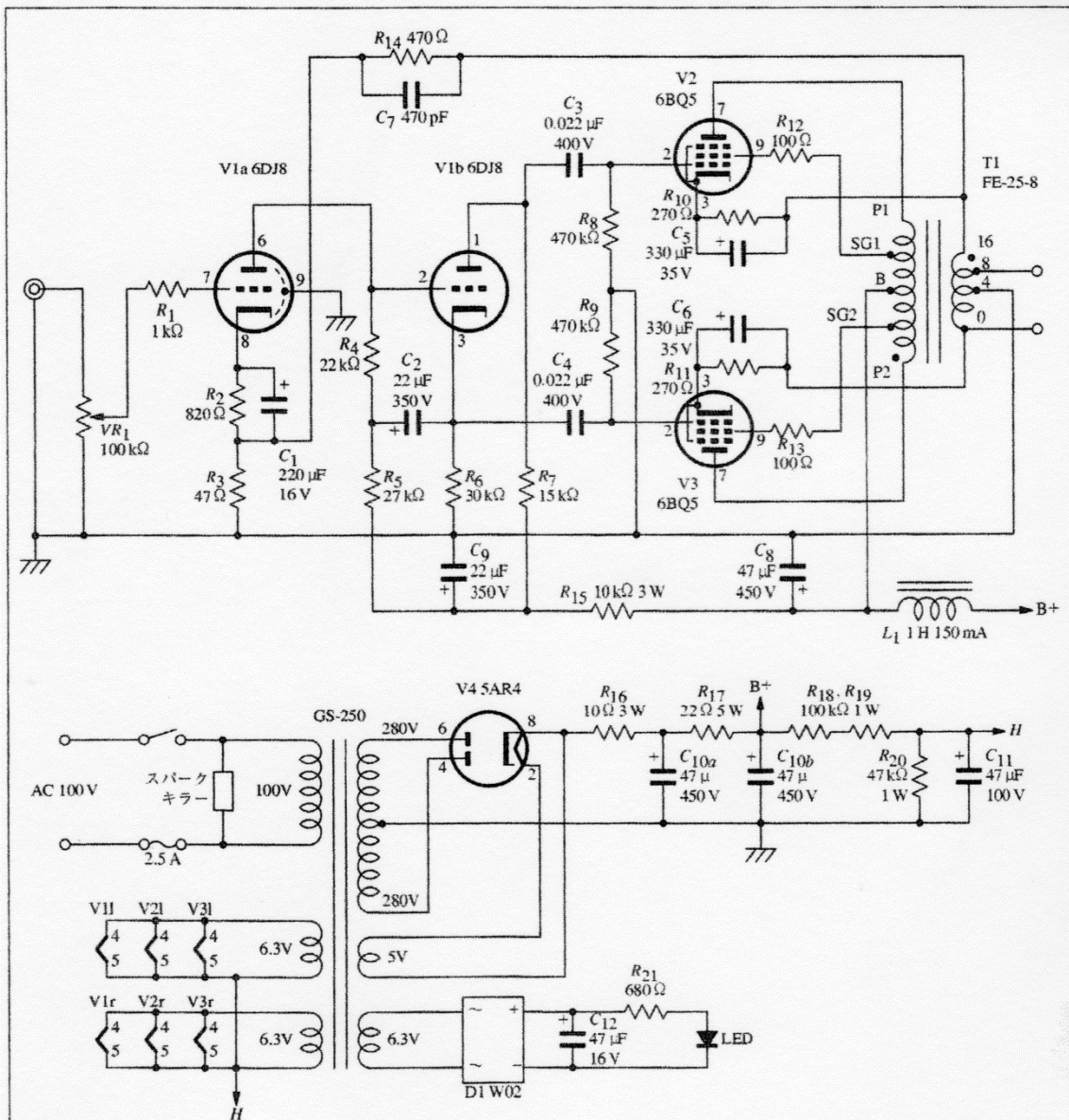
オーディオ用真空管アンプ回路図



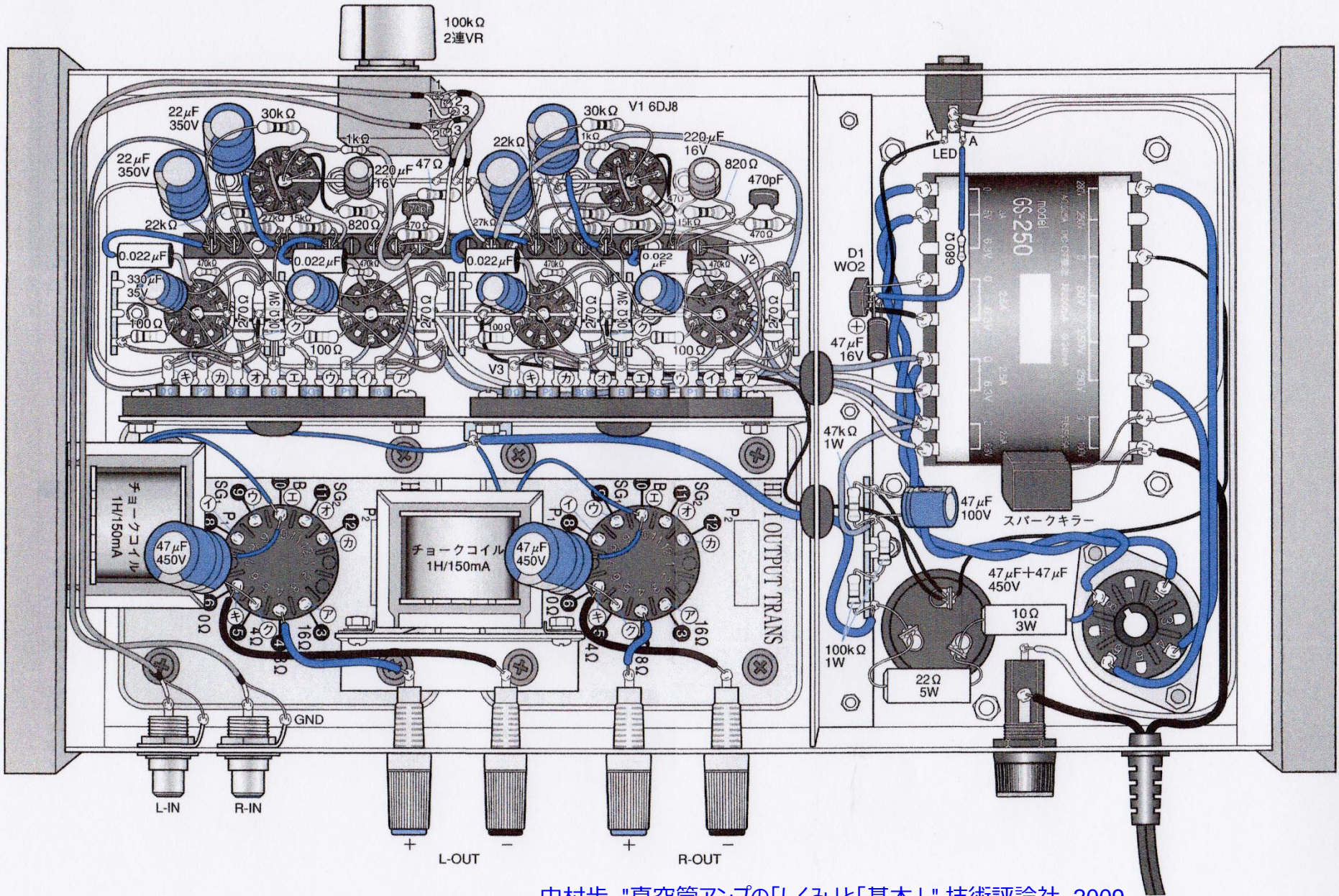
双3極管
6DJ8

プッシュプル5極管
6BQ5

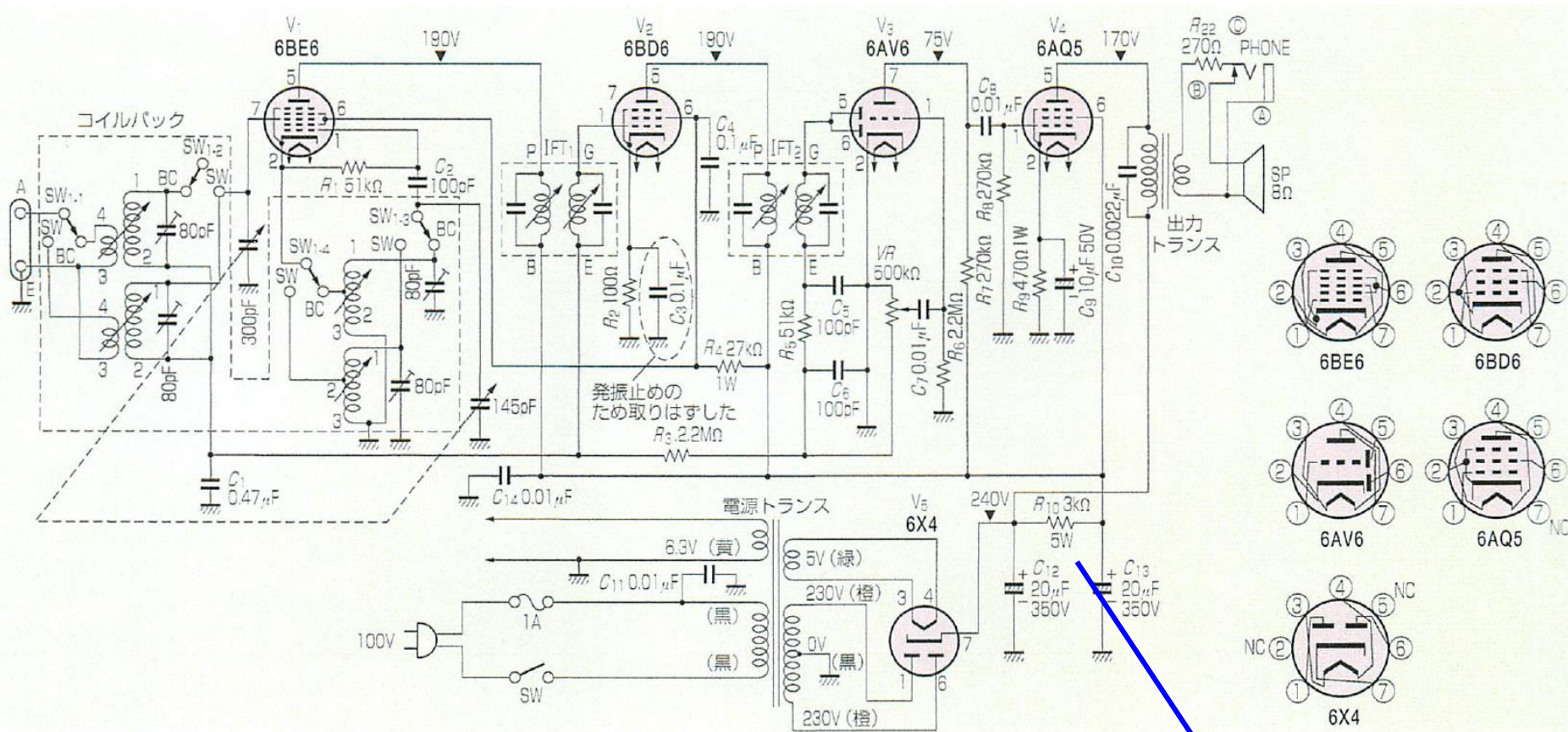
トランスの大きさを感じて欲しい。しかも重い。銅と鉄の塊なのである。音質に与えるトランスの影響は大きい。このアンプでは初段の3極管が直結されているが、真空管の時代には稀な構成であった。



オーディオ用真空管アンプ実体図



2バンド5級スーパーラジオ回路図

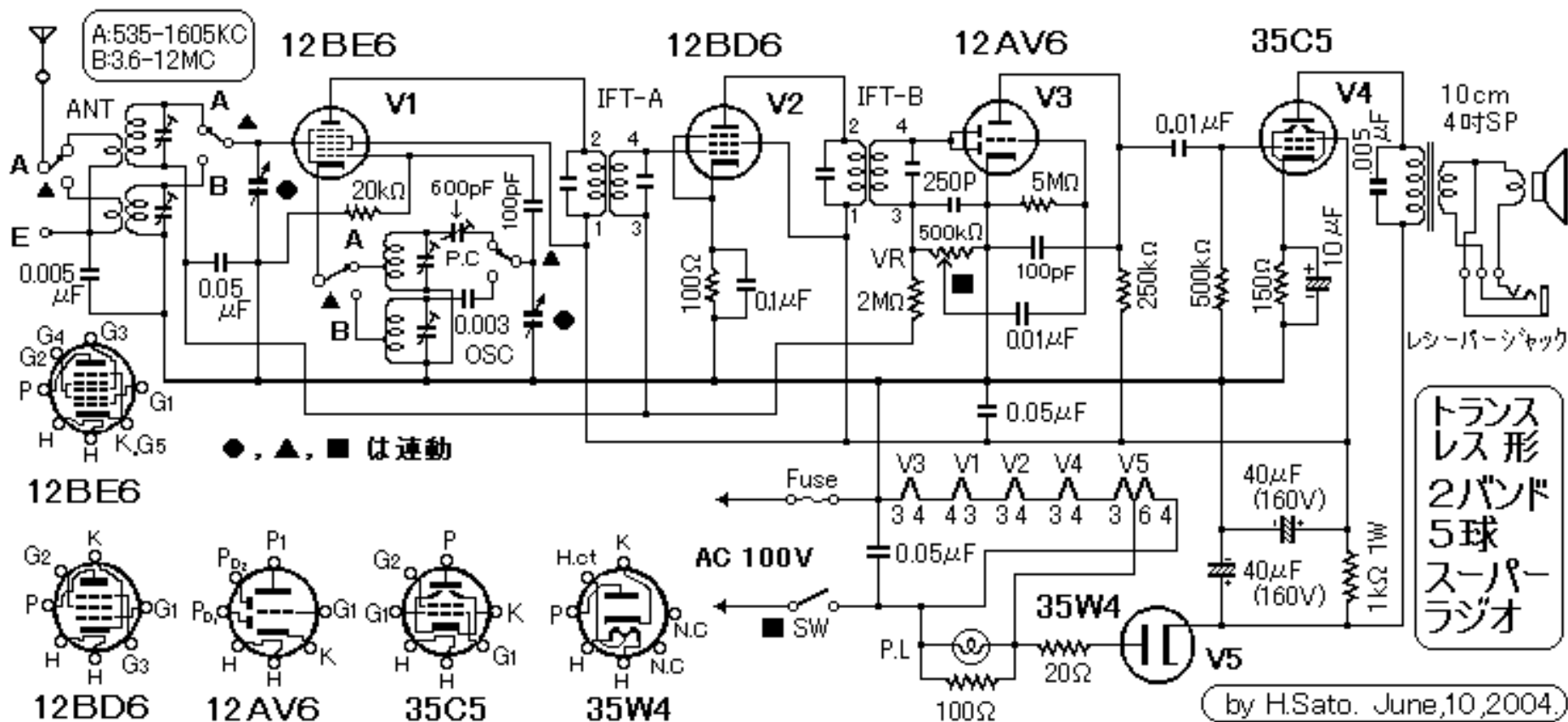


【図1】本機の全回路
昭和20年代後半、MT管が使用されるようになったころのままの回路構成。この後、真空管ラジオはトランスレスが主流になった（メーカー添付の回路図を一部変更している）

オームの法則から、 $P=V^2/R=19.2W$ ではないのか？

藤本伸一, "2バンド5級スーパーの製作," ラジオ少年の時代, 誠文堂新光社, 2002.

トランスレス5級スーパーラジオ回路図

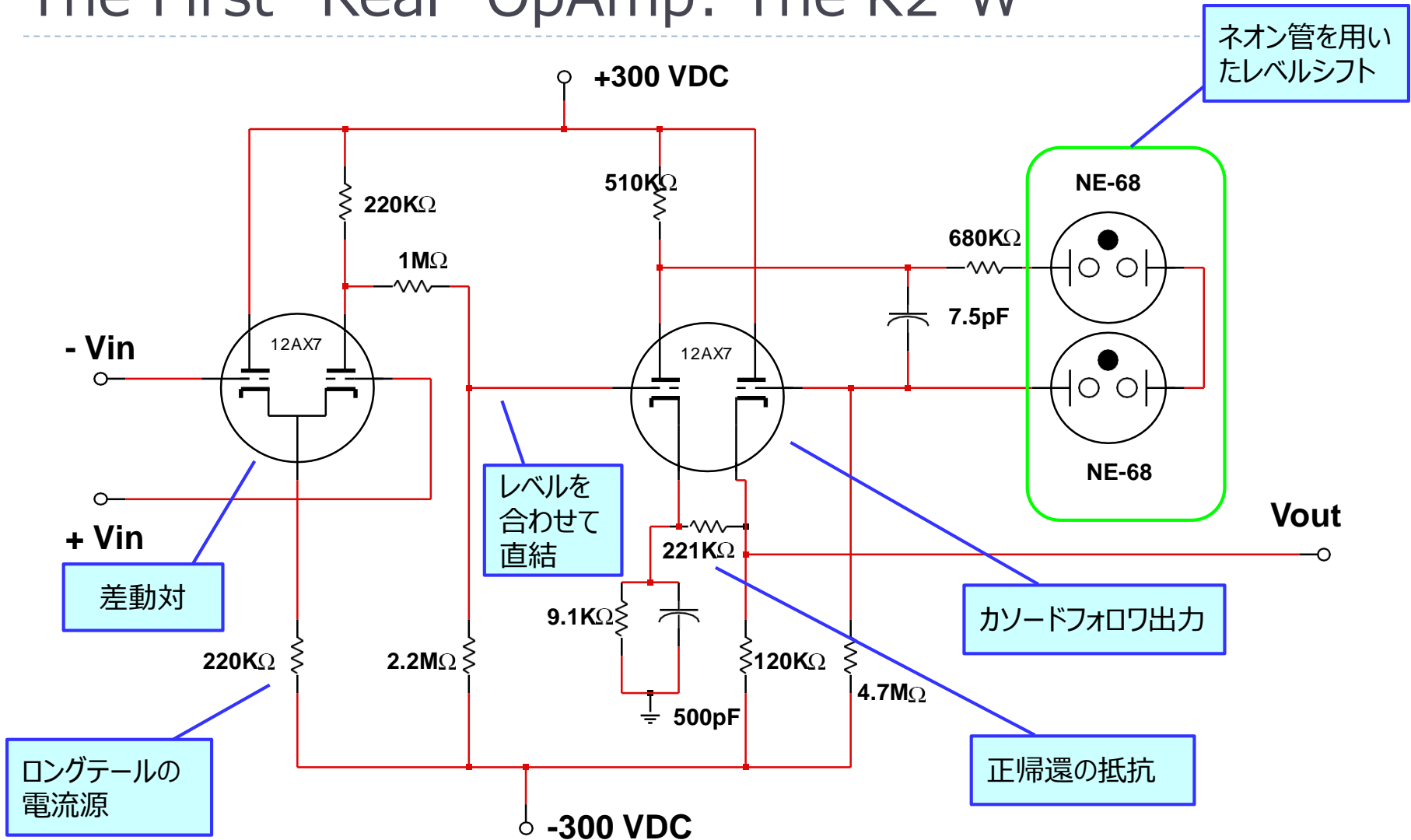


高価で重い電源トランスを省くため、真空管のヒーターを直列にする構成が、低価格ラジオの主流になった。(昭和28年頃から盛んに生産された)

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>

The First "Real" OpAmp: The K2-W





K2-XA



EE122, Stanford University, Prof. Greg Kovacs

The K2-W Tube OpAmp

- Invented by Julie Loebe and George Philbrick (early 1950's)
- The first "mass production" OpAmp...
- Cost (in 1950's) approximately \$22.00...
- Basic specifications comparison to 741 and LT1037...

Parameters	K2-W OpAmp	741 OpAmp	LT1037 OpAmp
Power Supplies	+/- 300 VDC, 6.3 VAC (filaments)	+/- 15V	+/- 15V
Open-Loop Gain	1.5×10^4	5×10^4	30×10^6
Vout Swing	+/- 50V	+/- 12V	+/- 13.5 V
Iout	+/- 1 mA	25 mA	25 mA
I _{drain}	5 mA (no load)	1.7 mA	2.7 mA
R _L (min)	50 K Ω	none (SC protect)	none (SC protect)
Slew Rate	+/- 12 V/ μ Sec	+/- 0.5 V/ μ S	15 V/ μ S



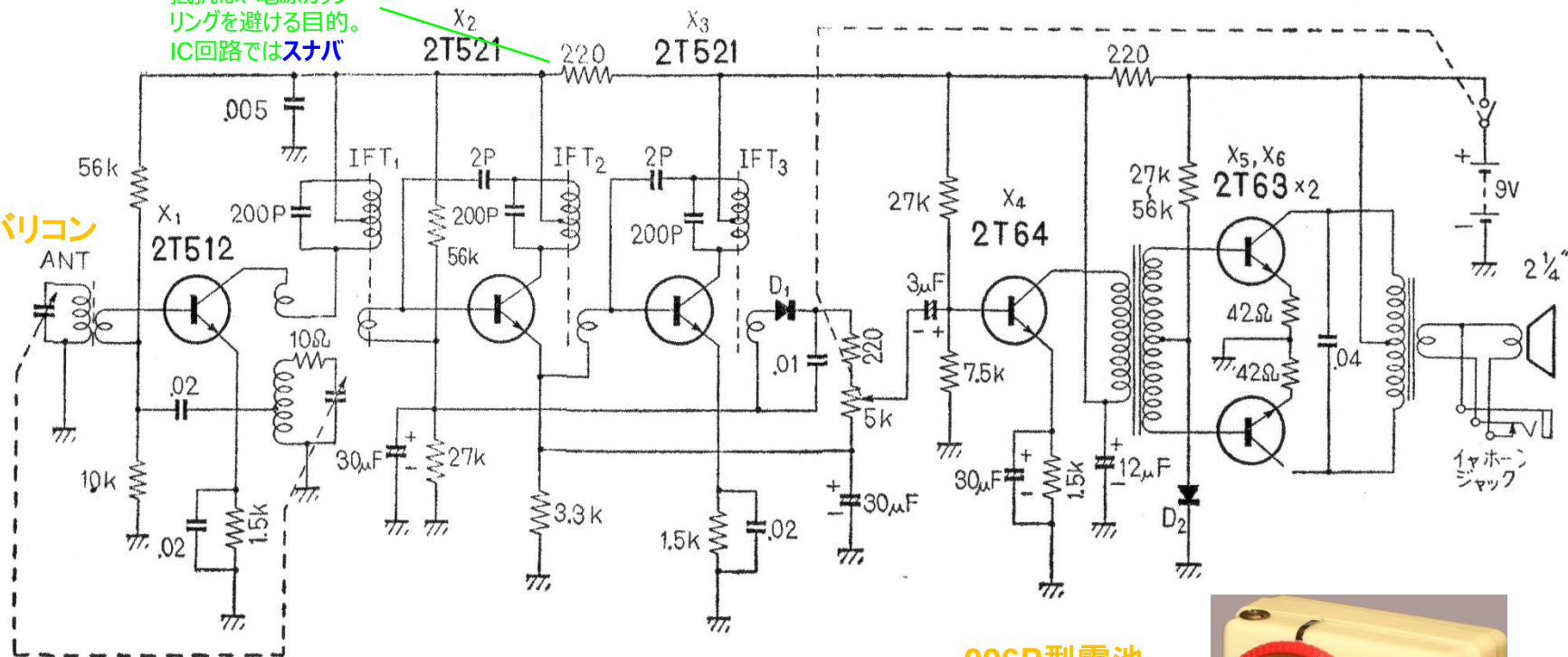
Sony TR-63

6石スーパー(Super Heterodyne方式)

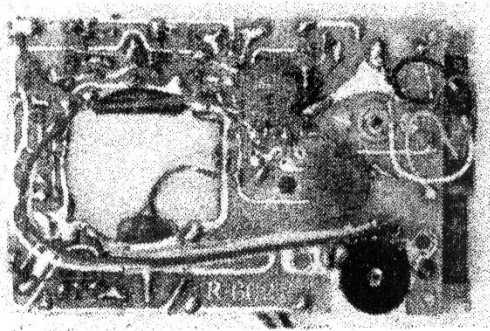
1957年発売

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

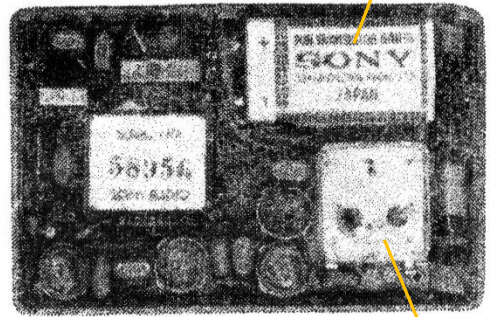
ポリバリコン



プリント基板と配線



部品マウント図



外観写真

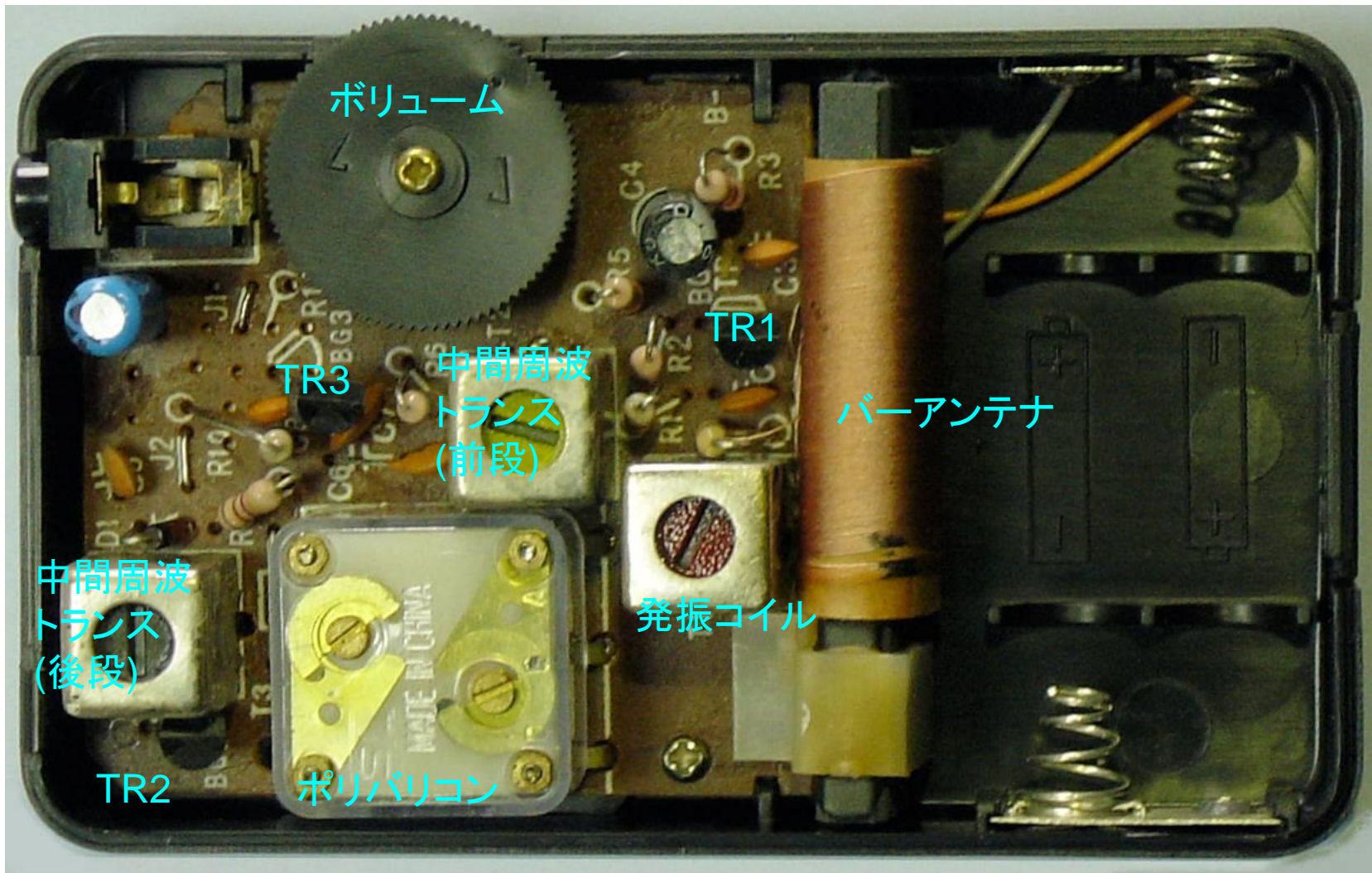


006P型電池

ポリバリコン

ダイソー100円AMラジオ

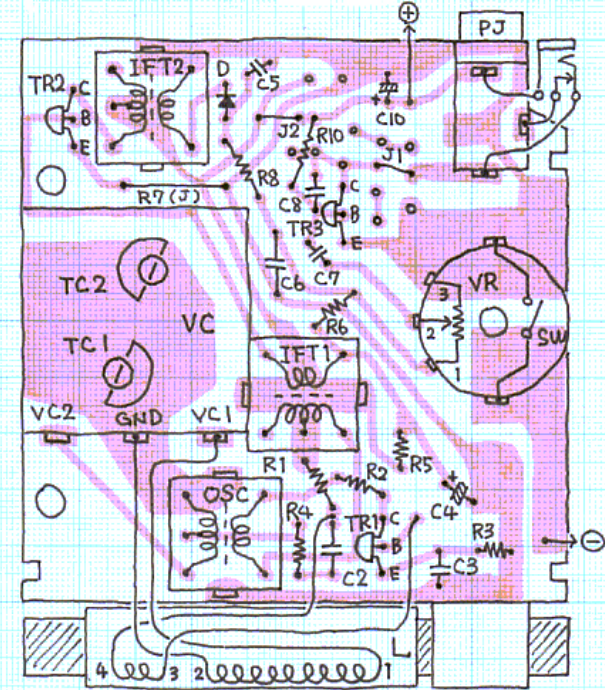
2000年頃?



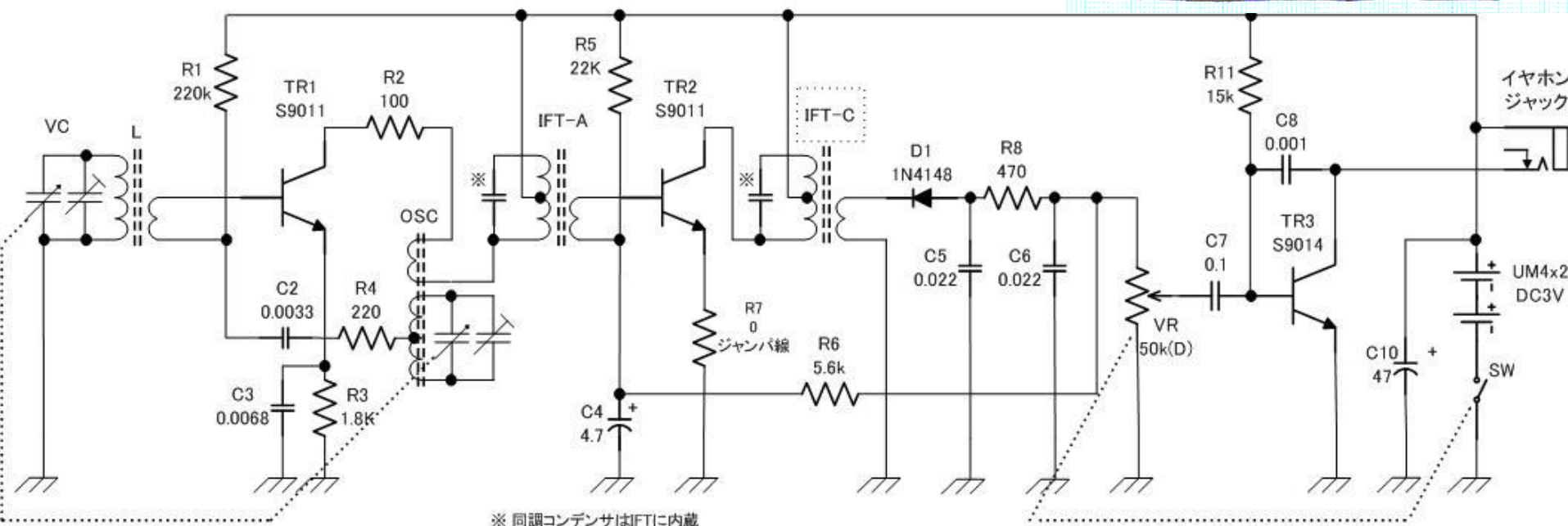
100円ラジオ回路図と実体図

<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

オーディオ用Trアンプ

メインアンプ部は全段直結OCL

1971年

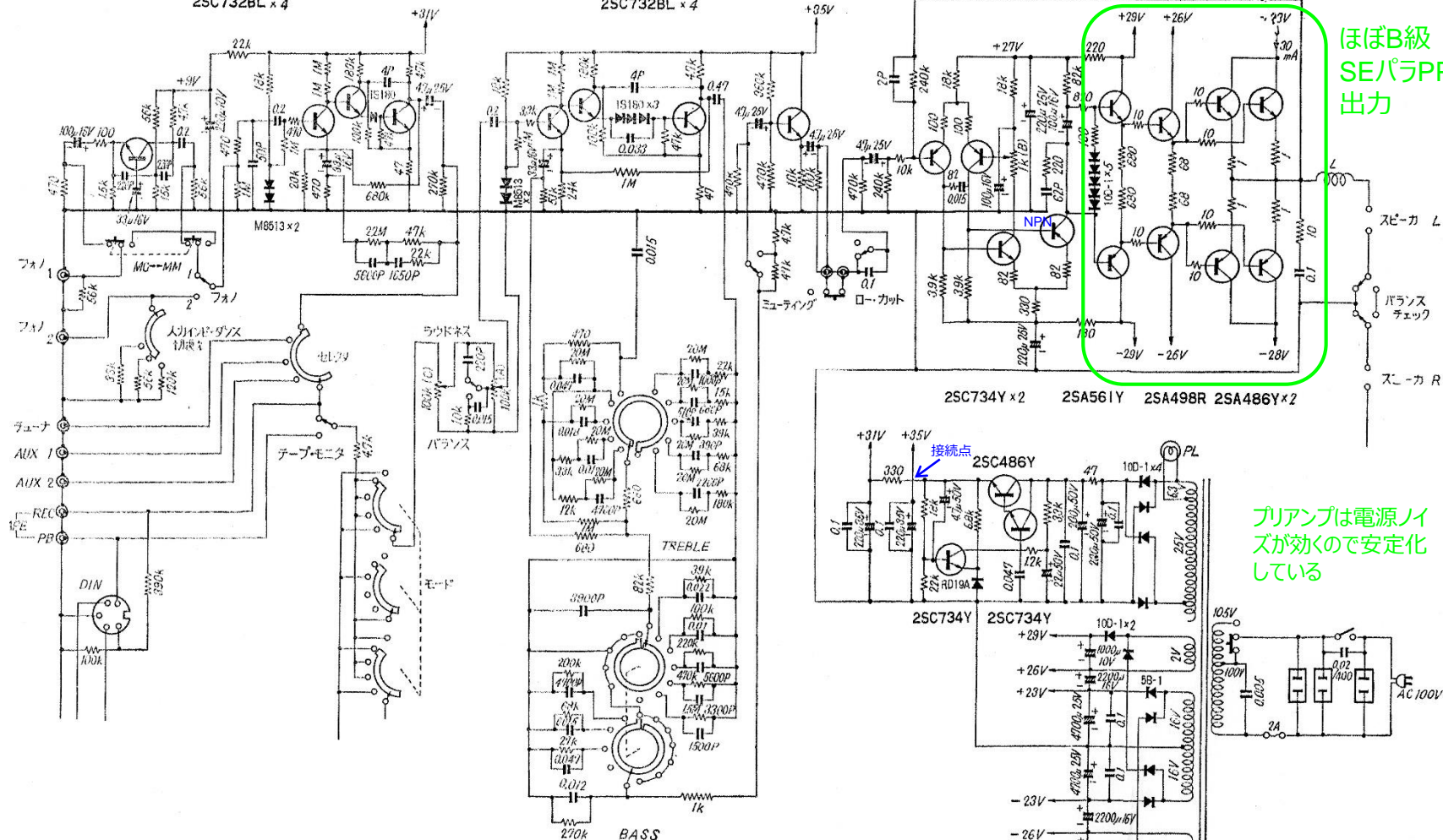
コンプリメンタリの差動対

プリアンプ部

2SC732BL x 4

トーンコントロール部

2SC732BL x 4



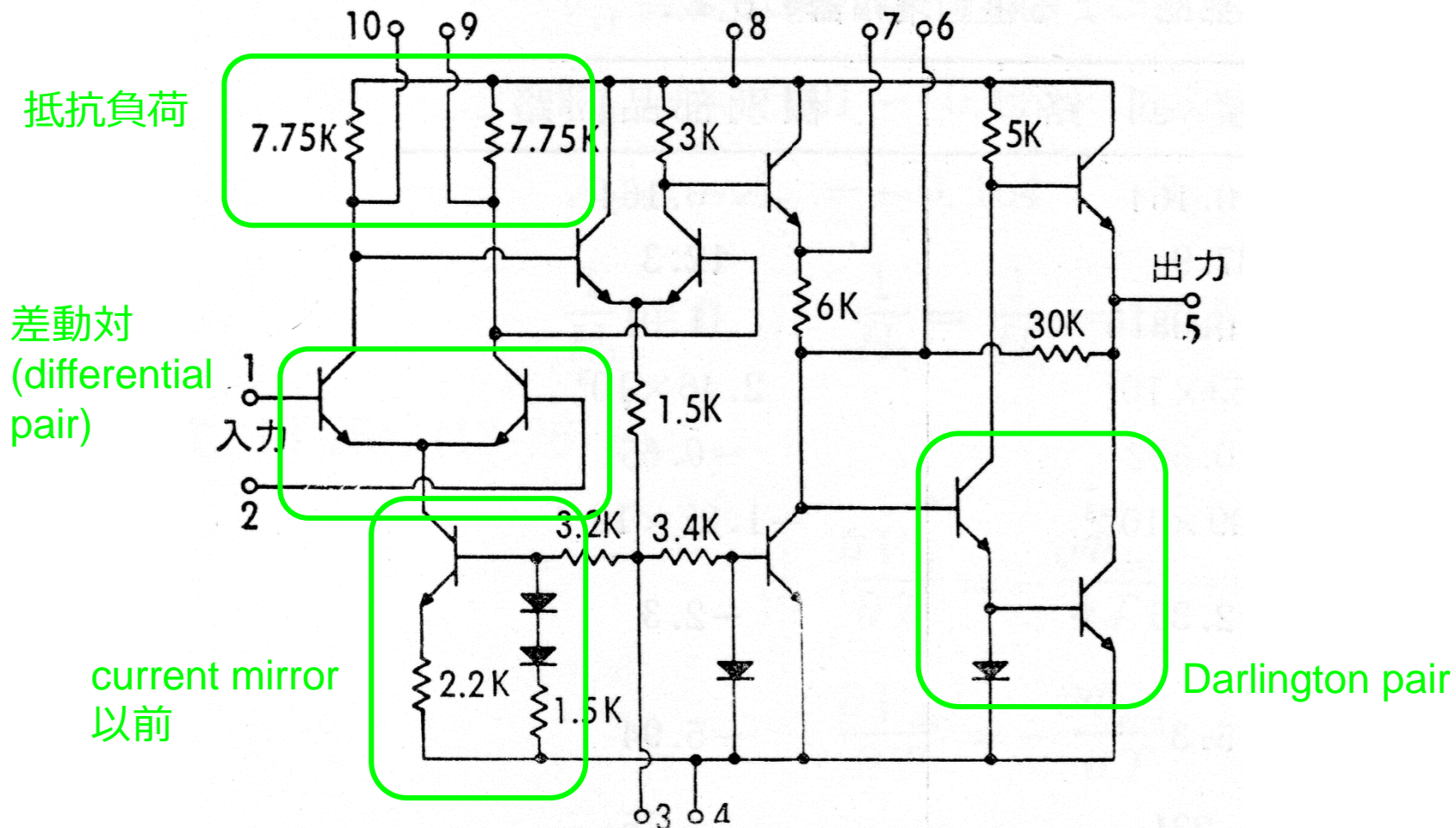
ほぼB級
SEパラPP
出力

プリアンプは電源ノイズが効くので安定化している

高級オーディオでは特を制限するコンデンサやトランスを避け、金に糸目をつけず各段を直結することが試みられた。そこで活躍したのが差動対回路である。

最初期のIC OPAMP

すでに全段直結で、キャパシターは内蔵されていない。
当初PNPも作り辛かったので、NPNだけで何とかする工夫がなされた。

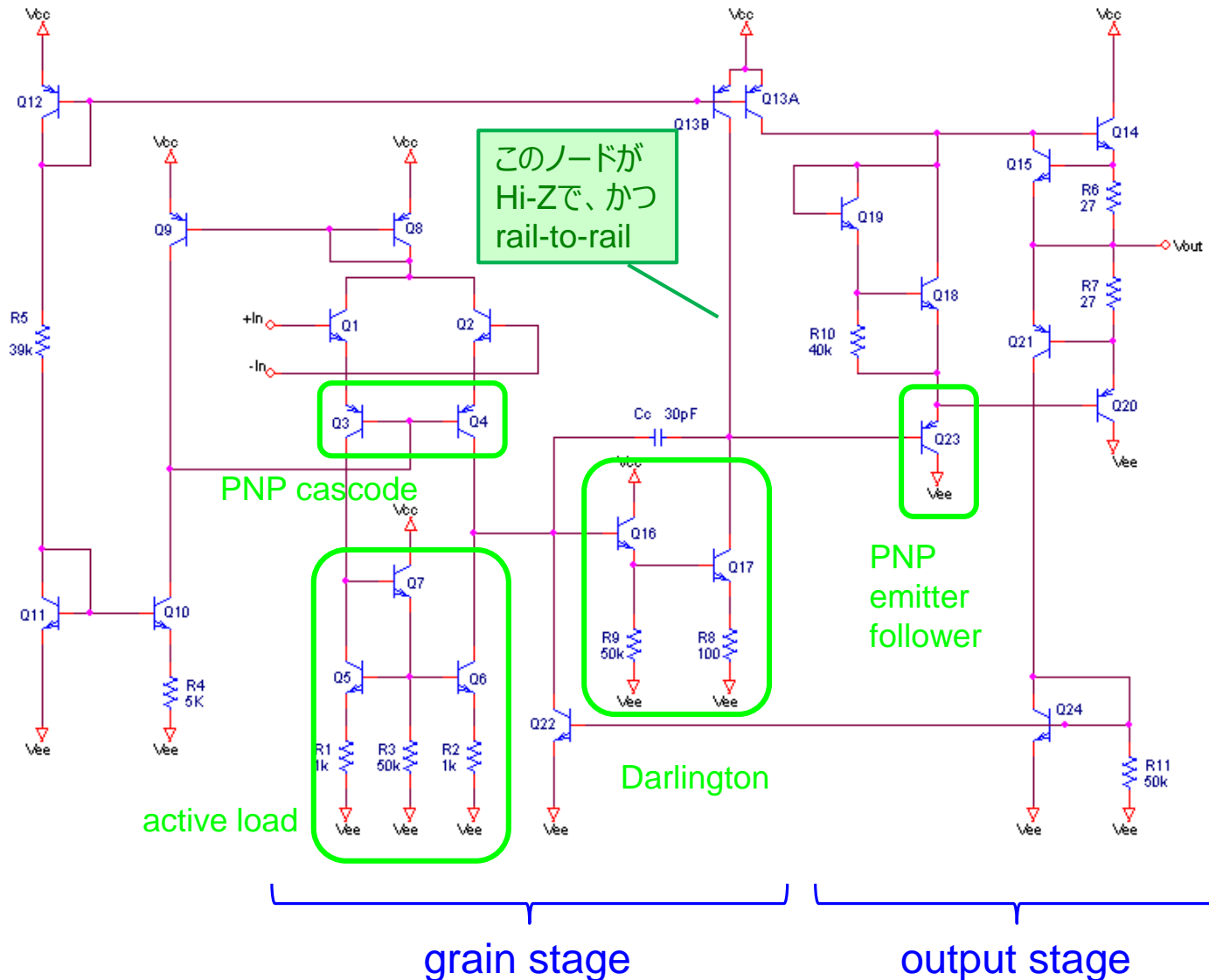


D. K. Lynn, et.al. "Analysis and Design of Integrated Circuits," Motorola, 1967

往年のベストセラーOPAMP

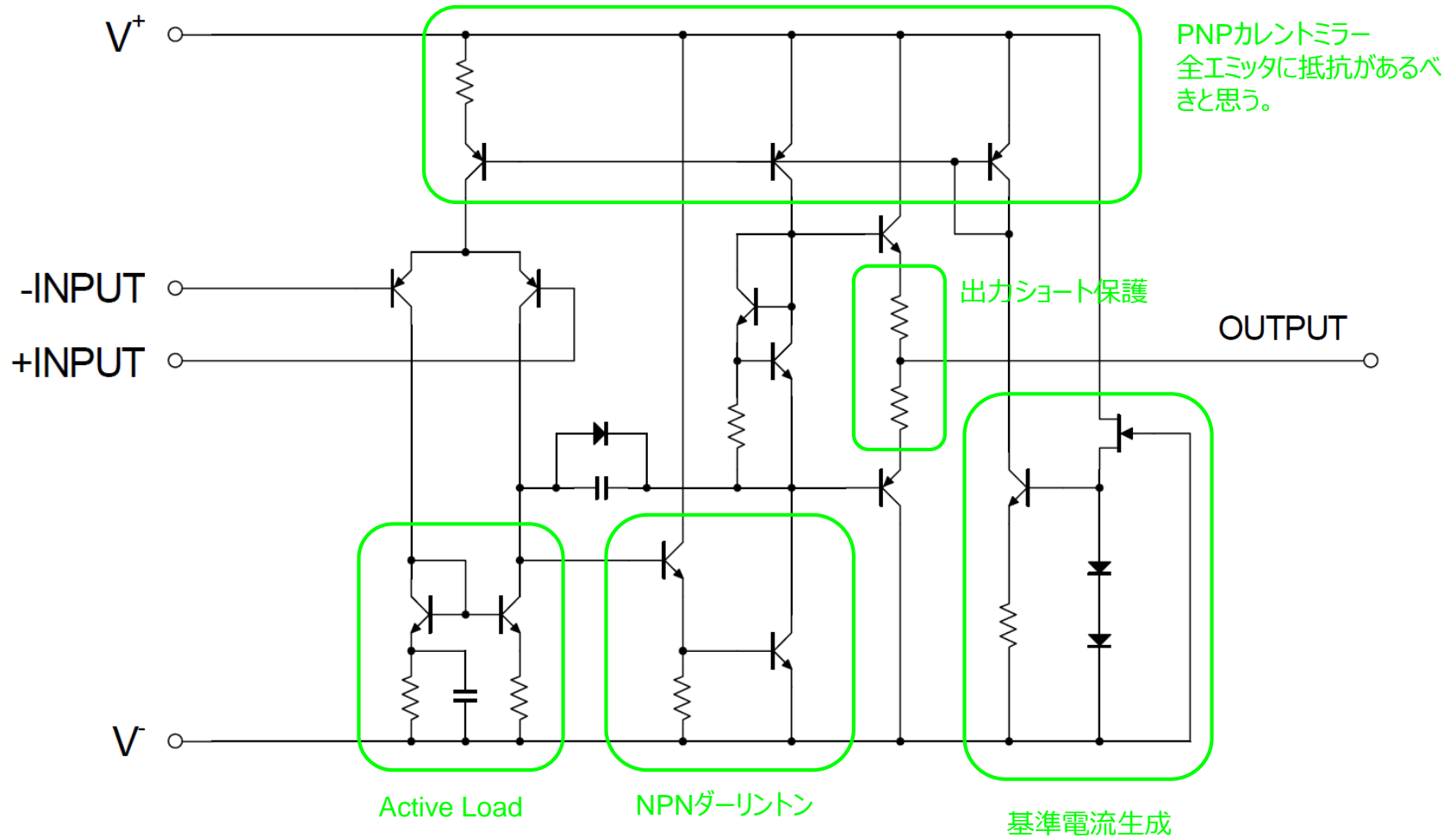
Fairchild uA741, 1968

PNP/NPNを自在に使えるcomplementary process

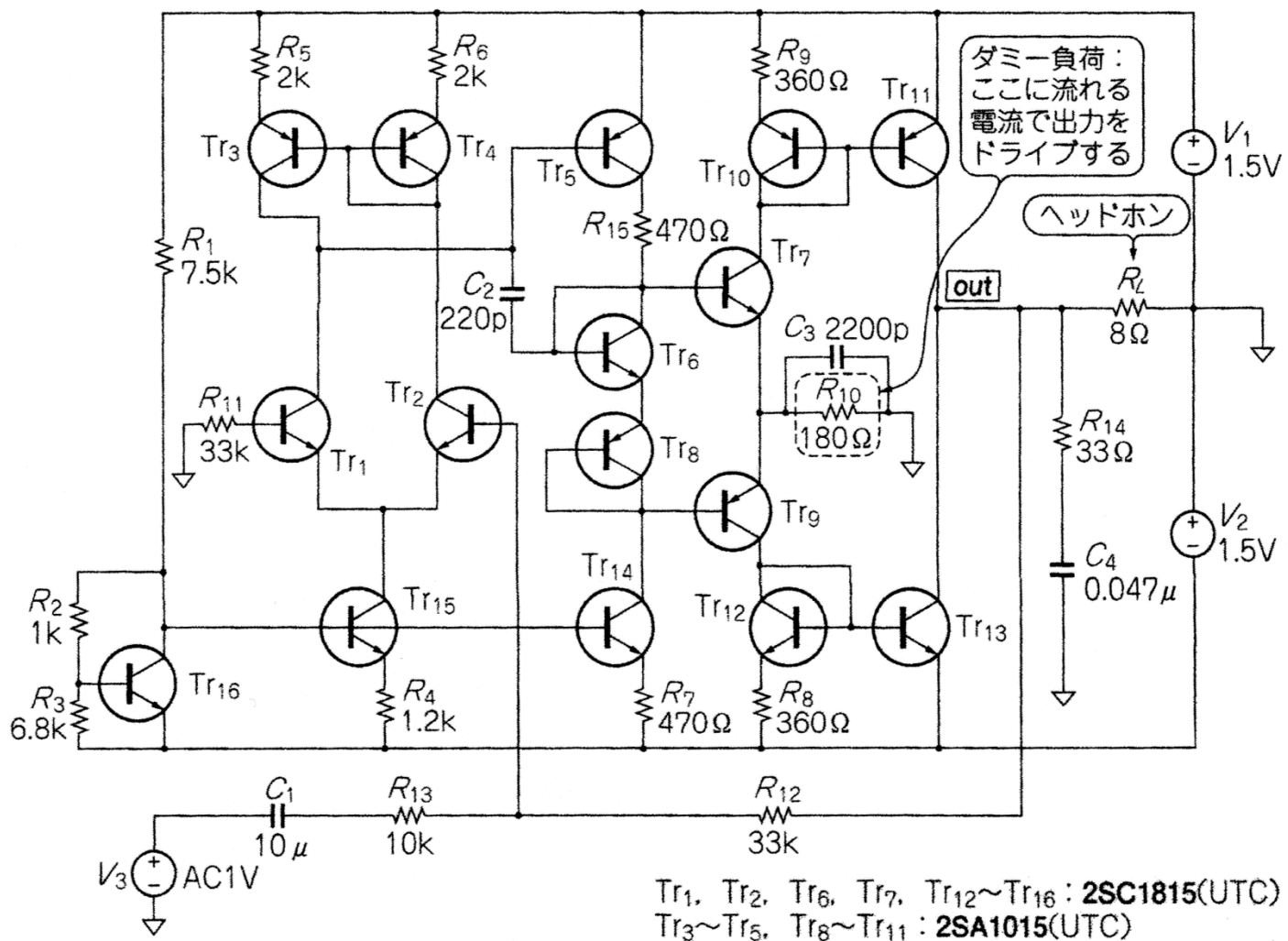


現行のシンプルなBipolar OPAMP

新日本無線 NJM4580



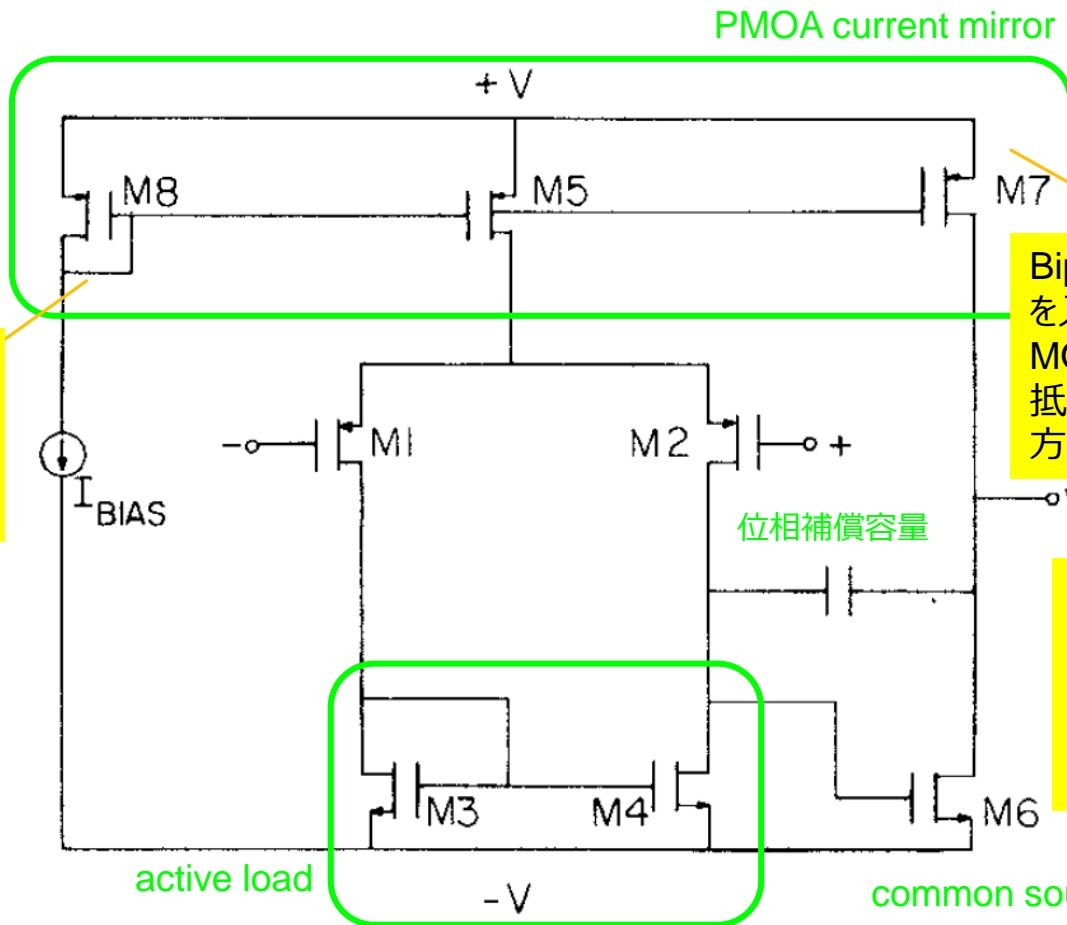
スピーカーも鳴らせるヘッドホンアンプ



加藤 大, トランジスタ技術 2018年10月号 図12

CMOS OPAMPの定番回路

MOSも当初はNMOSだけで無理やり感があったが、じきにcomplementary processが使えるようになった。プロセス屋さんの執念であろう。



MOSのカレントミラーでは単純ダイオード構成が殆どである。BipではEFと組み合わせる方が普通であった。

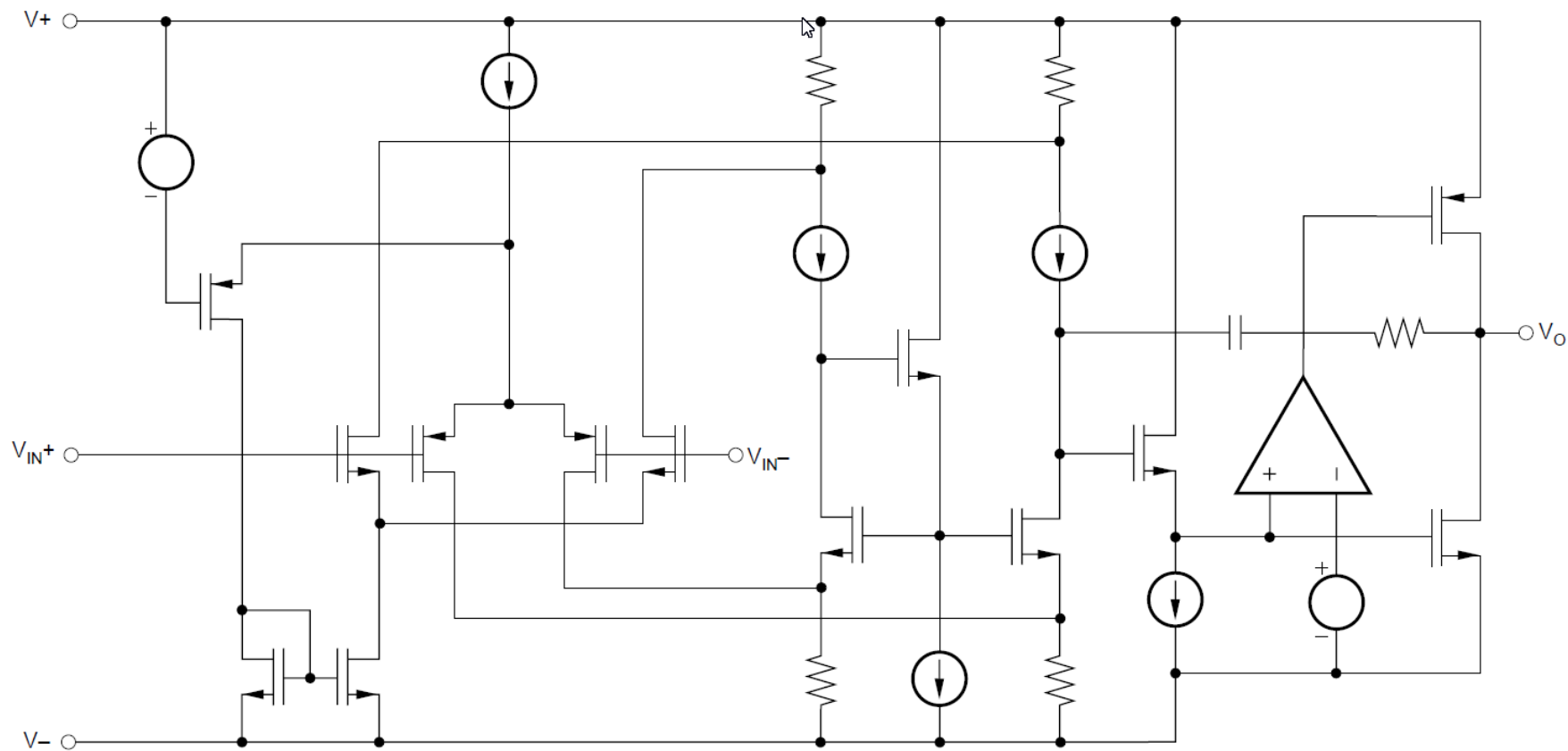
Bipolar時代はエミッタに抵抗を入れる方が普通であったが、MOSカレントミラーはソースに抵抗を入れず、 T_r だけで作る方が普通である。

Drain突合せの出力はrail-to-railの出力レンジが取れるが、容量性負荷の駆動はつらい。(ゲイン段しかない感じ)
定番回路ではあるが、適用範囲は限定的である。

P. Gray, R. Mayer, "MOS operational amplifier design-a tutorial overview," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. SC-7, No. 6, pp. 969-982, December 1982.

入出力Rail-to-RailのOPAMP回路

Burr-Brown OPA704 from Texas Instruments



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, 連載中.