

JAERI - M

85-085

タンデム加速器用電流対数増幅器

1985年6月

吉田 忠・花島 進

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

**Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.**

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 刷 磯高野高速印刷

タンデム加速器用電流対数増幅器

日本原子力研究所東海研究所物理部

吉田 忠・花島 進

(1985年5月29日受理)

タンデム加速器で加速されるイオンビームの電流を測定するため、微小電流用対数増幅器を製作した。適切な素子の使用と回路方式の工夫により、 10 pA から $100\text{ }\mu\text{A}$ の電流を長期間安定に測定できるように設計した。その結果、従来タンデム加速器で使用していたものに比べ、確度、測定範囲のみならず、保守性、信頼性は大巾に改善された。

A Current Logarithmic Amplifier For The JAERI Tandem Accelerator

Tadashi YOSHIDA and Susumu HANASHIMA

Department of Physics
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received May 29, 1985)

A high sensitivity current logarithmic amplifier was constructed to monitor ion beam currents in JAERI tandem accelerator. The newly designed logarithmic amplifier enabled stable observation of beam currents ranging from 10pA to 100 μ A with good longterm stability. Compared with the previously used model, stability, range of measurement, maintainability and reliability were greatly improved.

Keywords : Current Logarithmic Amplifiers, Tandem Accelerator,
Ion Beam Currents

目次

1. はじめに	1
2. 従来の対数増幅器	1
3. 新設計の対数増幅器	1
3.1 対数増幅部	2
3.1.1 基本原理	2
3.1.2 微小電流入力に対する誤差	3
3.1.3 附加回路	3
3.1.4 対数増幅器の部品選定	4
3.2 定電流電源部	5
4. 特性	5
参考文献	6

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Old logarithmic amplifier	1
3. Newly designed logarithmic amplifier	1
3.1 Logarithmic amplification	2
3.1.1 Basic principle	2
3.1.2 Error for a small current input	3
3.1.3 Additional circuit	3
3.1.4 Parts selection	4
3.2 Reference current power supply	5
4. Performance	5
Reference	6

1. はじめに

タンデム加速器により発生し、加速されたイオンビームの強度を測定するため、ビームライン内にファラデーカップが設置されている。ファラデーカップに当たったイオンビームは電流出力端子により真空系外に導かれ、電流測定回路に入る。加速器により作り出されるイオンビームの量は、通常数 nA から 1 mA 程度である。この電流の観測と長時間にわたる安定度、信頼性の向上のため数 pA から測定できる性能の対数増巾器を試作した。加速器に取付け、実際に使用した結果満足のできる性能のものが得られたので報告する。

2. 従来の対数増幅器

タンデム加速器で生成、加速されるイオンビームの量は、 10^{-9} A から 10^{-3} A 位までの広い範囲の電流量である。この6桁にも及ぶ範囲の電流を測定するため、タンデム加速器には対数増巾器が使用されている。この対数増巾器の出力は 0 - 10 V の範囲の電圧に変換され、カマックスシステムを経て計算機により処理される。

第1図にタンデム加速器購入時に付属してきた対数増巾器の回路図を示す。これにはバーブラウン社のハイブリッド IC 4127 (1パッケージのログアンプ) により電圧に変換され、オペレーショナルアンプ 741 のレベルシフト回路を経て出力される。

バーブラウン社のログアンプ "4127" の特性は第1表に示すように、ちょうど上記の電流範囲を測定できる性能をもっている。この回路の構成は複雑ではないが、調整ヶ所が多く、非常に微妙な調整を必要としている。実際の電流値の読み取り精度も長時間使用している間に劣化してくることが有り、定期的な較正が必要である。

加速器は大きなサージの発生が多く、このサージによる半導体、IC 等の破壊がおこらない丈夫な回路構成を必要としているが、従来の回路はその対策が不十分で時々故障することがあり、保護のために IC の出力を電源にダイオード等で接続し、サージによる集積回路等の破損防止のための処置を施した。

3. 新設計の対数増巾器

新設計の対数増巾器は、加速器イオン源の開発時等に必要とされる微小電流の測定も出来るよう、従来の対数増巾器より3桁程度の微小な電流も測定できることを目標にし、さらに調整ヶ所も出来るだけ少ない簡単な回路構成となるようにした。その結果第2図に示すような回路構成となった。回路構成は主に次の3つの部分からなっている。1) 対数増巾部、2) 定電流電源部、3) 電源部である。従来の対数増巾器は電源部も同一基板上にあったが、新設計の対数増巾器は 10 pA 以下をも測定できるようにするため、電源誘導等の影響をなくす事が重要となり電源部は別置の回路とした。

以下に各部について述べる。

3.1 対数増巾部

3.1.1 基本原理

対数変換部の基本図を第3-1図に示す。

I_{C_1} の入力に I_s という電流が流れこんだ時、 I_{C_1} の出力、点Aの電圧を V_A とすると、以下のよう表わされる。

$$V_A = -RT_1/q (\ln I_s - \ln I_{e_1}) \dots\dots\dots 3-1$$

ここで R : ボルツマン定数 1.38×10^{-23} joules/K

T_1 : Q_1 の絶対温度 °K

q : 電子の電荷 1.6×10^{-19} coulomb

I_{e_1} : トランジスタ Q_1 の飽和エミッター電流

またこの時の点Bの電圧を V_B とすると以下の式で表わされる。

$$V_B = V_A + R T_2/q (\ln I_{Ref} - \ln I_{e_2}) \dots\dots\dots 3-2$$

T_2 : Q_2 の絶対温度 °K

I_{Ref} : 比較用電流

I_{e_2} : トランジスタ Q_2 の飽和エミッター電流

そこで $T_1 = T_2 = T$, $I_{e_1} = I_{e_2}$ とすると3-2式は以下のように変形される。

$$V_B = -RT/q (\ln I_s / I_{Ref}) \dots\dots\dots 3-3$$

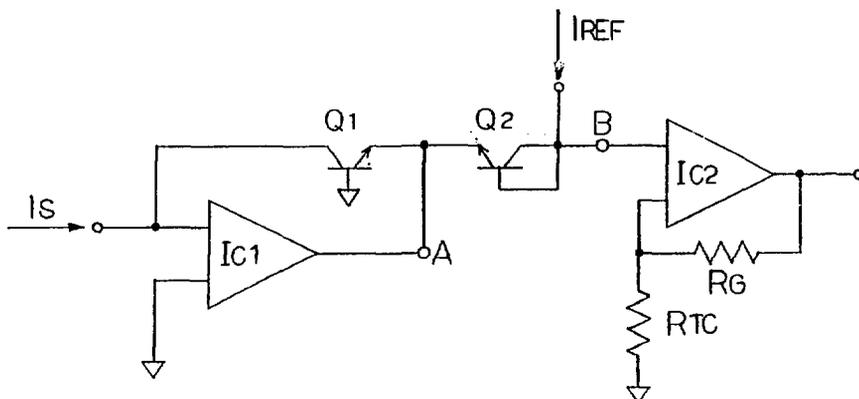
また $\ln (I_s / I_{Ref})$ は次のように変形される。

$$\ln (I_s / I_{Ref}) = \ln 10 \cdot \log I_s / I_{Ref} \text{ となるから, } 3-3 \text{ 式は}$$

$$V_B = - (RT/q) (\ln 10) (\log I_s / I_{Ref}) \dots\dots\dots 3-4$$

ここで温度を常温附近 ($\sim 300^\circ\text{K}$) とすると、 $-(RT/q) (\ln 10)$ の項の温度係数は約 $1/300^\circ\text{C}$ (約 $0.3\% / ^\circ\text{C}$) となる。

3-4式から V_B の電圧は入力電流と比較用電流の量の比を10を底とする対数変換された電圧となる。この電圧は次の段の I_{C_2} と R_G , R_{TC} により約16.7倍されて入力電流が1桁の変化をする毎に出力電圧は1Vの変化を示し出力されるが、 V_B はいま述べたように温度により変化するため、 I_{C_2} と帰還回路を形成している抵抗器 R_{TC} によりその変化分の補償をしている。即ち R_{TC} は 25°C で 955Ω の抵抗値をもつが、温度係数は $0.3\% / ^\circ\text{C}$ となっており、結果的に温度による出力電圧の変化は打ち消されて出力される。



第3-1図 基本回路図

3.1.2 微小電流入力に対する誤差

微小電流入力回路の誤差は、主に次のような事項により生ずる。

- 変換素子に起因する誤差
- 使用する集積回路の入力バイアス電流
- 入力部の配線、素子の取り付け等によるもの

変換素子による誤差をさけるためには、特性の良くあった素子を用い温度等の変化に対しても良くトラッキングするように考慮されたものを選択しなければならない。

入力バイアス電流は直接誤差として出力にあらわれてくるため、極力バイアス電流の少ないオペレーショナルアンプを使用することにより誤差は軽減される。

入力部の配線等への配慮としては、多くの本にも述べられているように、入力線の絶縁抵抗が問題になるため、必ずガードをしたり、テフロンターミナル等により絶縁を確保することである。又素子の取り付けも入力ラインについては基板より浮かす等の処置をすることが必要である。低い絶縁抵抗でも正確に電流を測定するためには、適切なガードを実施すると共に入力部に使用するオペレーショナルアンプの入力オフセット電圧が小さく且つオープンループゲインが大きくなければならない。多くの回路例ではこの点がしばしば無視されているので注意を要する。

3.1.3 付加回路

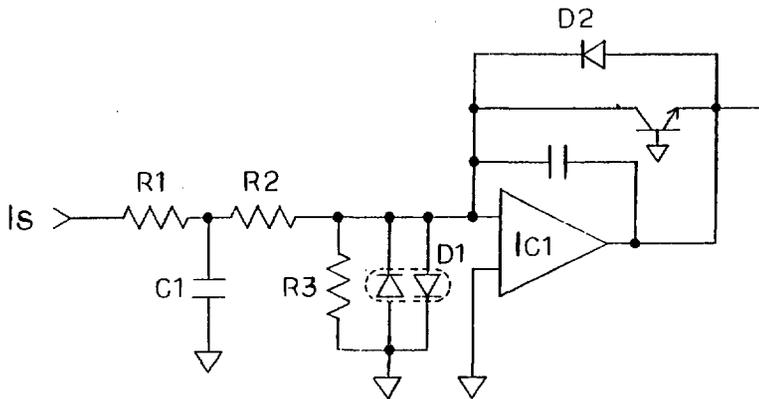
新設計対数増巾器は以上に述べた回路構成と留意点をもとに製作したが、入力部には第3-2図に示すような付加回路がある。これらの付加部品は以下のように3つの目的から設けられている。

- 入力段の保護
- 逆極性の入力に対し、回復をはやめる
- 入力に接続されるケーブル等の持つ容量の影響を切りはなす

サージ等による大きな信号の入力に対し、 R_1 、 R_2 、 C_1 および D_1 により保護作用を持たせている。 R_1 、 C_1 により瞬時的な入力信号を減衰させ、さらに R_2 により小さくするが、最終的に D_1 により低い電圧に落とし入力部のオペレーショナルアンプの保護を行う。

加速されたイオンビームが金属面に衝突すると多量の2次電子を発生する。正イオンを測定中に多量の2次電子が入り込むと対数増巾器 Ic_1 は逆電圧の出力をする。その電圧は D_2 がないとすると帰還側も出力側も高いインピーダンスのため、その電荷をにがすことができず、しばらくの間測定できなくなってしまう。 D_2 は D_1 及び R_3 を通し、この逆極性の電荷を放電させる素子である。

入力ラインにはしばしば同軸ケーブルが接続され、イオン電流測定装置に接続されている。その同軸ケーブルが短い場合は入力に接続される容量は小さいので、さほど問題にならないが、長い場合は Ic_1 の電圧増巾度と入出力の位相差によりひどい場合には発振をする場合もある。これを防止するため R_1 、 R_2 を挿入してある。これにより入力に約2千ピコファラッドの容量を付けても発振はおこさない事が確認されている。



第3-2図 付加回路図

3.1.4 対数増巾器部の部品選定

数ピコアンペアの入力電流を測定出来る素子は数多くあるが、そのうちでもオフセット電圧及びオフセット電圧ドリフトの少ないオペレーショナルアンプの中から選ぶこととし、接合電界効果型トランジスター入力型の素子であるパーブラウン社の“3528BM”を採用した。第2表に“3528BM”の特性表を示す。3528BMは入力バイアス電流、オフセット電圧とも非常に少なく最適な素子といえる。又この素子は、接合電界効果型トランジスターとバイポーラートランジスターの組み合わせによるハイブリッド型のオペレーショナルアンプである。

オペレーショナルアンプと接続し対数特性を作り出す素子として半導体のPN接合の電圧-電流特性を利用するが、その専用の素子としてアナログデバイス社製のログモジュール751P/Nが有りこれを使用した。このモジュールは1インチ角のパッケージの中に2ケのトランジスターと温度補

償用の抵抗を封入したものである。トランジスターには NPN のものと PNP のものがあり、負電流入力用と正電流入力用に使い分けている。

第 3 表に 751P/N の特性表を示す。

3.2 定電流電源部

試作対数増巾器は最大 $100\ \mu\text{A}$ まで測定を目標としており、入力電流が $100\ \mu\text{A}$ の時出力電圧が $0\ \text{V}$ になるようにしてある。この比較用の電流を作り出す部分が、定電流電源部である。まず $15\ \text{V}$ の電源からツェナーダイオードと抵抗器により正確に $1\ \text{V}$ を作り出し、それを抵抗器とオペレーショナルアンプで構成した定電流部に接続する。基準電圧部の出力はラッピングポストにより極性を切り換えられるようにしてある。オペレーショナルアンプのミキサーにはデュアルアンプ内蔵の集積回路 LF353A を使用した。この集積回路網の出力は、温度特性のよい $10\ \text{K}\ \Omega$ の抵抗器を通し対数増幅器の 2 段目に正確に $100\ \mu\text{A}$ 流し込むようにしてある。又集積回路まわりの抵抗器は温度によるトラッキングがずれないことが重要であるため、薄膜フィルム抵抗器が 1 パッケージにモールドされたものを使用している。

試作で良い結果が得られたので量産をした。量産型では RD-9A のツェナーダイオードのかわりに、ナショナルセミコンダクタ社の LM385H を使用した。これは標準で $1.235\ \text{V}$ の定電圧特性となるように設計された集積回路である。温度特性も $20\ \text{ppm}/^\circ\text{C}$ という非常に優れたものである。電源の出力インピーダンスを小さくするため、この出力を低い抵抗値の抵抗器で分割し、正確に $1.0\ \text{V}$ を作り出している。

4. 特 性

従来の対数増巾器の特性を第 3 図に示す。この対数増巾器は、温度変化に対する処置が充分でなく、昇温するにつれ誤差は大きくなる。 40°C の時入力電流が $1\ \text{nA}$ では出力電圧は基準値より $1\ \text{V}$ 以上 (入力換算 1 桁以上) の誤差を生じている。

第 4 図に試作対数増巾器の特性を示す。この対数増巾器では、昇温による誤差の発生は、従来の対数増巾器に比べかなり少なく、 $5\ \text{pA}$ 程度までは問題なく使用できる。又出力電圧は、入力電流がない時に電源電圧近くまでになるが、実用上正確な表示ではないので、出力にツェナーダイオードを入れ、電圧を $10\ \text{V}$ 以上ふれないようにしてある。同時にこのツェナーダイオードは、出力段のオペレーショナルアンプをサージ等から補護する役目をも持たせている。入力電流 $1\ \text{mA}$ まで動作することが確認されているが、現回路では出力電圧が逆となり、ツェナーダイオードの逆方向となり正確な出力電圧は得られない。ツェナーダイオードを外すか、比較用電流を $1\ \text{mA}$ にする必要がある。

参 考 文 献

1. 岡村勉夫 改訂 OP アンプ回路の設計
2. 辻井龍男 低入力電流 OP アンプの使い方と実装
3. 川上正志 電子回路 V

第1表 バーブラウン社4127ログアンプの特性

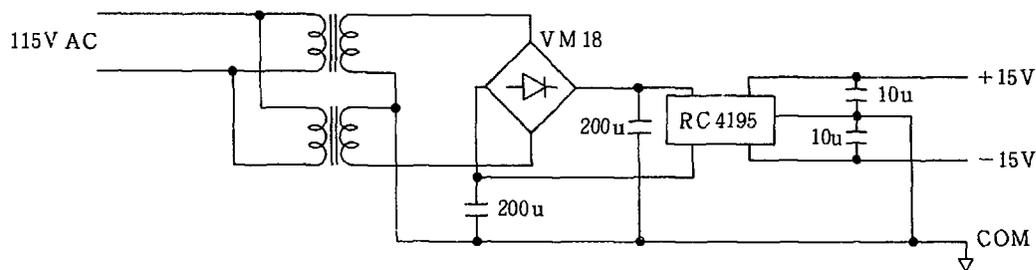
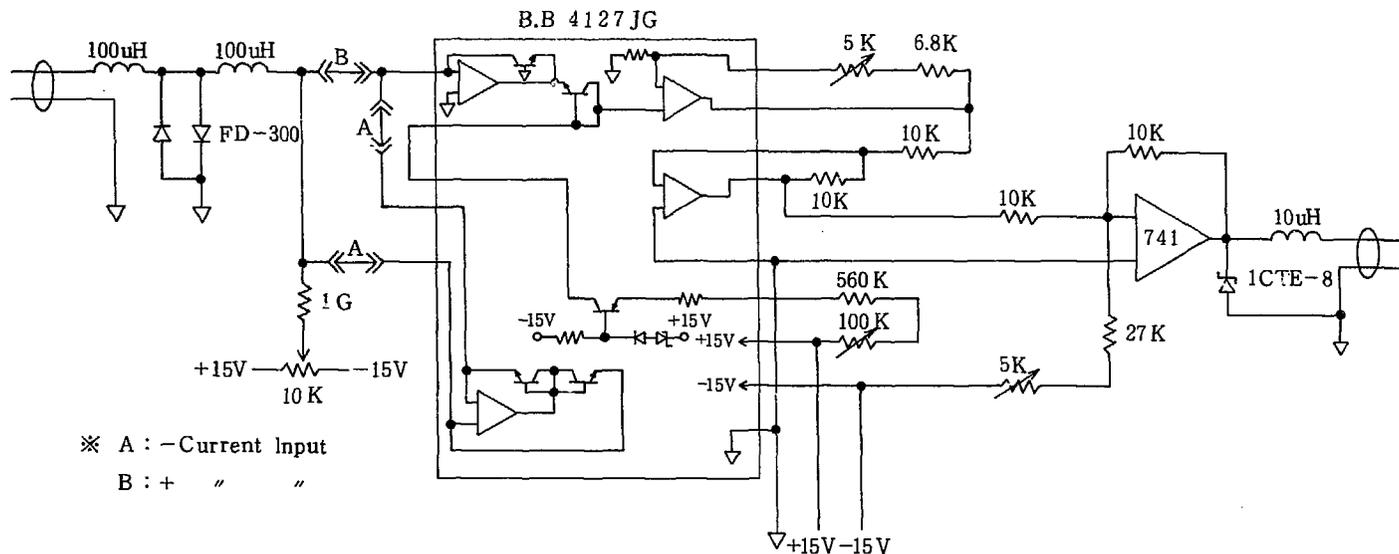
		4127KG	4127JG
ACCURACY			
Current Input	1nA - 1mA	0.5% max	1.0% max
Voltage Input	1mV - 10V	0.5% max	1.0% max
INPUT			
Current Input	Pin 4	+1nA - +1mA	
	Pin 7	-1nA - -1mA	
Ref. Current Input	Pin 2	+1 μ A - +1mA	
Absolute max Input		± 10 mA OR \pm supply volts	
OUTPUT			
Voltage		± 10 V	
Current		± 5 mA	
Impedance		10 Ω	
STABILITY			
Input Offset Current Drift		10pA at +25°C	
Input Offset Voltage Drift		$\pm 10\mu$ V/°C	
TEMPERATURE RANGE			
Specification		0°C - +60°C	
Operating		-10°C - +70°C	
POWER SUPPLY			
Rated Supply Voltage		± 15 VDC	
Supply Voltage Range		± 14 VDC - ± 16 VDC	
Supply Current Drain		± 20 mA - ± 26 mA	

第2表 パープラウン社3528BMの特性

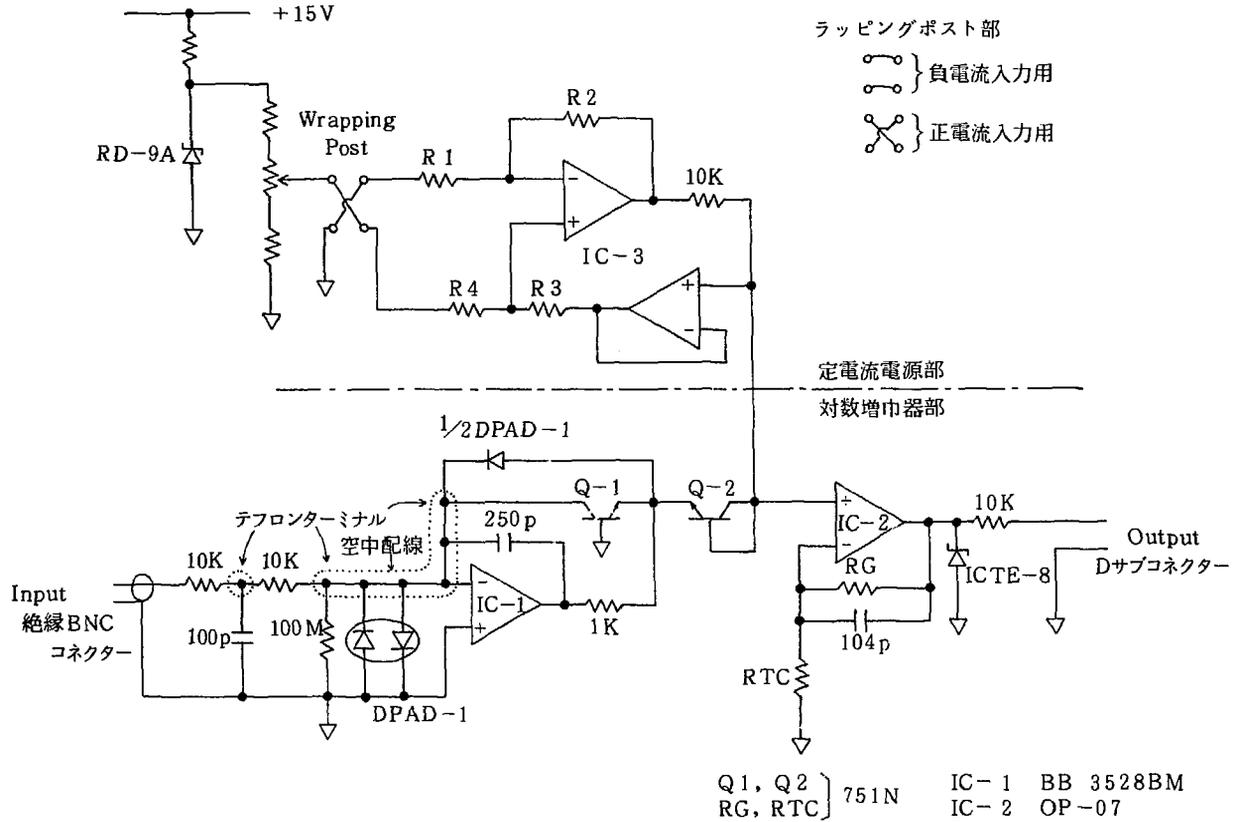
	MIN	TYP	MAX
OPEN LOOP GAIN $R_L \geq 2K$ $R_L \geq 10K$	92dB 100dB	95dB 114dB	
RATED OUTPUT Voltage $R_L = 2K\Omega$ $R_L = 10K\Omega$ Current $V_o = \pm 10V$	$\pm 10V$ $\pm 12V$ $\pm 5mA$	$\pm 12V$ $\pm 13V$ $\pm 10mA$	
INPUT OFFSET VOLTAGE Initial Offset $T_A = 25^\circ C$ vs Temperature $-25^\circ C \leq T_A \leq +85^\circ C$		$\pm 100\mu V$ $\pm 2\mu V/^\circ C$	$\pm 250\mu V$ $\pm 5\mu V/^\circ C$
INPUT BIAS CURRENT Initial $T_A = 25^\circ C$ at Temperature at $T_A = 85^\circ C$		$-20pA$	$-150fA$ $-50pA$
INPUT IMPEDANCE Differential	$10^{12}\Omega // 0.8pF$		
INPUT VOLTAGE RANGE Common-mode Voltage Range Linear Operation	$\pm (V_{CC} - 3)V$		
POWER SUPPLY Rated Voltage Voltage Range Current	$\pm 5V$	$\pm 15V$ $1mA$	$\pm 20V$ $1.5mA$
TEMPERATURE RANGE Specification Operation	$-25^\circ C$ $-55^\circ C$		$+85^\circ C$ $+125^\circ C$

第3表 アナログデバイス社751P/N
ログモジュールの特性

	751P	751N
TRANSISTORS		
Maximum Ratings		
V_{EBO}	5V	4V
V_{CBO}	40V	40V
V_{CEO}	40V	25V
I_C	0.05A	0.1A
P_D	0.5W	0.3W
Current Gain $I_C = 10\mu A$	$H_{fe1}, H_{fe2} \geq 100$	
Transistor Match	$ V_{BE1} - V_{BE2} < 0.5mV$ $I_{pA} < I_{C1} = I_{C2} < 0.1mA$	
RESISTORS		
$R_{TC} = 955\Omega \pm 1\%$ at 25°C, +0.3% /°C		
$R_e = 15K\Omega \pm 2\%$ Selected		
TEMPERATURE RATINGS		
Operating	-25 to 85°C	
Storage	-55 to 100°C	

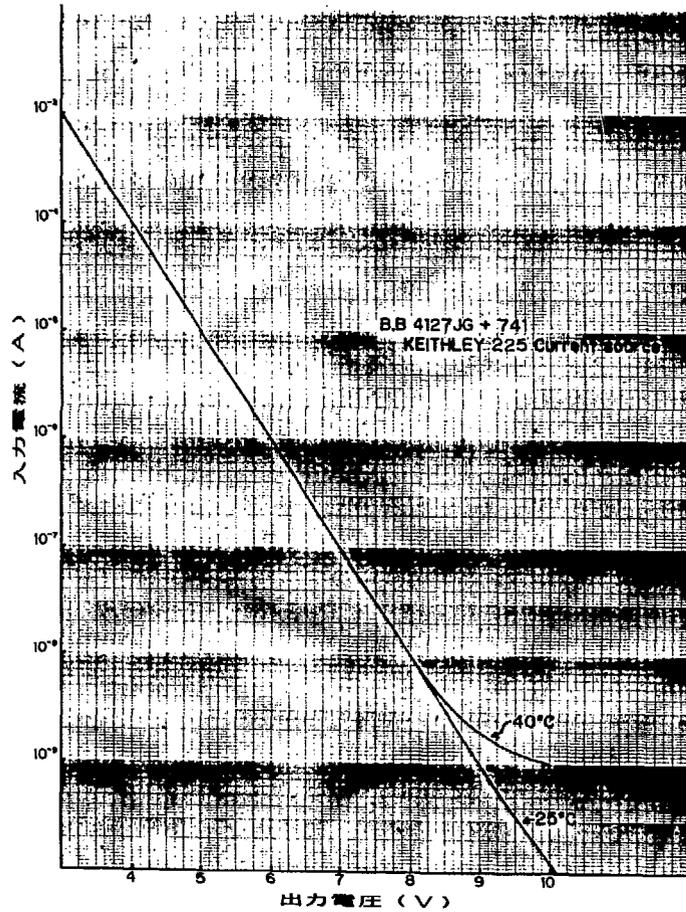


第 1 図 4 1 2 7 を使用した対数増幅器の回路図

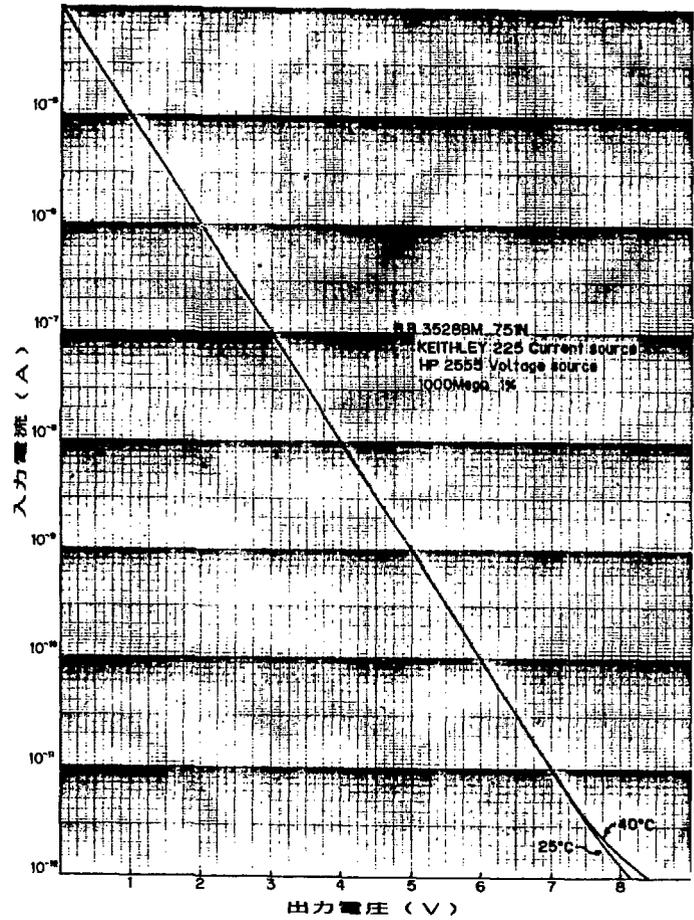


※ 図中±15Vの電源供給線とそのバイパスコンデンサーは省略されている。

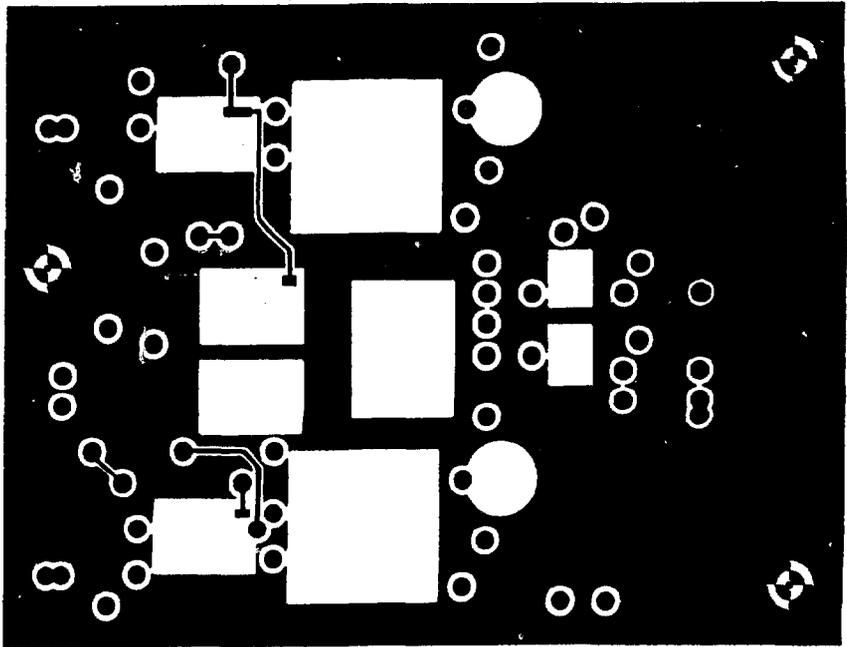
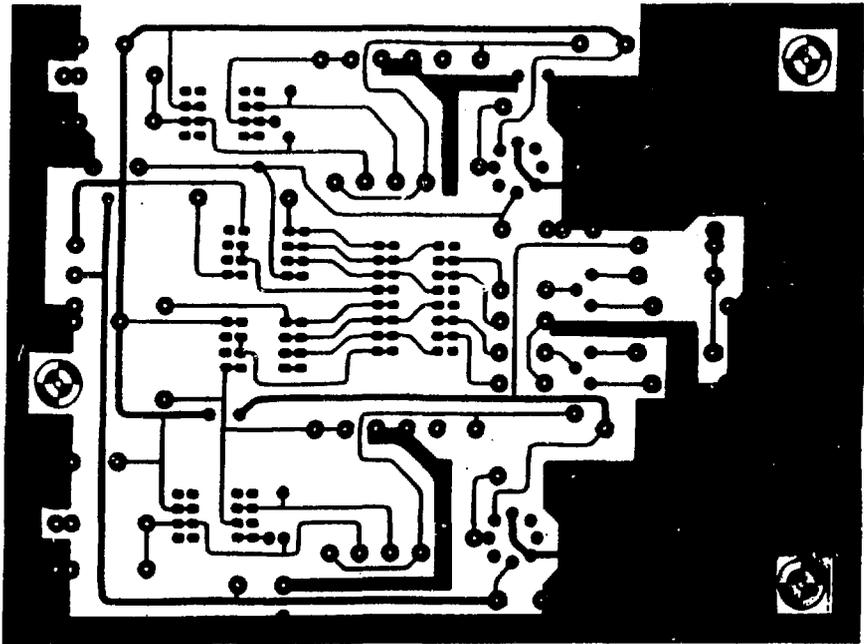
第2図 新設計対数増幅器の回路図



第3図 従来の対数増幅器の特性例



第4図 試作対数増幅器の特性例



第5図 試作対数増幅器のアートワーク図