LTP レジンモールドトランジスタの開発

Development of Plastic Moled LTP Transistors

山 本 雅 幸*
Masayuki Yamamoto

史***

佐藤和夫* Kazuo Satô 渡 辺 寛**
Yutaka Watanabe

古 賀 康 Yasuo Koga

山田栄一*** Eiichi Yamada 若島喜昭***
Yoshiaki Wakashima

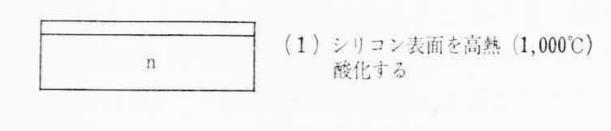
要旨

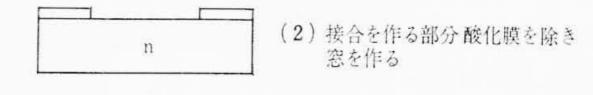
新しく開発した LTP (Low Temperature Passivation) 膜およびモールドレジンによって,低雑音 LTP トランジスタのレジンモールド化に成功した。レジンモールドトランジスタでは動作時および高温高湿ふんい気中の特性変動,熱サイクル時の内部断線が信頼度面での主要な問題点であるが,これらは加熱加電安定性および耐湿性のすぐれたリンアルミ LTP 膜の開発と,耐湿性がすぐれ熱ストレスの少ないモールドレジン材料の開発によって解決された。さらに LTP 膜生成前にシリコン表面の熱ひずみなどの欠陥層を除去することによって雑音が低くなることを見いだし,量産性のすぐれた,良好な低雑音特性を有する 2 SC 458 L 3 L 3 L 3 L 3 L 3 L 4 L

1. 緒 言

シリコントランジスタ, ICの製造をささえている基本的な技術 はアメリカウェスタンエレクトリック社(Western Electric)の選択 拡散特許と同じくアメリカフェアチャイルド社(Fair Child)のプレ ナー特許である。図1のようにプレナーは選択拡散の改良特許とも いえるものであるが、それまで困難とされていた半導体素面の安定 化に成功したはじめての実用技術で,これによってレジンモールド 化や、ICの製造が可能になり高い特許使用料にもかかわらず世界 的に用いられている。 こうした中にあって日立製作所では昭和36 年以来シリコン表面安定化技術の研究,開発にとりくみ38年にはプ レナーとは異なる LTP の基本的発明が日立製作所中央研究所の徳 山博士によりなされた。この技術をもとに日立製作所武蔵工場にお いて製品開発が着手され 39 年以後いくつかの特長ある LTP トラン ジスタが製品化された。この間プレナー技術も改良が加えられ,同 時に半導体モールドレジンの開発も精力的に進められ,40年にはレ ジンモールドがシリコントランジスタの主流を占めるようになり, これの低価格,高性能,量産性は,ゲルマニウムからシリコンへの移 行の原動力となった。このことは同時に民生機器のトランジスタ化 をうながし、従来真空管によっていた高級ステレオ、テープレコー ダなども続々トランジスタ化され, 低価格でしかも高性能トランジ スタの要求が強くなった。ことにプリアンプ部分に使用される低周 波小信号トランジスタは,高電流増幅率,雑音の低いことが主要な 特性でプレナーでも実現は困難とされていた。こうした背景にあっ て,低周波低雑音レジンモールドLTPトランジスタの開発がなされ た。本トランジスタの開発にあたっては

- (1) 10 Hz から 20 kHz までの広い帯域にわたって低雑音であること。
- (2) コレクタ電流 $100 \mu A$ の低い動作レベルにおいても増幅率 が高いこと。
- (3) 出力 200 mW の最大定格動作時においても特性変動のないこと。
- (4) 高温高湿(40℃, 95% R H) ふんい気に長時間おいても特性 が劣化しないこと。
- * 日立製作所武蔵工場
- ** 日立製作所日立研究所 理学博士
- *** 日立製作所中央研究所







(1)(2)(3)(4)は選択拡散技術 これらの酸化膜をそのまま表面保護膜として用いるのがプレナー技術

トランジスタを作る

図1 シリコントランジスタの基本特許

(5) 周囲温度の変動による温度ストレスを受けても断線などの 致命的な劣化を起こさないこと。

を主要な目標とした。(1)(2)は LTP プロセスの改良, (3)(4)は新しい LTP 膜の開発, (4)(5)はモールドレジンの開発により達成された。以下これらの基本的な製造技術と、得られたトランジスタの特性を中心に述べる。

2. LTP トランジスタの低雑音化

トランジスタの雑音は雑音指数 (NF) であらわされるが、約1kHz 以下の周波数では周波数に逆比例して高くなるいわゆる 1/f 雑音がおもなものとなり、音声増幅のように 10 Hz までの低周波を増幅する HiFi 音響機器用トランジスタにとっては、この 1/f 雑音の低いことが最も基本的な特性である。 1/f 雑音はトランジスタのエミッタベース接合のわずかな不完全性によっても発生するきわめて構造敏感な特性であり、これの減少については半導体表面現象の解明と同様多くの努力が払われてきた。接合の不完全性は

- (1) 結晶あるいはエピタキシャル層中の欠陥
- (2) 拡散処理中の不要不純物の拡散
- (3) 選択拡散時に、熱酸化膜とシリコンの熱膨張係数の違いによってシリコン表面に起こされた熱ひずみ
- (4) 同じく熱酸化膜とシリコンでの不純物の拡散係数の違いか

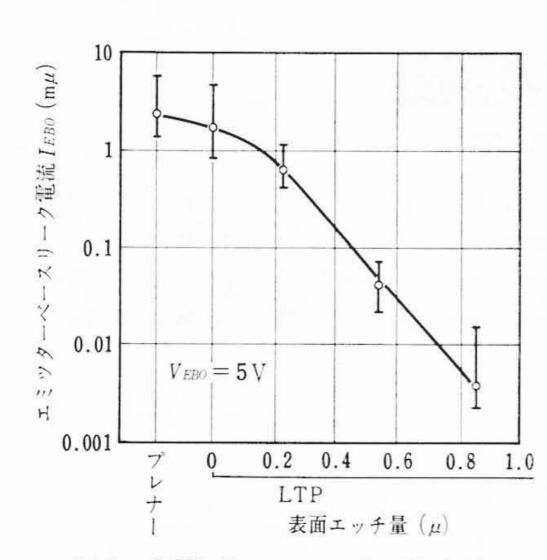


図2 LTP 前シリコン表面除去量と エミッターベースリーク電流

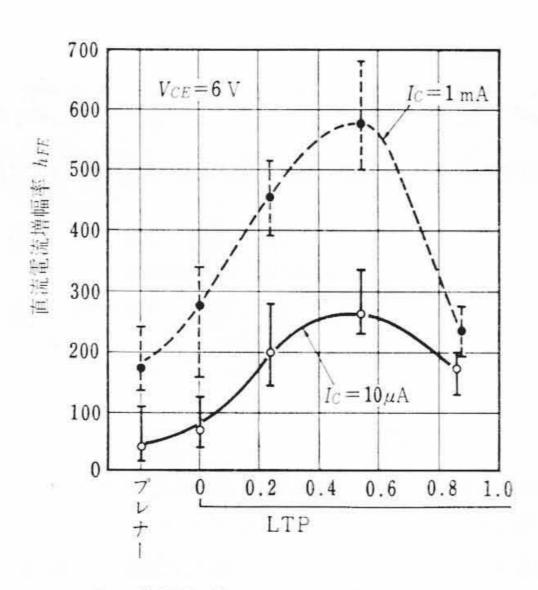


図3 LTP 前シリコン表面除去量と 直流電流増幅率

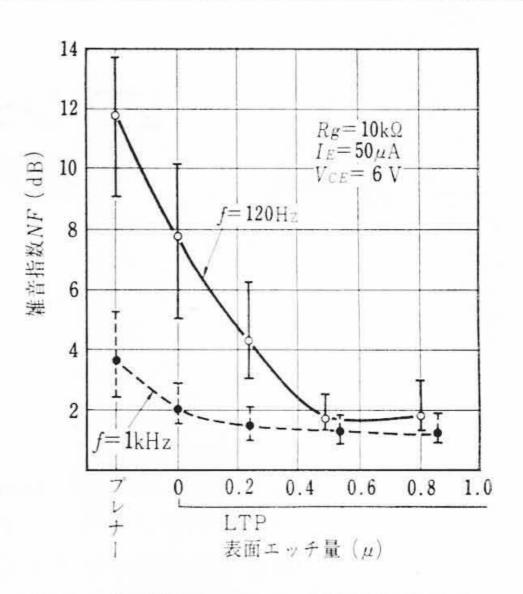


図4 LTP 前シリコン表面除去量と 低周波雑音特性

らくるベース領域での不純物の堆積(たいせき)あるいは 欠乏

(5) 表面安定化膜中およびシリコン-表面安定化膜,界面でのトラップ中心

などにより起こされると考えられているが, (1)(2)は結晶成長, 拡散のクリーンプロセス化をはじめとする材料処理技術の進歩によ って、少しずつではあるが改善されつつある。(5)は表面安定化膜 の性質によるものであるが、リン処理などの導入によって成果があ らわれつつある。これに対して(3)(4)項は選択拡散のために形成 された高温酸化 (1,000 度以上) 膜をそのまま残して表面安定化膜と して用いるプレナープロセスではさけられぬ現象である。LTPでは 表面安定化膜は850度以下の低い温度で形成されるため上記のよう なことは起こりにくい。また LTP 前のシリコン表面処理によって 接合の不完全性を除き,低雜音化することができる。この処理の一つ であるLTP膜生成前のウェーハの表面除去量とトランジスタの特 性との関係を示したのが図 2, 3, 4 である。エミッターベースリー ク電流(I_{EBO})は大幅に減少し表面でのリークの原因となっている不 完全な接合部分が除かれてゆくことが示されている。不完全接合部 分は同時にキャリヤのトラップ中心としても働き,電流増幅率 (h_{FE}) を下げ、雑音を大きくするおもな原因となるが、表面除去によって これらの欠陥をなくし高電流増幅率, 低雑音という低周波トランジ スタの基本的特性を大幅に向上させることができる。 hfe は過度の 表面除去によりふたたび減少するがこれは注入効率の減少と考えら れる。この表面除去法は雑音の大幅な低減のみならず、雑音指数の 信号源抵抗依存をも制御できる特長をもっている。

3. LTP トランジスタのレジンモールド化

レジンモールドは気密封止とは異なり、素子はモールドレジンに かこまれているので次のような点を考慮しなければならない。

- (1) 動作中の素子はレジンに含まれるイオン性物質の影響を受けやすく、LTP 膜はより安定な加熱加電特性をもたねばならない。
- (2) 良好な耐湿特性は、吸湿性、透湿性の少ないモールドレジンによることはもちろん、LTP 膜もまた耐湿性のすぐれたものでなければならない。
- (3) 従来レジンモールドの部品としての大きな欠点は冷熱サイクル時の断線であるといわれており、レジンはこの点を解決したものでなければならない。

そしてこれらはすべて量産性のあるものでなければならない。以下 LTP レジンモールドトランジスタ製品化にあたってのかぎとなっ たLTP 膜およびモールドレジン技術について述べる。

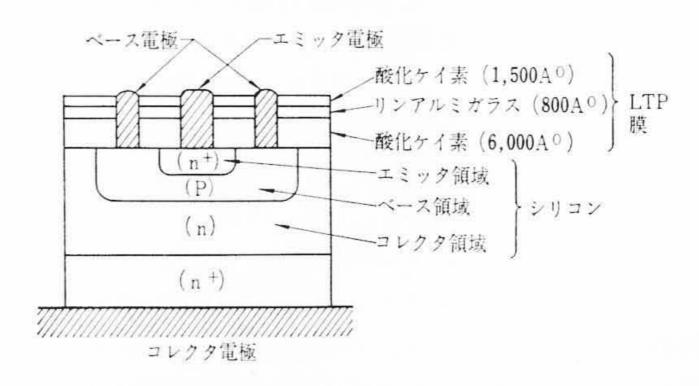


図5 LTPトランジスタ断面図

3.1 L T P 膜

LTP 膜は3層構造をとりそれぞれの層は次のような機能をもっている。

- (1) 第1層; シリコン上に直接形成される低温生成シリカ膜で,素子界面に不要なエネルギー準位を作らないためのものである。
- (2) 第2層; LTP 膜の信頼性を決める低温生成ガラス層で ある。
- (3) 第3層;ホトレジストとの密着性を良くし,加工性を向上させる低温生成シリカ膜である。

これらのうちレジンモールド用 LTP 膜としては第2ガラス層の性 質が重要である。表面安定化膜としてのリンガラスはプレナー特に レジンモールドプレナーの加熱加電安定性を大幅に向上させ、ほと んどすべての素子の高信頼化のために用いられている。筆者らはま ず LTP 膜のリンガラスによる安定化を試みた。LTP 素子の電気特 性上の特長を生かすためには低温処理が必要であり, こうしたリン ガラスも850度以下の温度で形成されねばならない。800度での リンガラスも加熱加電安定性は十分すぐれていることは確かめられ たが、レジンモールドしたときの耐湿性はきわめて悪いものであっ た。これは低温形成のリンガラスの吸湿性によるものであり, リン ガラスの加熱加電安定性をそこなはずに耐湿性を向上させる方法を 見いだすことを中心に種々ガラスを検討した。リンガラスの耐湿性 を改良するためには、単にリンガラスの外側に耐湿のすぐれたガラ ス層を形成するだけでは不十分で、結局リンを低温でガラス化し、 しかも耐湿性の良いガラスになる添加物を見いだすことにしぼられ た。こうした性質をもつものとしてはアルミがあり、最終的には 図 5 に示した構造がレジンモールド用 LTP 膜として最適なること が見いだされた。このガラス層はエッチ速度の変化と、電子顕微 鏡、電子回折による解析から図るのような構造をもつものと考えら れ、リン-アルミーシリカの二つのガラス層が耐湿性を向上させて

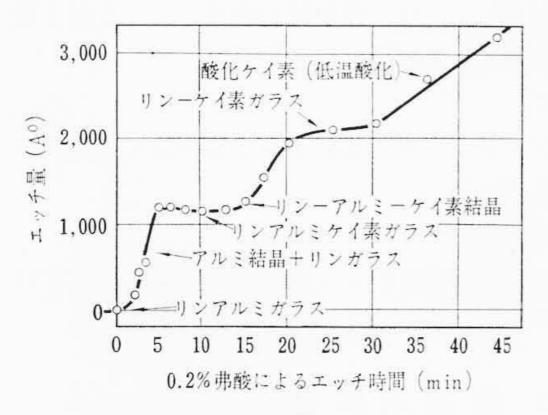


図6 LTP膜のエッチ特性

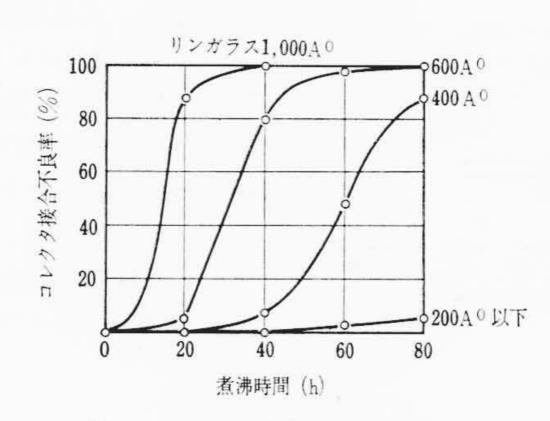
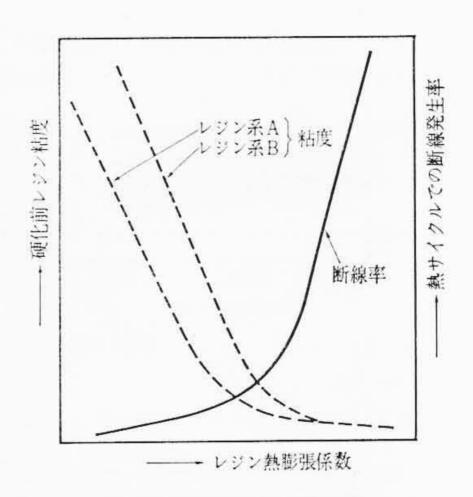


図7 リンガラス厚さと素子耐湿性



(前の粘性およびこのレジンでモールドさ れた素子の熱サイクルでの断線発生率)

図8 レジンの熱膨張係数と硬化

表 1 MOS 容量の加熱加電安定性

項	目 記	号 值	単 位
初期値(電材組み)	を だて後) NFB	0.5~12×10 ¹	1 atoms/cm ²
+BT 処 理 受	動* $+ JN_F$	約 0.1×10 ¹	1 atoms/cm ²
-BT 処 理 受	動 $-4N_F$	·B 約 0.1×10 ¹	atoms/cm ²

* BT 処理 電界 105 Volt/cm (シリコン側 +) 温度 320℃ (空気中) 時間 30分

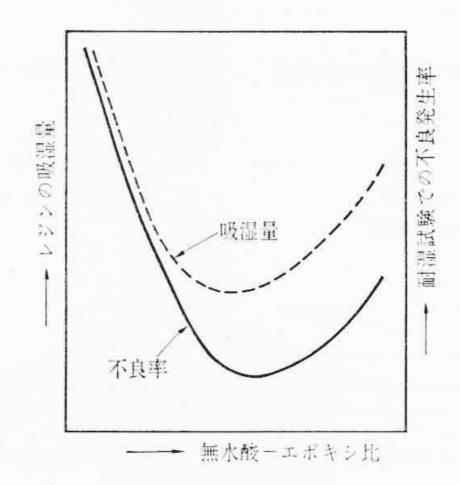
表2 モールドレジン特性一覧表

		the state of the s	the same transport of	
項	目	記号	測 定 条 件 値	単位
	電率 本損失	tan ô	30°C 1 M Hz 4.2~ 30°C 1 M Hz 1.3~1.4	
体積	抵抗	p can "	30℃ DC 100V 1 分值 10 ¹⁵ ~	
曲げる	単性率	E	30℃ 11.1×	10-4 kg/cm ²
線膨引	長係 数	α	温室 ~100℃ 32~36	×10−6 /°C
熱変刑	1 温度		ASTM D684 (a) 165~	162 ℃

いると思われる。この構造でも厚いリンガラス層は素子の耐湿性を悪くし、加熱加電安定性とのかねあいから最適の厚さは決められる。図7にはリンガラス厚さと煮沸時間による素子特性劣化の関係を、表1には MOS で測定された実効表面ドナー濃度と、BT処理による濃度の変化を示している。実効表面ドナー濃度は、膜中のナトリウムなどの移動しやすいイオンの量をほぼ示しているといわれ、リンアルミガラスでは、こうしたイオンも少なくまた電界によって移動することもなく、動作安定性もきわめてすぐれていることがわかる。

3.2 モールドレジン

トランジスタモールド用レジン開発にあたっては、作業性をはじ め,広く素子の信頼性面から検討されねばならない。この点につい ては筆者のひとり渡辺氏らによる報告があるので、本報ではおもに 断線と、耐湿性について述べる。レジンモールドトランジスタの生 産量が急増するにつれ明らかになった問題の一つに断線不良があ る。断線はおもに素子が冷熱サイクルを受けるときに発生し、機器 の誤動作をまねくので、不良率は5×10⁻⁸/h以下のレベルが要求 される。これは1万本のトランジスタを5,000時間使用したときに 不良の発生は1個以下ということで、こうした不良発生は工程の品 質管理体制に依存するが、 レジン材料もまた十分吟味されたもので なければならない。レジンの性質中素子の内部構造に熱ストレスを 与える因子はいくつか考えられるが、 最も強い相関をもつものとし てレジンの熱膨張係数がある。図8はその一例である。不良率は、 冷熱サイクルの温度幅および温度衝激の程度によって変わるが、熱 膨張係数の低下により減少する。一般に低熱膨張レジンは多量の充 てん材を含んでおり、したがって硬化前レジンの粘度が高くキャス トが困難になることが多い。しかしながら粘度、熱膨張の関係はレ ジン、充てん材の種類によって変わり、その意味で目的にあう材料 を選ばねばならない。次に耐湿性についても、近年要求はきびしく



(レジンの吸湿量およびこのレジンでモールドされた素子の耐湿試験での不良率)

図9 レジン中の無水酸-エポキシ比率

なりつつあり、ベースレジン、硬化剤、着色剤についても種々の角度から検討されているが、こうした材料面での検討以外にも、たとえばベースレジンと硬化剤の配合比のめやすとなる酸-エポキシ比によっても耐湿性はかわり、また素子の耐湿性もそれに従って変わってくる(図9)。このようにして得られたモールド用レジンの性質を示したのが表2である。

LTP レジンモールドトランジスタの信頼性は以上のような、LTP 膜およびモールドレジンの開発により得られたが、これらのうち、特に重要な動作試験、耐湿試験における電流増幅率、コレクターベースリーク電流の寿命特性を示すと図 10 のようになる。 なお断線率については $1\times10^{-8}/h$ 以下に達しており、卓上電子計算機などのきびしい要求をも満たしている。

4. LTP レジンモールドトランジスタの製造方法

製造工程の概略は次のとおりである。

(1) 拡散接合の形成

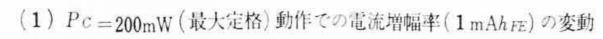
N形のエピタキシャルウェーハ(エピタキシャル層の結晶比抵抗 $2.5\sim4.0~\Omega$ cm) を用いベース, エミッタは選択拡散によって形成される。なお拡散不純物はベースはP形のボロン, エミッタはN形でリンである。

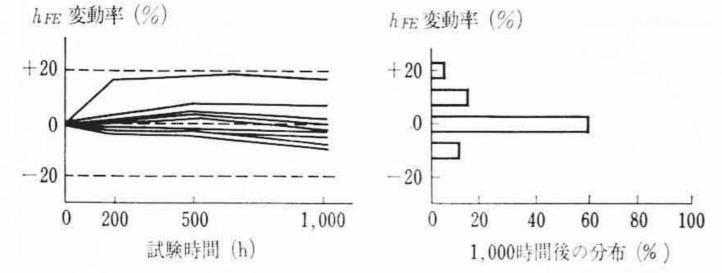
(2) LTP 膜の形成

選択拡散に用いられた熱酸化膜はすべて取り去られ、さらにシリコン表面を化学エッチングによって 0.2~0.3 μ 削り取り前述の方法によって LTP 膜が形成される。

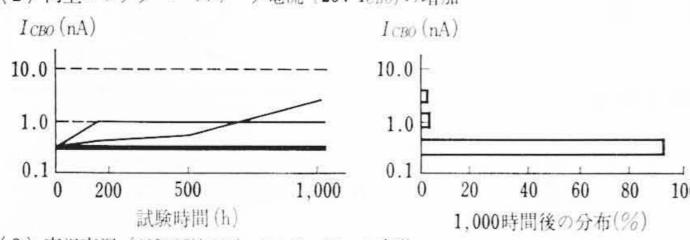
(3) 電 極 形 成

エミッタ,ベース電極となる部分のLTP膜をホトレジストを 用いて化学エッチで取り去り、アルミニウムを蒸着し電極を形成 日

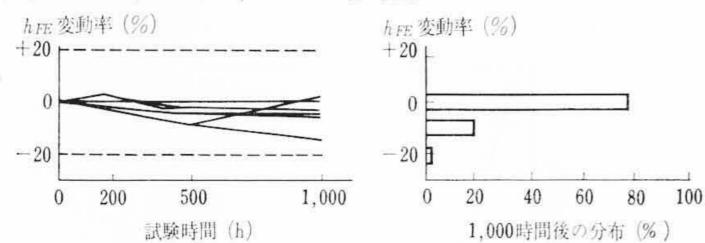




(2) 同上コレクタベースリーク電流 (20V IcBo)の増加



(3) 高温高湿 (40℃95% RH) での 1mAh FEの変動



(4)同上20V ICBO の増加

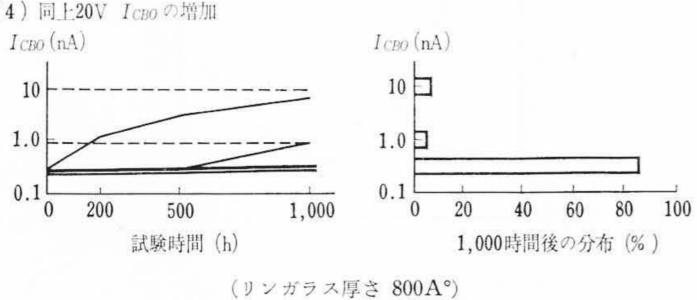


図 10 2 SC 458 L の信頼度試験結果

(4) 組 立 て ペレットは日立レジンモールド方式によって組み立てられ,レ

の素子(ペレット)に分離される。

ジンでモールドされる。

する。電極形成されたウェーハは、静特性が検査され、1個1個

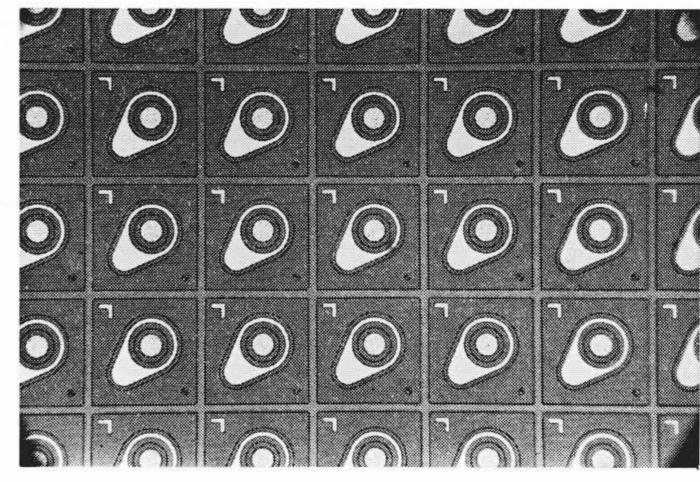
(5) 特性検査

2SC 458L系は種々の雑音特性をもつものに分類される。図11 は電極付後のウェーハおよび完成品を示したものである。

5. 電気的特性

2 SC 458L系は音響機器, テレビ用をはじめとして, 広い用途をも っているが、各品種の特長用途は概略次のようになっている。

- (1) 2 SC 458 LG……低周波雑音が特に低く,電流増幅率が高い のでオーディオのプリアンプ初段用に適している。
- (2) 2 SC 458(L)……低周波雑音が低く,電流増幅率が高くプ

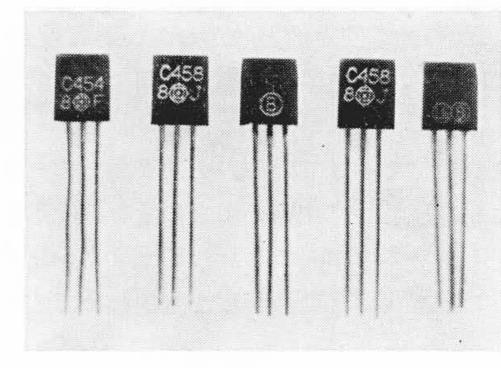


電極付後のウェーハ

(×50 倍)

表3 2 SC458(L) 系主要電気的特性 (1) 最 大 定 格 (Ta=25℃)

項	E	1	記号	2SC458 (L)系	単 位	
コレク	タ・ベ ー ス 電	圧	V_{CBO}	30	V	
コレクタ	レクタ・エミッタ電圧		V_{CEO}	30	V	
エミッ	ミッタ・ベース電圧		V_{EBO}	5	V	
コレ	ク タ 電	莊	I_C	100	mA	
エ	ッ タ 電 流		I_E	-100	mA	
許 容 コ	レクタ損	失	P_C	200	mW	
接 合	部温	度	T_{j}	125	°C	
保	子 温	度	T_{stg}	$-55 \sim +125$	℃	



(×1.5 倍) 完 成 図 11 2 SC 458 L 系

(2) 電気的特性 (Ta=25℃)

品種	項目	記号	測 定 条 件	最小值	標 準 値	最大值	単 位
2SC454 (L) 2SC458 (L) 2SC458 LG	コレクタ・ベース破壊電圧	BV_{CBO}	$I_C=10 \ \mu\text{A}$ $I_E=0$	30			V
	コレクタ・エミッタ破壊電圧	BV_{CEO}	$I_C=1 \text{ mA}$ $R_{BE}=\infty$	30	-W-1/5		V
	エミッタ・ベース破壊電圧	BV_{EBO}	$I_E = 10 \ \mu A$ $I_C = 0$	5			V
	コレクタ遮断電流	I_{CBO}	V_{CB} =18 V I_E =0			0.5	μA
	エミッタ遮断電流	I_{EBO}	$V_{BE}=2 \text{ V}$ $I_{C}=0$			0.5	μA
	直流電流増幅率	h_{FE}	V_{CE} =12 V I_C =2 mA	60		500	
	コレクタ・エミッタ飽和電圧	$V_{CE}({\rm SAT})$	$I_C=10 \text{ mA}$ $I_B=1 \text{ mA}$		0.15	1.1	V
	ベース・エミッタ電圧	V_{BE}	V_{CE} =12 V I_{C} =2 mA		0.62	0.75	V
	利 得 帯 域 幅 積	f_T	V_{CE} =12 V I_{C} =2 mA		300		MHz
	コレクタ出力容量	C_{ob}	V_{CB} =10 V I_{E} =0 f =1 MHz		1.8	3.5	PF
2SC454 (L)	高 周 波 利 得	P_G	V_{CE} =6 V I_C =1 mA f =10.7 MHz		28		d b
	入力アドミッタンス	Yie	$V_{CE} = 12 \text{ V}$ $I_{C} = 2 \text{ mA}$ $f = 10.7 \text{ MHz}$		0.35+j0.07		mσ
	出力アドミッタンス	Yoe	V_{CE} =12 V I_{C} =2 mA f =10.7 MHz		0.006 +j0.02		mυ
2SC458 (L)	雑 音 指 数	NF	V_{CE} =6 V I_{C} =0.1 mA f =1 kHz R_{g} =500 Ω		4	10	d b
2SC458 LG	雜 音 指 数	NF	$V_{CE} = 6 \text{ V}$ $I_{C} = 0.1 \text{ mA}$ $f = 120 \text{ Hz}$ $R_{g} = 500 \Omega$		3	5	d b

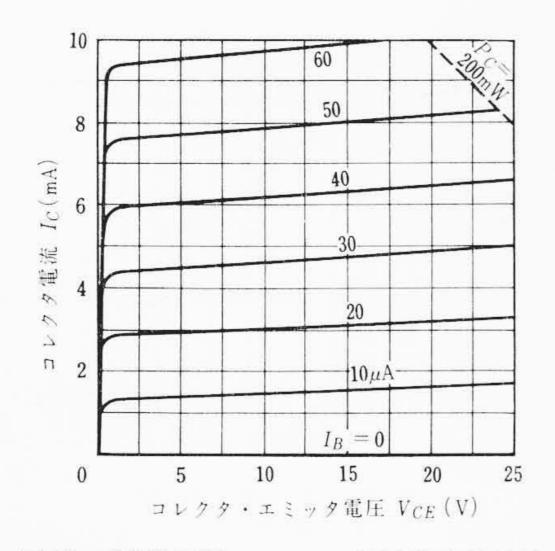


図 12 2 SC 458 L エミッタ接地出力静特性

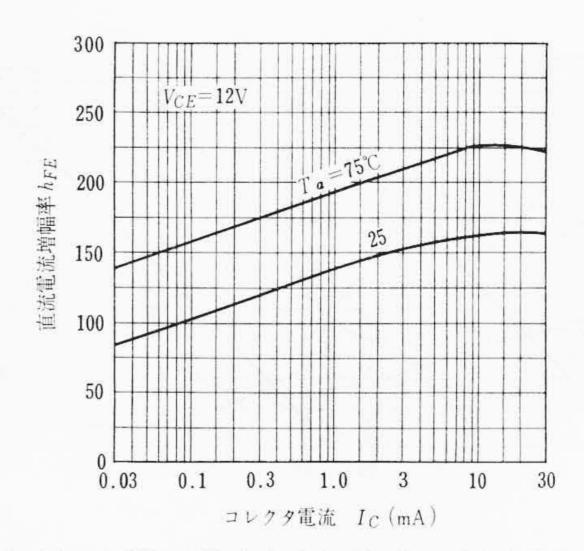
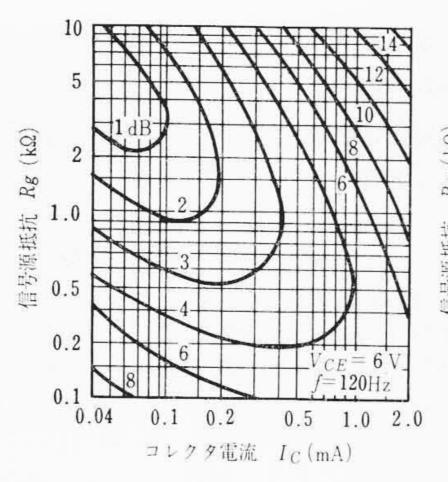
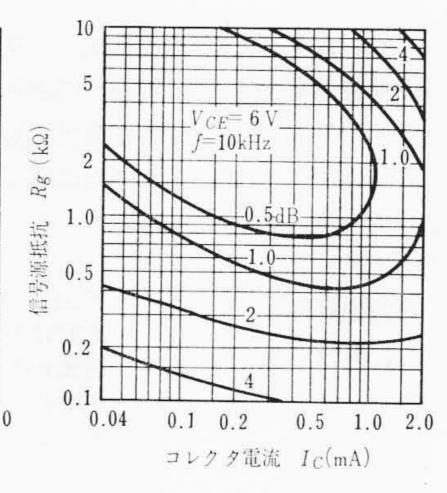


図 13 2 SC 458 L 直流電流増幅率の電流依存性





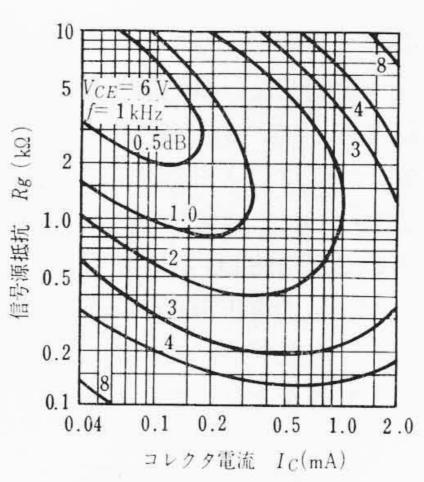


図 14 2 SC 458 LG 雜 音 特 性

リアンプをはじめ、各種小信号増幅に適している。

(3) 2 SC 454(L)……高出力インピーダンス特性をもちラジオ,テレビの中間周波増幅用に適している。

これらの主要電気特性を示したのが表3である。

5.1 静 特 性

2 SC 458 L の V_{CE} – I_C 特性を図 12 に、電流増幅率の I_C 依存性を図 13 に示す。 これらは小信号増幅用トランジスタとしての基本的な特性である。電流増幅率は、トランジスタのベース幅を狭くすることによって高くするのが一般的であるが、LTPトランジスタではエミッタ接合が良好なので、広いベース幅でも高い電流増幅率が得られ、出力インピーダンスが高く、微小電流レベルでの増幅度も高く、接合リーク電流が低いなどによって、低周波から高周波にわたっての増幅用としての良好な特性を有している。

5.2 低周波雑音特性

LTP トランジスタ特長を最もよく生かしたものが低周波雑音特性である。 雑音には周波数依存性のほか入力抵抗 (R_g) , 動作電流 (I_c) 依存性があり、これらを図 14 に示した。2 SC 458 LG は NF の低い範囲が広いので、広い範囲の用途をもつプリアンプに使用することができる。

6. 応用回路例

2 SC 458 L 系は広い応用範囲をもっているが,ここでは特に低雑音特性の要求される HiFi 音響機器のプリアンプーイコライザの例をあげる。 図 15 は NFB 形 3 段直結イコライザアンプの回路例である。初段および二段目のトランジスタは特に低雑音特性のすぐれた 2 SC 458 LG が用いられる。 また N F の R_g – I_c 依存性から,最適の動作条件に設定せねばならず,本回路例では一般のムービングマグネット形カートリッジの出力抵抗 $1\sim5$ k Ω (1 Hz) にあわせるため,動作レベルを 100 μ A としている。三段目のトランジスタはイコラ

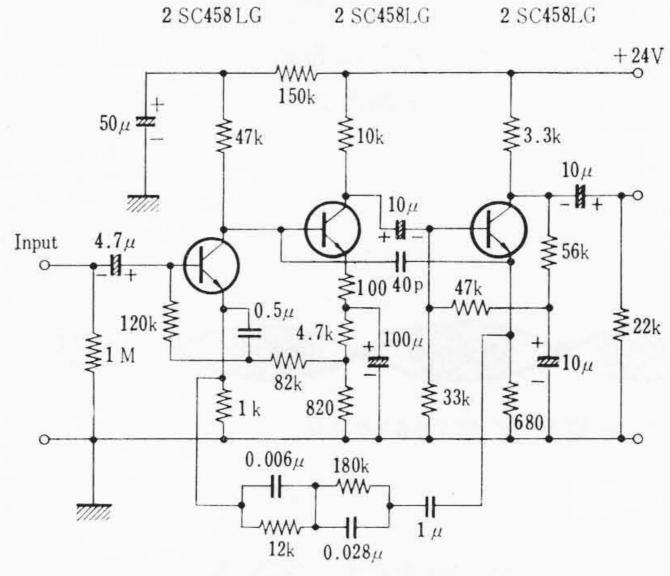


図 15 2 SC 458 LG 使用のプリアンプイコライザ回路

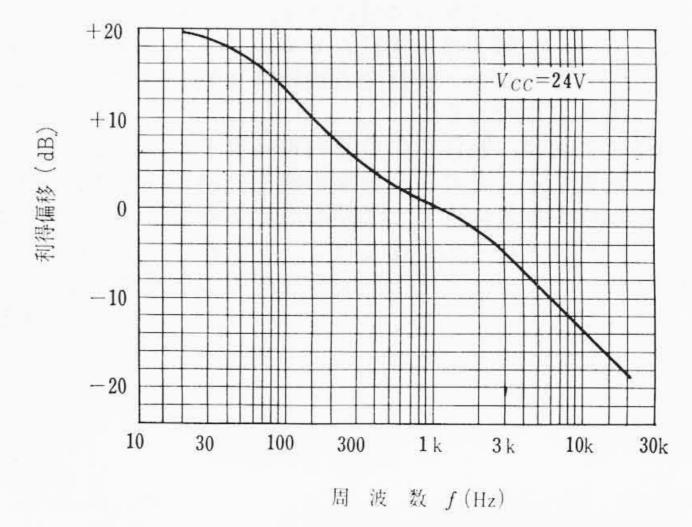


図 16 イコライザアンプ利得周波数特性

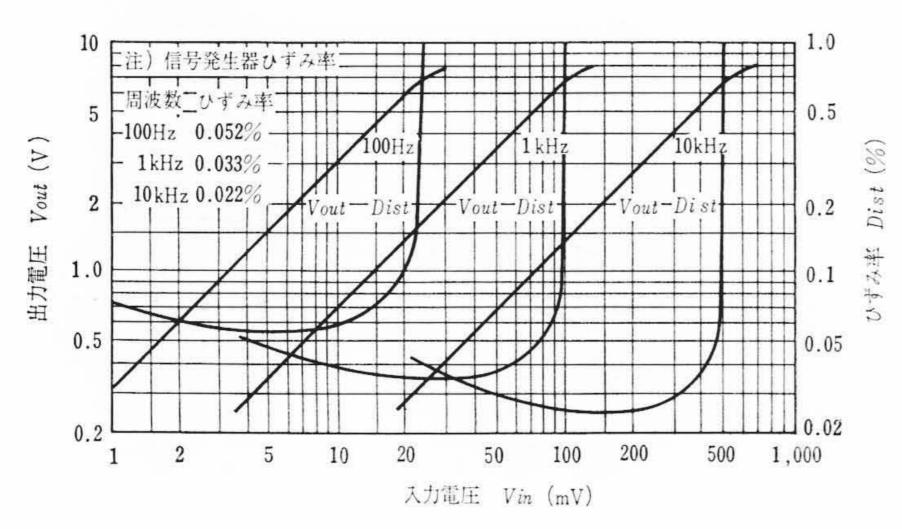
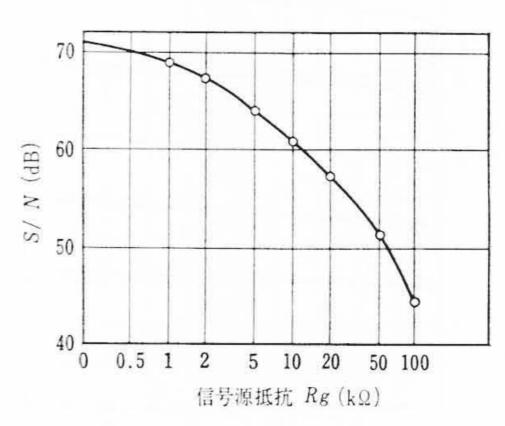


図 17 イコライザアンプの入出力特性およびひずみ率特性

イザアンプの出力抵抗を下げるためのもので,信号レベルが大きく雑音特性にはほとんど影響しないので高電流レベルの増幅特性もすぐれた 2 SC 458 (L)を用いている。 図 16 はこのイコライザアンプの周波数特性 (RIAA),図 17 は入出力特性およびひずみ率特性を,図 18 は S / N比 (雑音・信号比)の信号抵抗依存性を示している。これらからわかるように 2 SC 458 LG を使用したイコライザアンプは信号源抵抗 10 k Ω 以下,入力電圧 100 mV 以下で広い周波数範囲を増幅することができ,十分なダイナミックレンジを持ち,HiFi 音響機器用としてすぐれた特性をそなえている。

7. 結 言

LTP 処理前にシリコン表面をわずかに除去し、LTP 特有の低雑音化プロセス、レジンモールドに耐えるリン-アルミ LTP 膜、低熱膨張のモールドレジンなどの技術開発の結果 HiFi 音響機器 プリアンプ用としてすぐれた特性をもち、量産性のある LTP レジンモールドシリコントランジスタを製品化することができた。本技術は今後



利 得 37.5 dB (1 kHz) 入 力 3 mV

図 18 イコライザアンプの信号雑音比の信号源抵抗依存性

他の種類のトランジスタおよび IC にも適用されるものと思う。

終わりに臨み本開発にあたり終始懇切な指導をいただいた日立製作所中央研究所徳山巍博士,日立研究所鈴木宏氏および武蔵工場のかたがたに厚くお礼を申し上げる。

参考文献

- (1) 徳山: 40年電気四学会連大
- (2) 大野ほか: 日立評論 47,1453 (昭 40-8)
- (3) 阿部ほか: 日立評論 47,1471 (昭 40-8)
- (4) 庄治ほか: 日立評論 47,1471 (昭 40-8)
- (5) 徳山: 電気通信学会誌 49 (昭 41-7)
- (6) 山本: 電子材料 9月 (1967)
- (7) 古賀ほか: ECS Meeting at Boston May (1968)
- (8) 山本ほか: ECS Meeting at Boston May (1968)
- (9) 井口ほか: 雑誌エレクトロニクス 9月 (1968)
- (10) 山本ほか: 電子材料 9月 (1968)
- (11) 山本ほか: 電信学会トランジスタ研究会資料 (1968)
- (12) 徳山ほか: ECS Meeting at Montreal (Oct. 1968)
- (13) 渡辺ほか: 日立評論 50, (昭 43-12)



新案の紹介

整



宇多村幸彦

登録実用新案第795126号

高

圧

(福田)

流

この考案は、円筒形陽極を有する高電圧整流管の耐電圧を向上させたフィラメント支柱部の改良に関するもので、その要旨は円筒形陽極を有する高電圧整流管において、円筒形陽極の内部中心に突き出したフィラメント中央部を支持する2本の支柱を、その先端フィラメント支持部において互いに連結させ、かつその他端をステム管部分を貫通して、外部導線に接続させて、この外部導線に通電することによってフィラメント支柱を直接通電加熱し得るようにしたことを特長とするものである。

この考案によれば、製作途中の管内電極部のガス抜き工程の際、外部導線に通電することにより円筒形陽極の内部に突き出されたフィラメント支柱を材質に応じて所要の温度に直接加熱することができるので完全なガス抜きが可能となり、したがって使用時にガス放出のないきわめて安定な高電圧整流管を得ることができる。

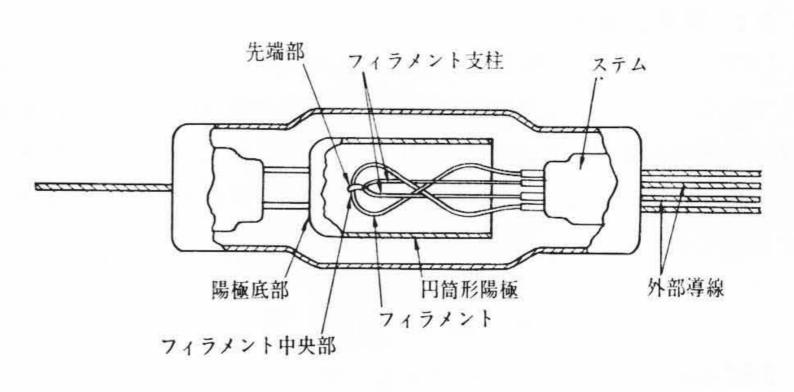


図 1