

AlGaAs / GaAs HBTによる 自動車搭載用オペアンプIC

An Operational Amplifier IC Using AlGaAs/GaAs HBTs for Automobiles

樋山 智* 橋本 英喜* 櫻井 伸弘* 武部 克彦*
Satoshi HIYAMA Hideki HASHIMOTO Nobuhiro SAKURAI Katsuhiko TAKEBE

要 旨

昨今、車のエレクトロニクス化に伴い様々なセンサ、アクチュエータが車の各所に搭載されている。それに伴い自動車に用いられるSi半導体デバイスは民生用に比べ、より過酷な高温動作環境で機能しなければならない、高耐熱化の研究が行われている。これに対し、GaAs半導体はエネルギーバンドギャップが大きいことから、一般的に高温動作のポテンシャルが高いと言われているが、自動車用としてはまだ実現されていない。われわれは独自に、高温動作、大出力電流、ローノイズを目的として設計、試作を行い、250℃まで動作し、低インピーダンス負荷の駆動が可能な出力SINK電流を持ち、Siローノイズオペアンプと同等のノイズレベルのオペアンプICを実現した。

ABSTRACT

With increased electronization of today's automobiles, the number of sensors and actuators being applied to various parts of an automobile is also increasing. Si semiconductor devices used on automobiles, therefore, must function under much severer operational environment than those of other commercial products. By contrast, GaAs semiconductor has a wide energy band gap, and has high potential to be operated even under high temperature conditions. However, there is no known application to automobiles to this date. Our operational amplifier has been so designed and experimentally fabricated that it is operational at high temperature, with high current and low noise. This operational amplifier can function at up to 250℃ and generates output sink current capable of driving low impedance load, and still its noise level is nearly equal to that of low-noise Si amplifier.

1. まえがき

自動車の高度制御化に伴い、過酷な環境下、特に高温領域においてもエレクトロニクス化のニーズが高まってきており Table 1 に示すような様々な搭載位置での動作が要求されている。われわれは、自動車のインテリジェント化のために必要な様々なセンサを理想的に動作させるために、高温動作可能な汎用デバイスの開発に着手した。自動車の中でのセンサ本体の動作温度は、エアフローセンサ、圧カセンサが搭載されるインテークマニホールド部においては200℃、クランク角センサが搭載されるディストリビュータ内においては150℃、車速センサが搭載されるトランスミッション部では160℃を保証しなければならない。

一方、このようなセンサからは微弱なアナログ信号が出力されるために、イグニッションコイル、モータ、オルタネータ等、高電圧、大電流で使用する補機が数多くあるエンジンルーム内においては、信号出力をそのまま伝送するとノイズの影響が大きく検出誤差が生じる。そのため、センサ出力を増幅した後に伝送するような半導体を用いたシステム構成が必要になってきている。この観点から、我々は200℃以上の高温動作環境で、低ノイズ特性を持つ汎用オペアンプの実現を、研究開発の目標とした。

高温動作の要求から、われわれはSiに比べエネルギーバンドギャップが大きいGaAs半導体の物性に着目した。GaAsを中心とした化合物半導体デバイスの研究開発の中では、高速素子としてAlGaAs/GaAs HBT

* 和光基礎技術研究センター

(Heterojunction Bipolar Transistor)が有力視されており、様々な研究報告がなされている。これまでに高 f_T (Transition Frequency)である HBT を用いて 15Gbit/sec で動作する高速マルチプレクサ IC¹⁾や 30GHz 以上の高周波分周器 IC²⁾等が報告されている。しかしながら、これらは、高速動作を研究の目標としており、高温動作を目標とした研究はこれまでにない。

本研究では、200℃ 以上の高温動作の要求性能を実現することを目標として、AlGaAs/GaAs HBT の物性を活かした低ノイズ、汎用オペアンプの設計、試作を行った。

開発したデバイスは 250℃ での動作、Si ローノイズオペアンプと同等のノイズ特性、出力 SINK 電流 min60mA の動作を確認した。

Table 1 Typical Measurement Data of Maximum Temperature in Automobile

Location		TEMP
Chassis	Exhaust Pipe&Muffler	120℃
	Transaxle	160℃
	Others	85℃
Body	Exterior Surface	120℃
Engine Room	Dashpanel	140℃
	Engine	150℃
	Throttle Body	200℃
	Intake Manifold	200℃
Cabin	Floor	85℃
	Top of Rear Shelf	105℃
	Dashboard (upper)	110℃
	Dashboard	85℃

Table 2 Epitaxial Layer Structure of HBT

layer	material	doping (cm ³)	thickness (μm)	xAlAs
Emitter contact	n ⁺ GaAs	2×10^{18}	0.1	
Buffer	n GaAs	2×10^{16}	0.03	
Emitter	n AlGaAs	5×10^{17}	0.25	0→0.3→0
Base	p ⁺ GaAs	5×10^{18}	0.14	
Collector	n GaAs	2×10^{16}	1.0	
Collector contact	n ⁺ GaAs	2×10^{18}	1.0	

2. デバイス設計

IC 試作には MOCVD (Metalorganic Chemical Vapor Deposition) 成長した GaAs ウエハを用いた。HBT ウエハの層構成を Table 2 に示す。耐圧、オーミック特性、プロセス精度等を考慮し、厚さ、不純物濃度等を決定した。エミッタコンタクト層、コレクタコンタクト層は、オーミック特性を得るために不純物濃度を $1 \times 10^{18}(\text{cm}^3)$ 以上とした。エミッタ層はベースエミッタ耐圧を 6V と設定し不純物濃度、厚さを設計した。ベース層はプロセス上のエッチング精度及びベースオーミック特性を得るため、コレクタ層は耐圧を 10V と設定し不純物濃度、厚さ

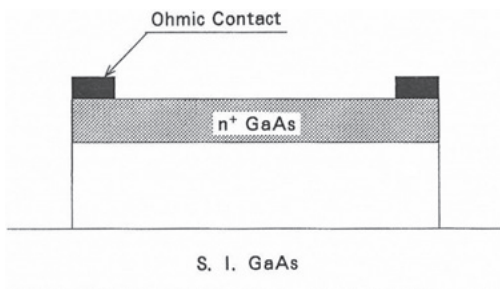


Fig. 1 Resistor Structure

を設計した。エッチングによるばらつきを無くすために、抵抗は、Fig. 1 に示すように最上層のエミッタコンタクト層を使用した。HBT の基本セルは正方形型のエミッタとし、サイズは $22 \times 22 \mu\text{m}^2$ とした。ベースコンタクトはダブルベースとし、ベース抵抗が小さくなる様に考慮した。コレクタ領域のサイズは $46 \times 106 \mu\text{m}^2$ である。今回試作した HBT の構造図を Fig. 2 に示す。

3. デバイス特性

トランジスタ特性は単体トランジスタセルで測定した。HBT の I_c - β 特性を Fig. 3 に示す。 β (電流増幅率) は、ピークでは 80 以上だが、単体トランジスタの素子サイズが大きいために、その時の電流値は大きい。しかし、実使用上のバイアス状態では電流値が小さいために、その時の β は約 20 程度である。最大電流は 80mA であり、単体トランジスタのみで充分出力トランジスタを構成できる。また Fig. 4 に示すようにコレクタ電流は充分飽和しておりアーリー効果 (コレクタ電流がコレクタ、エミッタ間電圧に依存すること) も小さいことが確認できた。

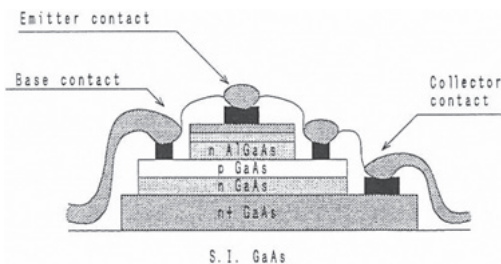


Fig. 2 HBT Structure

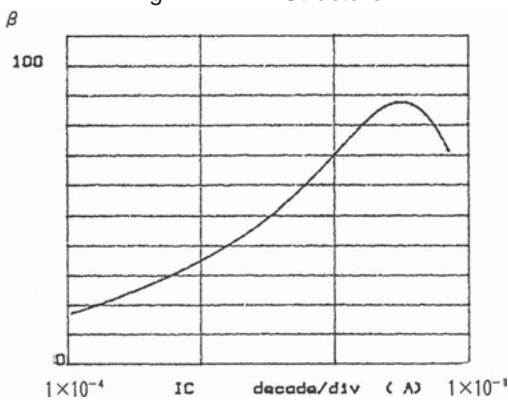


Fig. 3 I_c - β Characteristics $V_{ce}=5V$

4. IC 設計

本 IC は高温 (200°C 以上) で動作すること、オペアンプ単体で直接負荷をドライブできること、さらにローノイズでありセンサのプリアンプとして使用できる事を目的として設計した。単体トランジスタの、高温での温度に対するパラメータの変化分を考慮しながら、単体トランジスタのパラメータをモデル化し、SPICE (回路シミュレータ) を用いて回路設計を行った。オペアンプ IC の内部等価回路図を Fig. 5 に示す。

入力回路は差動型とし、それを 2 段重ねることによって極力前段でゲインを得る構成として、ローノイズ化を図った。差動増幅回路は、NPN デバイスのみでの設計のため、抵抗を負荷にとり設計した。増幅段は電圧-電流変換をした後、差電流をエミッタ接地トランジスタのベースに入力し β 倍のゲインを得、この回路で大きな SINK 電流を得るとともに出力スイングも極力大きくとれる設計とした。シミュレーションでは常温で 97dB、 200°C にて 80dB のゲインが得られている。マスキレイアウトでは、ペア性 (素子の均一性) を要求する所では素子を隣接させ、大電流ラインは極力太く短く配置した。保護ダイオードはワイヤボンディング用 PAD と PAD の間に配置し、チップ面積を最小限に抑えた。その結果、オペアンプ回路、ボンディング PAD、保護ダイオードを含めて $1.2 \times 1.3\text{mm}^2$ のチップサイズに収めた。トランジスタ基本セル、抵抗、スルーホールラダー等のテストパターンは TEG (Test Element Group) 専用エリアを設け、IC 不良の原因追求、単体特性の把握のために使用した。

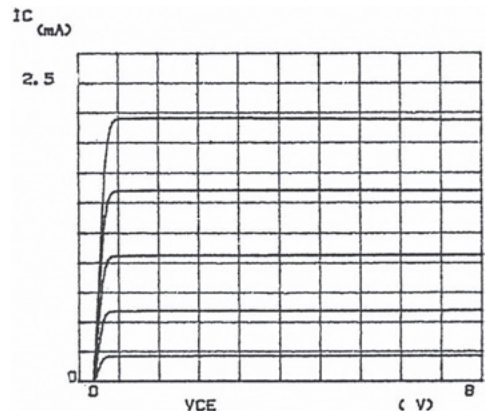


Fig. 4 V_{ce} - I_c Characteristics
 $I_b=0-50\mu\text{A}$ ($10\mu\text{A}$ step)

5. 試作プロセス

本 HBT IC の試作プロセス上で注意すべき事は、S.I. 層 (Semi Insulation Layer) までエッチングするために深い段差が生じることにある。IC の配線はほとんどがメサを乗り越える構造になっているために、メサの形状やレイアウトによっては配線が切断してしまう事がある。我々はエッチングにアンモニア系エッチャントを用いることでメサをすべての方向で順メサとしメサ段差における配線の切断のおそれを無くした。Fig. 6、Fig. 7 にメサ断面の写真を示す (Orientation Flat に対する形状)。さらに、ベース層表面でエッチングを止める制御を時間管理で行うためには、安定したエッチレートと低い面内ばらつきのエッチャントが必要となる。それを得るための、温度、攪拌手法の最適化を行った。

この様なエッチャントを用いてベース層、コレクタ層、S.I. 層を表面に出し AuGe/Au からなるエミッタ電極、コレクタ電極、S.I. 層上の下層配線を蒸着で形成した後、Ti/Au からなるベース電極を蒸着する。層間膜はスピコート型の SiO_2 膜を塗布した後スルーホール形成を行う。層間膜形成の際には段差によって生じる層間膜の面内不均一を解消するためにスピコートの条件の最適化を図り膜厚と段差の関係を明確にし、歩留まり向上を図った。最終プロセスでは、Ti/Au からなる上層配線を蒸着し、表面保護膜となる SiN をスパッタにて形成し IC プロセスが完了する。完成したオペアンプのチップ写真を Fig. 8 に示す。

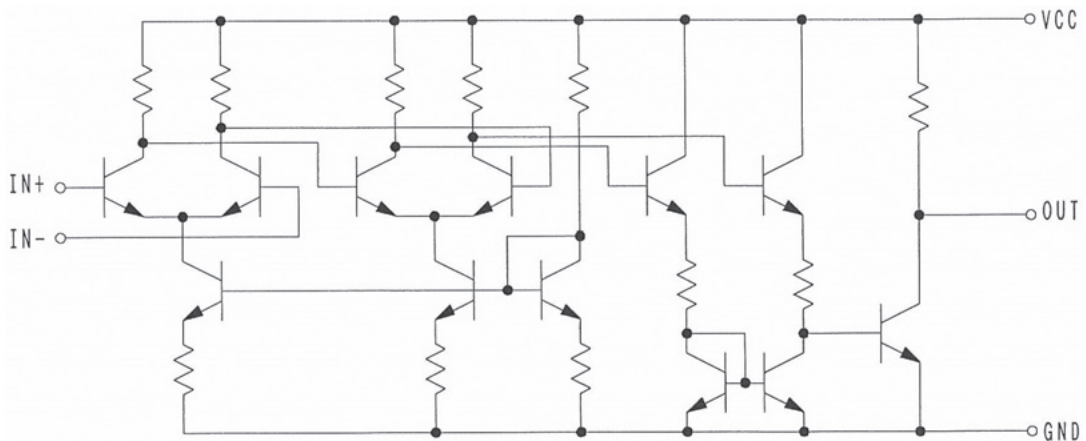


Fig. 5 Internal Equivalent Circuit of Operational Amplifier

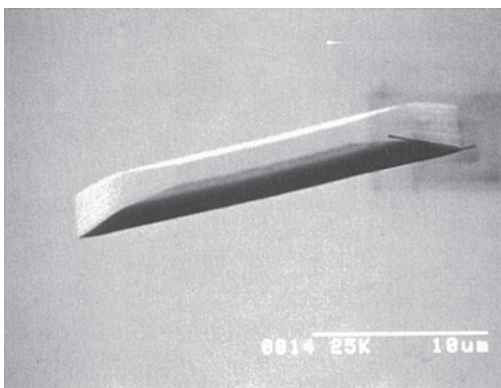


Fig. 6 Transponding Ability by Gap (vertical direction from O.F.)

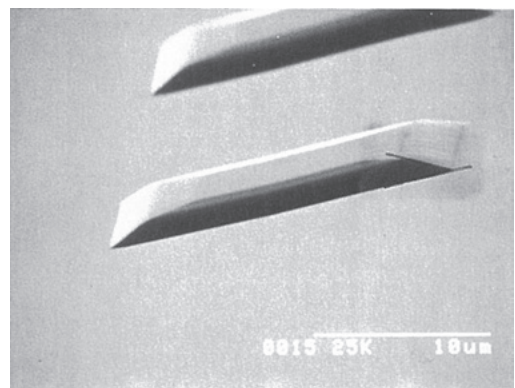


Fig. 7 The Shape of Mesa (horizontal direction from O.F.)

6. IC 性能

試作したオペアンプICはセラミック・デュアル・インラインパッケージに実装し測定した。高温測定時にはパッケージをホットプレート上に密着させ、パッケージ温度を測定してチップ温度の基準値とした。低温測定時は恒温槽内で測定を行った。電源電圧は8Vの安定化電源を用い、信号源にはファンクションジェネレータを用いた。測定されたゲイン特性をFig. 9に示す。この図から高温側では250℃において80dBのオープンループゲインが得られている事が確認できる。高温側でゲインの低下が見られるのは β が低下するためであり、シミュレーションと同じ特性がみられている。

ノイズレベルは入力換算で $17\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ であり、Siローノイズオペアンプと同等の特性を得た。出力SINK電流特性もFig. 10に示すように高温時に低下する傾向がある。実用上の駆動電流は30mA程度あれば充分であり、

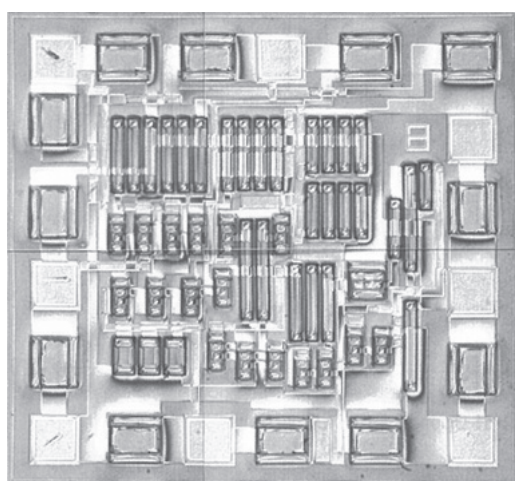


Fig. 8 Photograph of HBT Operational Amplifier Die

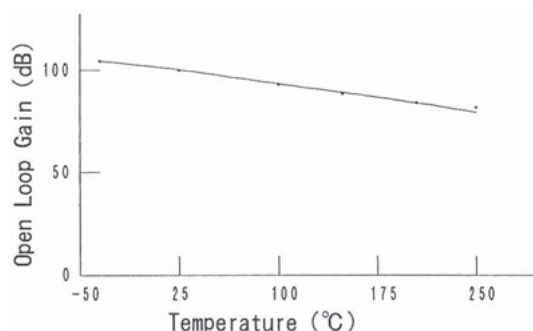


Fig. 9 Result of Open Loop Gain versus Temperature

アンプのゲインもクロードループで30dB程度あればよいので、本ICは250℃環境下でも充分動作可能であることが確認できた。また、比較対象としてSiオペアンプのSINK電流の温度特性も測定した。

Siオペアンプは今回試作したHBTオペアンプと同等のノイズ特性を持つものを選んで測定した。同等のノイズ特性を持ち、さらに100mA以上のSINK電流を持つものは現在無いが、高温での電流変化量を知るために測定した。今回測定したサンプルのSINK電流は常温において27mA程度である。このSiオペアンプのドライブ特性はFig. 10に重ねて示すように180℃以上の温度においてSINK電流の急激な低下が見られ、200℃では動作していないことがわかる。

7. 信頼性試験

今回我々はデバイス単体での加速試験を行いデバイスとしての寿命、ウイークポイントの解析を行った。280℃、300℃、325℃のホットプレート上にTEGチップ上のHBT、抵抗が実装されたセラミックパッケージを乗せ、故障時間を測定することにより実用温度での寿命を見積もるとともに、故障モードからデバイスの不良解析を行った。HBTでは β 、 V_{BE} (ベース、エミッタ間電圧)、 n 値(PN接合の良否を現す。1が理想値)の測定の結果全て同じ時間で故障しており、 β の低下、 n 値の低下(ベース-エミッタ間、ベース-コレクタ間ともダイオード特性を示さなくなる)から考えるとベースとエミッタ、コレクタ間のpnジャンクションの故障と考えられる。Fig. 11及びFig. 12にベース、エミッタ間の n 値、ベース、コレクタ間の n 値の高温放置時間に対する変化の様子を示す。 n 値が2になった点を故障とし、すべてのサン

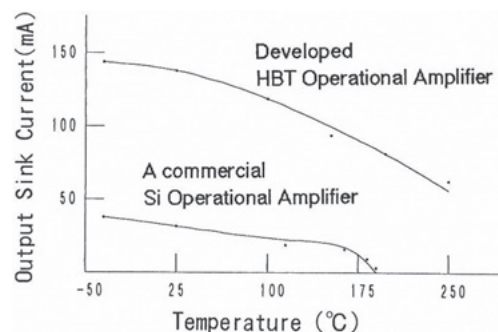


Fig. 10 Result of Output Sink Current Versus Temperature

Table 3 Operational Amplifire Life Test

Item	Condition	Result
Low Temperature Storage	-54°C 500h	OK
High Temperature Storage	200°C 500h	OK
High Temperature Storage with DC bias	125°C 500h	OK
Thermal Shock	-25°C~125°C every15min 10cycle	OK
Temperature Cycling	-54°C~125°C every30min 200cycle	OK
Vibration Sweep	100Hz~2KHz 20G X, Y, Z 5min 4cycle	OK

ブルの故障平均時間 (MTTF) を各温度に対してプロットすることにより、それ以下の温度に対する故障時間を見積もることができる。Fig. 13 に示すように 200°C 環境

下では 8×10^3 h、また 85°C 環境下では 1×10^6 h の寿命であると予想される。なお、抵抗に関しては 300°C において 0.17%/h の傾きで徐々に増加していく傾向が見られた。また、その電極のオーミック抵抗値の劣化における活性化エネルギーは一般的に 2 eV と言われているが³⁾、今回の測定でもそれと同じ値を示した。オペアンプ IC としては、温度サイクル、熱衝撃試験等の各種信頼性試験を行った。パッケージはハーメチックシールパッケージである。低温、高温の放置試験及び高温バイアス試験は恒温槽で行い、熱衝撃試験及び温度サイクル試験はそれぞれ液槽、気槽のサーマルショック槽で行った。振動試験はパッケージを X、Y、Z の 3 方向に固定し所定の振動を加えた。Table 3 に示すように JASO のスペックは満足している。

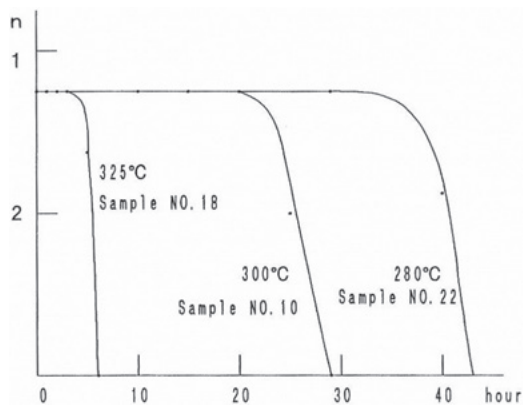


Fig. 11 Inferior time for n value within base and emitter

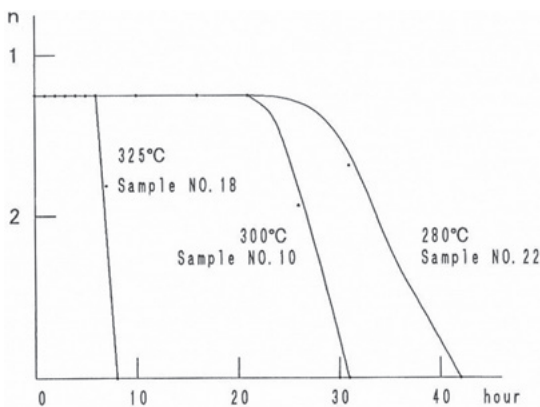


Fig. 12 Inferior time for n value within base and collector

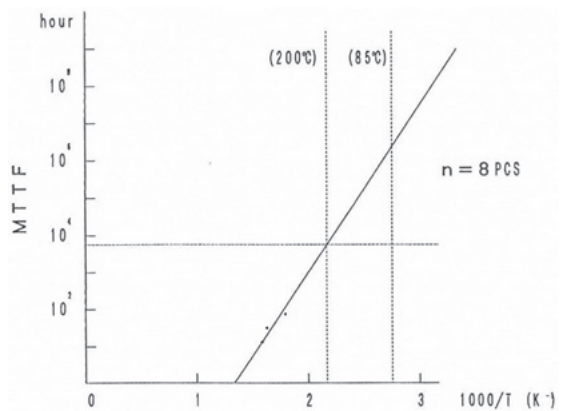


Fig. 13 HBT Life Test

8. まとめ

GaAsは高温動作のポテンシャルは高いと考えられていたが、自動車用の応用は無かった。われわれは自動車搭載用デバイスとして高温動作、低インピーダンス負荷をドライブできる大きな出力電流、微弱信号のプリアンプとしても使用できるローノイズ特性の実現を目的としてAlGaAs/GaAs HBTによるオペアンプICを独自に設計、試作を行った。

その結果、250℃で動作し、低インピーダンス負荷の駆動が可能な出力SINK電流を持ち、Siローノイズオペアンプと同等の低ノイズレベルのオペアンプICが実現した。

この結果から、将来様々な応用が可能である汎用自動車搭載用デバイスとして、AlGaAs/GaAs HBTの基本動作、信頼性が検証できた。

参考文献

- 1) Y. Kuriyama, K. Morizuka, J. Akagi, M. Asaka, K. Tuda and M. Obara,
“15Gbits MUX/DMUX Implemented with AlGaAs/GaAs HBTs” IEEE GaAs IC Symposium Technical Digest, p.313-316, 1989
- 2) 山内佳紀、中島長明、永田公一、伊藤弘、石橋忠夫、
“AlGaAs/GaAs HBTによる超高速分周期IC” 電子情報通信学会 電子デバイス研究会 EDD-90-16, 1990.
- 3) 五十嵐、斉藤、福田
“高出力GaAs FETの信頼性”
電子情報通信学会 信頼性研究会 R82-31, 1982.

■ 著 者 ■



樋 山 智



橋 本 英 喜



櫻 井 伸 弘



武 部 克 彦