

# III-V 族化合物の特性と応用

## III-V Compound Semiconductors and their Devices

難 波 正 治\*

Masaharu Namba

### I. ま え が き

ダイオードおよびトランジスタの発明にともなう電子工業の華々しい発達により、半導体といえば Ge, Si を意味する程その近代工業に占める地位はきわめて重要なものである。それらのホームグラウンドににくい込むため他の多くの半導体が研究されたが、化合物半導体に対する学問は単体元素である Ge, Si にくらべ完全な結晶が得難いこと、また理論的取扱いが困難であるなどの理由から永く遅れざるを得なかった。特に III 族~V 族の化合物は<sup>(1)</sup>1952 年 Welker<sup>(1)</sup> によって半導体性質に関する数多くの実験データが提供されるまではほとんど無視されていたが、大部分の III~V 化合物すなわち B, Al, Ga, In の隣、ひ素、アンチモン化合物は閃亜鉛鉱形結晶で、ダイヤモンド形結晶構造をもつ Ge, Si と同じ結合機構をもつものである。これらの内 BP, BAs, BSb は技術的に非常に取り扱い困難であり、また Al の化合物は空気中で不安定であるが、残りの化合物 GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, InSb は物理的、技術的に非常に重要な問題を含んでいる。

III-V 化合物半導体材料、なかんづく GaAs などは数年前までは電子易動度あるいはバンドギャップが量的に大きいことを利用して Si, Ge では達し得ない領域——より高い動作温度あるいは高いシャ断周波数など——でのデバイスへの適用がもっぱら考えられていたが、この数年間は Si, Ge とのバンド構造の質的な相違により高効率の発光ダイオード——レーザダイオード——あるいはバルクマイクロ波発振子、すなわち Gunn ダイオードが開発され、Ge, Si では決して得られない分野をになう半導体として前途有望である。

III-V 化合物半導体の特徴を生かした用途が多数考えられるとはいえ実用化に当たっては製造の容易さ、したがってコストが重要な条件である。この点については Si, Ge にくらべ需要がはるかに少ないという事情もあわせて結晶自体きわめて高価格である。しかしながら GaAs 発光ダイオードが \$100 レベルから今日では \$10 まで下っており、まもなく \$1 オーダーとなるといわれている。

いずれにせよ GaAs で代表される III-V 化合物半導体は Ge, Si にとってかわるものとは決していえないが、それらに無いいくつかの可能性を秘めた材料といえることができよう。以下数種の III-V 化合物半導体材料の特性と関連してそれらのデバイスの特性を実用的見地から述べる。

### II. III-V 化合物半導体デバイス

III-V 化合物の内その電気的性質の最も一貫して研究されてきたものは InSb である。それはこの化合物が比較的作成し易いこと、および伝導電子の有効質量が小さいため極端に大きい電子易動度をもち他の半導体に現われない多くの現象を示すゆえである。しかしながら InSb は III-V 化合物中最もバンド幅が狭く (300°K で 0.167 eV)、したがって真にその特長を発揮するのはむしろ 77°K あるいはそれ以下の低温においてである。バンド幅は半導体パラメータのうち最も重要なものの一つであり実際に用いる素子では Ge, Si 程度のバンド幅が適当であるが、GaAs (300°K で 1.36 eV) が Ge, Si とともに現在最も重要な半導体といわれている理由はむしろ Ge, Si と異ったバンド構造をもつゆえである。

Ge, Si と InSb, InAs, InP, GaSb, および GaAs のバンド構造の相異はまず第一に、前者においては伝導帯 minimum の電子が価電子帯 maximum と異なる運動量をもち、後者では運動量が保存されるいわゆる直接バンドであるという点である。このことは上の一連の III-V 化合物半導体が注入形レーザ材料となり得る基本的条件である。またこの下部伝導帯の底より高準位に今一つの伝導帯の谷があり、両者の差がバンド幅より小さく、下部伝導帯の電子は上部伝導帯の電子より大きい易動度をもつことが GaAs, InP などで知られている。これが Gunn 発振の必要条件である。

#### 1. InSb, InAs 磁電変換素子

半導体に電界と同時にそれと直角方向に磁界を加えた場合の電気伝導現象に古くから知られているホール効果と磁気抵抗効果があり、その効果の特に顕著な材料によりホール素子、磁気抵抗素子が作られる。

ホール起電力は、単一キャリアの場合には、キャリア

\* 中央研究所

濃度  $n\text{ cm}^{-3}$ , 厚み  $d\text{ cm}$  の結晶片を用いこれに電流  $I\text{ amp}$ , 直角磁界  $B\text{ Gauss}$  を加えたとき, よく知られているように

$$V_H = \frac{1}{ne} \frac{I \cdot B}{d} \times 10^{-8} (\text{mV})$$

で与えられる. ただし  $e$  は電子電荷量  $1.6 \times 10^{-19} (\text{C})$  である. またホール端子間に負荷を接続しこの負荷からとり出せる出力を利用する場合には, 素子の最大出力  $P_{\text{outmax}}$  は, 素子の許容温度上昇を  $\Delta T$  とするとき

$$P_{\text{outmax}} = \frac{\kappa}{2} \mu^2 \Delta T S B^2$$

で与えられるから, 特にホール出力を問題とする場合, 易動度の大きい, InSb, InAs 系が普通知られている Ge ホール素子などにくらべはるかに有利である. ここに  $\kappa$ : 熱伝導率,  $\mu$ : キャリアの易動度,  $S$  は素子の表面積である. 第 1 表はホール素子材料の素子に関連した半導体パラメータを示したもので, 第 2 表はこれらホール素子の性能の一例である.

第 1 表 ホール素子材料の半導体特性

Table 1. Values of some semiconductive parameters of several materials which are used as Hall device

	バンド幅 $E_g(\text{eV})$	易 動 度 ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )		有効質量		熱伝導度 ( $\text{Wcm}^{-1}\text{deg}^{-1}$ )
		電子 $\mu_n$	正 孔 $\mu_p$	電子 $m_n^*/m$	正 孔 $m_p^*/m$	
Ge	0.67	3,800	1,800	0.12	0.2	0.63
Si	1.11	1,300	500	0.26	0.4	1.13
InSb	0.17	77,000	750	0.015	0.6	0.26
InAs	0.36	33,000	460	0.02	0.5	0.29
InAs <sub>0.5</sub> P <sub>0.5</sub>	0.53	12,000		0.045		

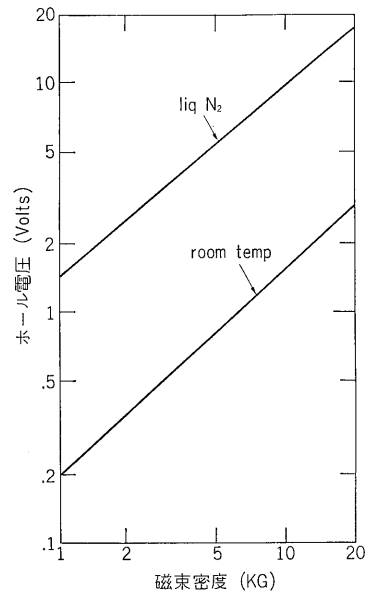
第 2 表 実用ホール素子特性仕様 (当社製)  
(主として計測用)

Table 2. Values of Hall generator parameter for practical devices

	制御電流 (mA)	ホール係数 ( $\text{cm}^2/\text{coulomb}$ )	積感度 ( $\text{mV}/\text{mA}\cdot\text{kG}$ )	入力抵抗 (ohm)	出力抵抗 (ohm)	温度係数 (%/°C)	
						抵抗	出力
HG-2形 Ge	10	4,000	2	200	200	-0.57	+0.05
Si*	2	250,000	75	~20,000	~25,000		
FA21L形 InAs	125	100	0.065	1.5	1.2	+0.1	-0.08
FC34形 InAs <sub>0.5</sub> P <sub>0.5</sub>	200	200	0.14	6	4	+0.2	-0.04

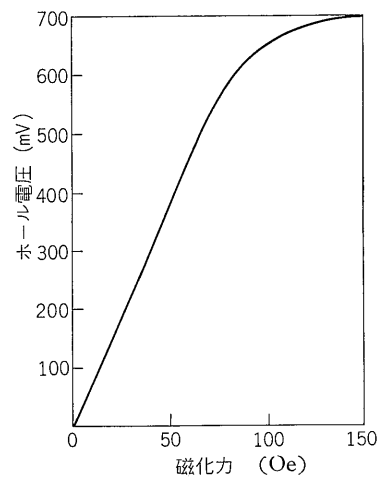
\* ただしこの形の素子は Mengali & Shilliday による

第 1 表でみられるように InSb, InAs のバンド幅は Ge のそれに比して小さくより低温で真性領域に入るため, 実用ホール素子用結晶においては  $n \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  程度の Te, Se あるいは  $S$  ドープのものが用いられる. したがって積感度 ( $\text{mV}/\text{mA}\cdot\text{kG}$ ) は Ge, Si ホール素子にくらべ小さい. 彼等はさらに易動度が Ge などにくらべはるかに大きいため内部抵抗は低く, 制御電流も一桁以上大きいので電力用としての応用に限られ電子回路には



第 1 図  
InSb 高感度薄膜素子の  $B-V_H$  関係 (入力電流 20mA)

Fig. 1.  
 $B-V_H$  relations in InSb thin film high sensitive Hall generator at 77°K and room temperature (at input current 20 mA)



第 2 図  
フェライトサンドウィッチ形 InSb 素子のホール電圧 (入力電流 50mA)

Fig. 2.  
Hall output voltage in Ferrite sandwich type InSb Hall signal probe at room temperature (at input current 50 mA)

採用し難いものである.

InSb は薄膜素子, 特にこの場合は計測用より温度をあまり問題にしなくてよい磁界変動の signal probe としたときその特徴が発揮される. 第 1 図は InSb 薄膜素子の  $V_H-B$  関係で, 結晶は厚み  $5\mu$  まで機械的ランブおよび化学的エッチングされており, 制御電流 20 mA, 磁束密度 10 kG においては室温で 1 volt 以上, 液体窒素温度では約 20 volt のホール電圧が得られている. 第 2 図は同程度のホール素子がフェライトでサンドウィッチされた形のもの の出力電圧を示したもので, 近接スイッチなど小さな磁界の変化を検出するのに適している.

InSb は高電子易動度のため内部抵抗を数十  $\Omega$  にとつた場合ですら数  $\mu$  までの薄膜化が可能であり, フェライト集束柱の効力を充分に利用し得るものである.

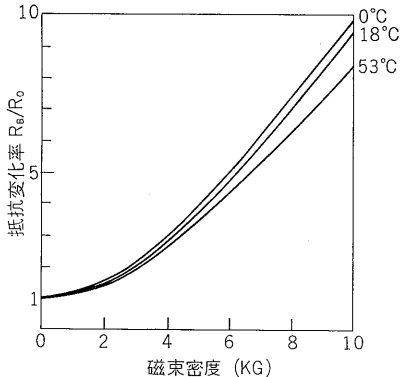
以上旧来のホール素子に対し最近の IC 技術, 薄膜技術の発達は微細な素子を可能とし, きわめて精密な磁界分布の測定, 極微磁界の検出などに用いられようとしている. 磁気抵抗効果はホール効果と不可分の関係にあるため実際の応用方面もまた, きわめて類似している. しかしながらホール素子では材料が必ずしも特に大きい易動度を必要とせずホール係数さえ高ければよいが, 磁気抵

抗素子は高易動度が絶対条件となるため Ge, Si は良いホール素子になり得ても磁気抵抗素子になり得ない。磁気抵抗素子は構造的にはただのバルク抵抗素子である。この磁気抵抗効果は物性物理でいうものとは本質的に異なるもので、素子の形状が磁気抵抗素子特性に対し易動度とともに重要な役割をはたしている。

磁気抵抗素子の磁界  $B$  による抵抗変化率  $\Delta R/R_0$  (ただし  $\Delta R$  は磁界  $B$  における素子の抵抗変化分,  $R_0$  は  $B=0$  における素子の抵抗である) はホール角  $\theta = \mu_H B$  (ただし  $\mu_H$  はホール易動度) に関し次の二つの領域に分かれる。すなわち

$$\begin{aligned} \Delta R/R_0 &= m\mu_H^2 B^2 && \text{弱磁界 } \tan \theta < 1 \dots \dots (1) \\ &= n\mu_H B && \text{強磁界 } \tan \theta > 1 \dots \dots (2) \end{aligned}$$

$m, n$  は素子の形状効果を与えるもので、ホール電圧を完全に短絡したような場合 (コルビノ円板, ただしこのようなときは  $\Delta R/R_0 \propto \mu_H^2 B^2$ ) を最大とし、ホール素子とは逆に幅に対し長さの小さい程感度  $\Delta R/R_0$  は大きい。このため実際の素子では金属線電極を素子表面にはしご状にいくつかわたしてホール電圧を短絡したり、また、われわれの所ではホール電圧発生方向に NiSb 針状結晶を析出せしめるなどの方法がとられている。



第3図 InSb 磁気抵抗素子特性

Fig. 3. Characteristics of InSb magnetoresistor at various temperatures

磁気抵抗変化は  $\mu_H$  とともに大きくなるから InSb が素子材料として最も有効であるが、高純度 InSb (室温で  $n \sim 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ) においては実用素子として温度依存性がきわめて強く、特に磁気抵抗効果においては  $\tan \theta < 1$  の範囲で磁場とともに温度係数が増加し  $B=3 \text{kG}$  で  $-2\%/^{\circ}\text{C}$  に達する。このためホール素子同様  $n \approx 10^{17} \text{cm}^{-3}$  の Te ドープが必要とするが磁気抵抗温度特性は第3図のようにホール素子の出力電圧温度特性に比して悪い。なお第3図ははしご状の金属蒸着により得られた高感度素子である。

式(1), (2)から知られるようにアナログ要素として用いる場合、すなわち 2 乗特性を利用する場合には  $\mu_H$  の小さい InAs 素子を、比例特性を用いるには InSb 素子が選ばれる。ブリッジに組んだ二つの磁気抵抗素子をそれぞれ

れ同じ一定磁界  $B$  中におきこれらに微小磁界変化  $\Delta B$  (ただし  $\Delta B \ll B$ ) をそれぞれ反対方向に作用させれば、

$$\begin{aligned} R_0(1+g(B+\Delta B)^2) - R_0(1+g(B-\Delta B)^2) &= \\ 4gR_0B\Delta B & \end{aligned}$$

から磁気抵抗の 2 乗特性を比例特性に変換して用いることができる。

磁気抵抗素子ではグリッド状をとり得るためホール素子に比べ高インピーダンスとすることが可能で、InSb を用いても  $300 \Omega$  の抵抗素子を比較的容易に作り得る。また 2 端子であり回路的にも感度の上からもホール素子より優れているが、温度係数が大きいことおよび磁界方向性の検出にバイアス磁界を必要とすること、また直線特性利用には一般に前者同様バイアス磁界を必要とする欠点がある。

## 2. 発光ダイオード

半導体の P-N 接合形ダイオードは順方向にバイアスされたとき、電子、正孔は接合面に向かって流れ寿命  $\tau$  で再結合することにより原理的にはすべて発光する。III-V 化合物における輻射をとまなり電子-正孔の再結合はこれら化合物が半導体であるという発見後直ちに発表され、かつ InSb における発光効率はきわめて高いことが報告されている。しかしながらその後の研究は当然のことながら可視光領域に発光スペクトルをもつ広いバンド幅の化合物に限られ、この初期の結果にもかかわらずこれら化合物は生来発光効率が低いという印象をもたれたため、この分野ではほとんど注意を引かなかった。1962 年 GaAs および GaP において量子効率が 1 に近いことが見出され、GaAs に対しては直ちにレーザダイオードが発表された。<sup>(4)</sup> 半導体注入形発光ダイオードは

- 1) きわめて小形でほとんど点光源と見なし得る
- 2) 低電圧 (1.5~2.5 volt) で動作し、レーザ光を必要としないときは数 mA の低電流で動作する
- 3) これらの光はかなりモノクロマティックである
- 4) 非常な高速度 (<100 ns) でスイッチするなどの特長がある。

放出フォトンの最大エネルギーはその半導体のバンド幅によって近似的に決められる。通信分野ではより長波長側の光が適当であろうが、一般光源として応用できる発光スペクトルは可視光領域であり、したがって使用される材料はバンド幅でいて 1.77~3.09 eV のきわめて限られたものとなる。III-V 化合物でこの範囲に入るものは  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  ( $25 \leq x \leq 1$ ) 系である。次の量子効率の大小、作成の難易度もまた発光素子材料としての可能性の制約を与える。現在技術的にコントロールし易い Ge, Si は量子効率きわめて低い。また光源が高い量子効率をもっている低感度のディテクタしかない場合には工業的に意味がない。InSb, InAs から放出された長波長

の光に対するディテクタは一般に効率が低い。GaAs はそれ自身高量子効率をもつ上 Si フォトディテクタと波長感度的にカップリングするため、最も研究され実用段階に入りつつある。

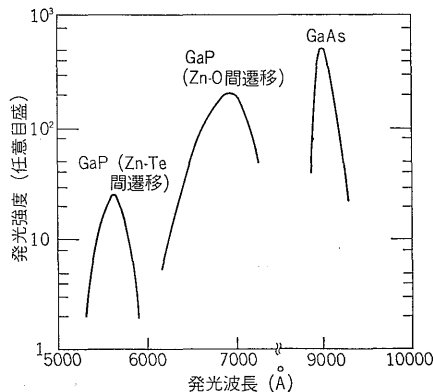
電子-正孔再結合に関する基本的な物理的要求の一つは運動量保存である。この条件は下部伝導帯底の電子が価電子帯頂上付近に落ち込むいわゆる直接遷移においては容易に満たされる。InSb, InAs, GaSb, InP, GaAs, GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> (ただし  $x \leq 0.4$ ) など一連の III-V 化合物またはそれらの適当な三元化合物はこの種の直接バンド構造を有し、したがって量子効率も高い。下部伝導帯極小点が価電子帯極大点と同じ波動ベクトル方向にないならば再結合は不純物を通して行なわれる。これは不純物が余剰の運動量を吸収するからで、この形の代表的なものは GaP である。

注入形発光ダイオードで特に高効率のものはレーザダイオードである。しかしレーザ作用は直接バンド構造をもつ物質においてのみ観測される。一般に半導体レーザでは接合面に垂直な劈開面をそのままファブリペロ反射面として用い接合面に沿ってレーザ光を放出する形をとる。半導体レーザの特長として、1) 超小形で耐震性に

iakセプタ Zn は価電子帯の上 40 meV にあるから発光波長は (バンド幅 2.3 eV) ほぼ 5,600 Å 付近にある。緑色バンドは眼のピーク感度と一致するので可視ルミネッセンスダイオードとなる。いま一つの不純物対バンドは酸素ドーパの GaP に見られる 7,000 Å の赤色発光である。これに深い O ドナーから浅い Zn アクセプタへの遷移によるもので、このバンドは緑色光バンドにくらべブロードであり (半値幅 ~600 Å), O ドープの GaP ルミネッセンスでは室温では赤色光の方がはるかに強い。

実用上必要なダイオードの外部効率は、再結合過程に関係する内部量子効率と、その光が外部に放出されるまでにうける吸収、外部との境界面で生ずる内部反射による損失によって決まる。内部量子効率は接合面生成技術に関係し、後者は主として形状に関連してくる。GaAs, GaP 発光ダイオードではそれぞれ 20% および 2% の高効率のものが報告されている<sup>(6)(7)</sup>、GaAs レーザでは光が接合面内を通るため、吸収による損失が非常に少なく、外部効率は内部量子効率に近くて液体窒素温度で ~70%、室温で 20% に達する。このような高効率、動作の簡便さに係らず現在半導体レーザ使用を制限している原因は、レーザ開始電流が絶対温度の 3 乗に比例し室温におけるレーザ動作をきわめて困難ならしめているためである。

発光ダイオードの寿命は主として GaAs について報告されている。一般に外部量子効率は時間とともに緩やかに減少する傾向があり現在約 1~20,000 hr の寿命が予想されている。GaAs ダイオードは光電装置用光源としての用途と光を媒体とした信号伝達への応用が考えられている。光源としてはテープリーダー、カードリーダーなどへの利用、信号伝達への用途としては高速度受光素子との複合装置がいろいろの形で試作されている。GaAs-GaP はインディケータ光源として効率、信頼性に関してすぐれているが使用については量産コストダウンがまず必要である。第 4 図は GaAs, O ドープ GaP 注入形発光ダイオードのスペクトル分布である。



第 4 図 GaAs および酸素ドーパ GaP 発光ダイオードのスペクトル分布

Fig. 4. EL spectra of GaAs and O-doped GaP junction diodes at room temperature

すぐれ、2) 発光効率がよく、3) 直接変調ができ、4) 数 Gc の速い応答が得られるが、動作の性質上、(1) 大電流を必要とし常温での連続動作が非常に困難(常温で ~30,000 A/cm<sup>2</sup>) であり、(2) 可干渉性が比較的悪く、(3) 発振周波数も不安定であるなどの欠点があるため現在のところ期待できる応用分野が非常に限られたものになっている。

GaP<sup>(5)</sup> では浅いドナーレベルは伝導帯と重なっていない。同様に正孔はアクセプタレベルにトラップしており、トラップした電子と正孔は輻射をともなって再結合する。

GaP の浅いドナー(Te) は伝導帯の下 100 meV, 浅

### 3. マイクロ波用 III-V 化合物固体素子

最近 3~4 年の間に半導体分野で一躍クローズアップされているのが Gunn ダイオード<sup>(8)</sup>を初めとする一連のマイクロ波固体電子装置である。マイクロ波用半導体素子すなわち発振、増幅、検波・周波数変換素子としては、従来から、トランジスタ、トンネルダイオード、バラクタダイオードなどがある。この分野に新しく出現した、いわゆる走行時間利用素子、すなわち、Gunn ダイオードおよび Read, アバランシェなどのインパットダイオードは、半導体マイクロ波源として、電子管の独壇場であり最後のとりでであったマイクロ波領域の征服を目指して非常な急ピッチの研究、開発が行なわれている。

この分野における III-V 化合物は GaAs, GaSb トンネルダイオード, GaAs バラクタダイオード, GaAs Gunn ダイオードなどその重要性が認識されている。

1) トンネルダイオード

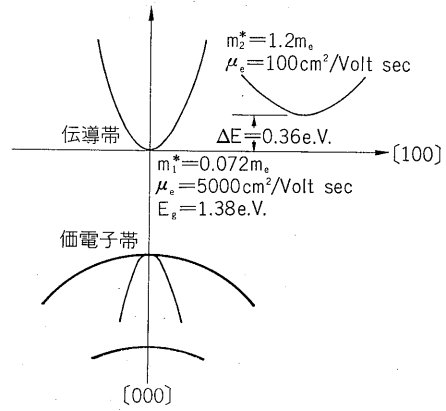
周知のように負荷抵抗の現われる代表的素子であり、中でも、Ge, GaAs, GaSb によるダイオードはそれぞれの特長のゆえに用いられる。接合ダイオードで順方向バイアス時の電流は一般に注入少量キャリアの拡散によるが、heavily dope の材料を用いると空乏層は非常に薄くなりバリアを通る電流は多数キャリアのトンネル電流が支配的になる。いま heavily dope のダイオードで  $n$  側の伝導帯の底  $E_{cn}$  が  $p$  側の価電子帯の頂上  $E_{vp}$  よりエネルギー的に低い位置にあるならば、順方向バイアスにおいて電子は  $n$  側伝導帯から  $p$  側の価電子帯にトンネル効果により侵入し、したがって電流はまず電圧とともに増加する。 $E_{vp}-E_{cn}$  は電圧とともに減少するからトンネル電流は極大点を通った後  $E_{vp}-E_{cn}=0$  で零となりこの間で負性抵抗が現われる。電場の強さ  $\epsilon$  におけるトンネル確率は  $\epsilon e^{-A(m_n^{-1}+m_p^{-1})^{-1/2}E_0^{3/2}/\epsilon}$  に比例し、トンネル電流はバンド幅  $E_g$  の小さい材料程大きい、これは同時に普通のダイオード電流の大きいことを意味する。GaAs がトンネルダイオード素子としてすぐれているのは  $E_g$  が大きくかつ有効質量  $(m_n^{-1}+m_p^{-1})^{-1}$  が小さいことによる。GaAs トンネルダイオードは負性抵抗の電圧領域が他のトンネルダイオードにくらべ最も広く、大きな電力を取り出し得ることから発振器として適当である。GaSb トンネルダイオードは Ge のそれとほぼ同程度の高速性をもっており、かつ最大の特長として雑音定数がきわめて小さく低雑音増幅素子としてすぐれている。

2) バラクタダイオード

バラクタダイオードは P-N 接合容量の電圧依存性を用いるものである。この空乏層の静電容量の電圧による非直線の変化または最近では少数キャリアの蓄積によるステップリカバリー特性によって周波数通倍に広く用いられているのは、やはり Si の拡散形ダイオードである。Si バラクタダイオードは広い接合面積をもち熱伝導もよいため高出力用に用いられ、加えて長寿命、低コストであるから、GaAs バラクタは周波数通倍には高いシャ断周波数 ( $> \sim 200$  GHz) が他の条件に優先する場合のみ用いられる程度である。最近の情報ではプレーナ拡散形でシャ断周波数 2,000 GHz におよぶものも試作されている。GaAs バラクタは電子の高易動度、低直列抵抗のゆえに低雑音パラメトリックアンプ、特に極低温で使用するとき Ge, Si のそれにくらべすぐれた特性を示す。

3) Gunn ダイオード

将来のマイクロ波発振源として固体バルク発振現象を



第5図 GaAs のバンド構造

Fig. 5. The band structure of GaAs

用いた Gunn ダイオードおよび電子なだれとキャリアが空間電荷層を走行する時間を利用したインパット素子がある。

インパット、バラクタ、トンネルダイオード、トランジスタなど大部分のマイクロ波用半導体素子がすべて P-N 接合を利用したものであるのに対し Gunn ダイオードは半導体のバルク効果を用いたものである。これは前に記したようにそのバンド構造 (第5図参照) によるもので、InP GaAsP においても認められているが、発光ダイオードとともにまさに GaAs の独壇場である。Gunn 発振器は比抵抗  $0.1 \sim 100 \Omega \text{ cm}$  の  $n$  形 GaAs 両端にオーミック電極を付け、これに電界を加えて行くと、電界の低い内は電子は有効質量の小さい下部伝導帯の最低エネルギー状態にありここでは易動度が大きい ( $5,000 \text{ cm}^2/\text{volt sec}$ ) が、電界が高くなると電子が加速され一部は有効質量の大きい上部伝導帯に移り急速に平均有効質量が増加するため、ある電界強度のもとで負性抵抗を示す。このとき、素子中に電子の蓄積層と空乏層が形成され  $10^7 \text{ cm/sec}$  の速度で陰極から陽極へ移動し、陽極側に吸収されるとまた別のドメインが陰極側から発生し、この過程のくり返しにより周期的に変化する電流振動が現われる。したがって固有発振周波数は素子の長さ  $L$  で定まる  $v_d/L$  (ただし  $v_d$  はドメインのドリフト速度) で与えられる。BTL では現在  $2 \sim 20 \text{ GHz}$  の連続波  $0.1 \text{ W}$  の発振が得られている。最近ではさらに上記電子遷移によって起こる個々の電子のドリフト速度の負特性を高電界ドメインが形成される前に直接利用する LSA モードの発見により、上記走行時間周波数モードで動作させる場合より高出力、高効率 LSA の発振器が検討されている。

GaAs が Ge, Si に匹敵するほど工業的に重要材料となり得るか否かは現在の所一つに固体バルク発振器の発展にかかっている。

4. その他の III-V 化合物デバイス

1) トランジスタ

現在トランジスタはなんといっても半導体デバイスの内最も重要なものである。最大動作温度としゃ断周波数はトランジスタパラメータの重要なものであるが、これらはその半導体のバルクの性質から容易に調べることができる。すなわち最大動作温度は  $T_{max} = 533 E_g \text{ } ^\circ\text{K}$  <sup>(10)</sup> で近似され、またしゃ断周波数は  $\sqrt{\mu_e \cdot \mu_h}$  に比例し誘電率の  $\frac{1}{4}$  乗に逆比例する。第 3 表と前出第 1 表から、Ge, Si より広いバンドをもつ GaAs, InP, AlSb などのうち Ge トランジスタより高いしゃ断周波数をもち得るものは GeAs トランジスタのみである。GaAs トランジスタは Ge の 100°C, Si の 250°C に対し 450°C まで動作し、原理的には GaAs はトランジスタ材料として Ge, Si を凌駕し得るものといえよう。しかしながら製造上種々困難な問題を含み、Ge, Si デバイスの動作し難い高温で使用するというきわめて限定された領域が残されているが一般には価格、安定性、動作の点で期待できるものではない。

第 3 表 III-V 化合物半導体特性

Table 3. Values of some semiconductive parameters of III-V compounds

	バンド幅 $E_g(\text{eV})$	易動度 ( $\text{cm}^2/\text{v}\cdot\text{sec}$ )		有効質量		熱伝導度 ( $\text{Wcm}^{-1}\text{deg}^{-1}$ )
		電子 $\mu_n$	正孔 $\mu_p$	電子 $m_n^*/m$	正孔 $m_p^*/m$	
GaP	2.3	110	75	0.12		10
AlSb	1.62	200	420	0.3	0.4	11
GaAs	1.36	5,000	420	0.072	0.5	12
InP	1.25	600	150	0.07	0.5	11
GaSb	0.67	4,000	1,400	0.05	0.5	14

2) 光電変換素子

光伝導(PC), 光電磁(P EM)効果はキャリアの再結合に関する情報を提供するため多くの III-V 化合物について調べられているが、これらのうち実用と結びついているのは InSb の PC, および P EM による赤外線検出のみである。前者は液体窒素温度では高感度であるが室温では用いられない。後者は低感度であるが室温でも使用可能であり、 $7\mu$  の長波長(放射源温度 200°C)まで感度を示しかつ応答  $1\mu\text{sec}$  ときわめて速い。一方フォトダイオード特にいわゆる太陽電池材料としては、バンド幅 1.1~1.6 eV をもつ半導体 (InP, GaAs) が理論的には最適であるとされている。しかしながら実際には最も高効率な GaAs においても (波長感度ピーク  $8,500 \text{ \AA}$ , 効率 12%) Si 太陽電池より劣っておりかつコスト高で

ある。ただ高温での効率が高いことで使用されることがある。

III. む す び

III-V 化合物は出発点において他の化合物半導体より遅れていたにもかかわらず、そのうちいくつかのものは、一つには物性的興味から、いま一つには Ge, Si との類似性のゆえに研究は急速に進展した。初期の頃はバンド幅、易動度の大きさが Ge, Si にかわるべき実用素子条件の対象とされていたが、この意味では他の半導体同様不成功であり、特殊用途すなわち InSb, InAs の磁電変換デバイス、InSb 光電素子、限られた範囲で用いられるバラクタダイオード、トンネルダイオードなどその守備範囲は Ge, Si にくらべてまったく微々たるものであった。しかしながら 1962 年のレーザダイオード、1963 年の Gunn 発振と工業的にもきわめて希望多き新現象が相つぎ、ここではバンド構造的に Ge, Si のまったく入り込む余地がないため、爆発的な研究開発が展開された。特に後者では高純度材料、結晶完全性を必要とし気相成長法などによる新しい製造技術が並行して進歩している。元々 GaAs は単体元素である Ge, Si にくらべ製造困難であり、したがって結晶自體現在はるかにコストが高い。発光ダイオードの有用性にもかかわらず現在まで期待された程の実用化を不可能にしている原因の一つはここにある。

しかしながら今後もマイクロ波装置の固体化は一層急テンポで進められるであろう。このうち Gunn ダイオードで特に抜んでたものとなるか否かは軽々しくいえないが、GaAs が Si について有能な半導体という名に値するのはこのバルク素子の成否にかかっている。

参考文献

- (1) Welker, H.Z.: Z. Naturforsch. **7 a** 744 (1952)
- (2) 片岡: 磁電変換素子 p 58 昭 40 (日刊工業出版)
- (3) O.J. Mengali and T.S. Shilliday: Solid State Electronics **7** 379 (1964)
- (4) Hall, R.N., G.E. Fenner, J.D. Kingsley, T.J. Soltys & R.O. Carlson: phys. Rev. letters **9**, 366 (1962)
- (5) M. Gershenzon, R.M. Mikulyak, R.A. Logan and P.W. Foy: Solid State Electron., **7** 113 (1964)
- (6) Hans Rupprecht: Electronics, Nov 13, 125 (1967)
- (7) R.A. Logan, H.G. White & F.A. Trumbore: Appl. phys. letters, **10**, 206 (1967)
- (8) J.B. Gunn: Solid State comm. **1**, 88, (1963)
- (9) J.A. Copeland: Proc. IEEE., **54**, 1479. (1966)
- (10) Jenny, D.A.: Proc. IRE **46**, 959, (1958)
- (11) Kruse, P.W.: J. Appl. phys., **30**, 770, (1959)
- (12) Loferski, J. Appl. phys., **27** 777, (1956)



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。