

Ⅲ－Ⅴ化合物混晶半導体の界面デバイスと 量子井戸構造（GaAs 系物性を中心にして）

佐 藤 均

Quantum Confinement for Compounds Semiconductor
Gallium-arsenide and Surface device

(Quanteneinsperrung, grund Wissenschaft u. Mikro Technologie
der Gallium-arsenid Verbindungs Halbleiter)

Hitoshi Satoh

[研究主旨] 砒化ガリウムは今日基礎科学でも又近未来の超高速エレクトロニクスにおいても注目をあび前者では粒子 detector や円偏光を用いたスピン偏極電子源，スーパーアトム等に又後者ではいわゆる HEMT 等に用いられ特に光伝導等光学的特性が注目され同時に量子井戸超格子はそのいずれでも大きな期待が持たれ，その意味で現代的で興味深いテーマであろう。ハイテクが基礎科学を助長すると云えるシーンがそこでは展開されているからである。GaAs はすでに衛星中継 BS アンテナのコンバーター中に用いられている（低雑音性）。又いわゆる CD にも不可欠である。

はじめに

今日の electronics の中心たる無数の半導体素子 device は疑いもなく固体回路において具体化されている。実は前回にきわめてむつかしい高臨界温度をもつ CuO をコアにもつ超伝導体（第 2 種）の発現メカニズムに考察を加えたがこれも固体（凝縮相）という点では同じでありそればかりか半導体素材とはきわめて共通した有用な概念を有し例えば正孔（ホール），ドープ，有効質量*，エレキシトンの寿命，フェルミーエネルギー E_F ，エネルギー帯，等々物性論理的コンセプトである。従って明らかに半導体材料は第 2 種超伝導体のコンセプト上からは前駆物質と考えなくてはならないだろう。

従って今回は半導体問題で特に空間電荷層や反転層等 junction の界面と，それから具体的な物質として単結晶性のⅢ－Ⅴ化合物系半導体これには InSb, GaAs, AlGaAs, GaP 等が属するが特に筆者には GaAs 及びヘテロ junction に大なる関心をひきおこした。これは光 diode や

半導体 Laser, 高速演算素子等多くの不可欠な用途が知られている。従ってこの領域も又有用な概念の宝庫である。

本 論

最近 NHK-1 TV で「電子立国日本」のシリーズを我々は感銘深く見そこで第二次世界大戦後に日本が米国に習って40年経った今世界最高のエレクトロニクス技術立国になった。これは量子力学から派生した量子エレクトロニクスの基本を利用して日本はやはり世界一リッチになることが出来た。戦後間もない頃の主要な素材は単体 Ge であったが現代では単結晶 elevennine の純度のケイ素が主でありその莫大な同辺技術もやはり日本が独占している感が強い。化合物半導体の祖はリリエンフェルドであろう。

今や半導体問題は日米間の単に技術を超えた政治問題化する程現代社会へのインパクトは大きい。地方現代科学史から見て半導体の理論はいつ頃から生れたのだろうか、疑いもなく量子力学誕生の国でもあるドイツですでに1930年代初めにすでに現われ、又意外ながら、Dember effect に関しソ連で例えば J. Joffe や L. D. Landau 等により1934年に hot-electron の考えが又1936年はリフシツの証言によれば「ランダウの奇跡の年」でもあり Landau は「半導体の光電効果」のすばらしい理論を早くも展開していたのであった。又 Joffe の半導体の薄膜や気体分子蒸着法の元の考えもそこではあったと聞いている。やや遅れて米国では Schotky 接合で有名なショットギーやショックレー等が半導体をエレクトロニクスに実用化した。先刻の「電子立国日本」で知って驚いたが昭和23年頃占領下の日本の様子はこっけいな程みじめだった。半導体トランジスターの概念は当時日本に殆んどなく菊池誠氏の証言によれば東大の大先生すらそのメカニズムが呑み込めないのだった!! 当時は単結晶の上に二本の針をごく接近して立てたのを使っていた。材料自身入手は困難で研究室も貧弱だった。GHQ の窓口を通して細々とトランジスターの情報が入手出来たに過ぎなく当時の日本人は米国のオールマイティにただ圧倒されるだけであった。数年後に東通工今の東芝の前身ですらおずおずと Ge のトランジスターに着手したが不良品があまりにも多く常に泣かれていた。或る東通工の幹部は「東芝でトランジスターをはじめるとは何事だ、東芝はただ真空管さえ作ってればいいんだ」と叫んだのだった。その頃企業では農村から手先の器用なトランジスターガールを募集した手作業で生産したが部どまりが悪く常に採算性におびやかされていた。半導体の原理や理論は相変わらず不確実で不備な為きわめて不安定であった。やがて日本の技術者の米国もうでが続くことになる。技術導入でありそれに余念がなかった。昭和36年頃に Ge に代って Si の超高純度の太い単結晶棒の作製に成功してからは次第に日本はとんとんびょうしに進展して行ったし同時に理論も明るくなり始めた。Si の太棒の径が高まるにつれて製品のぶどまりは向上し益々採算に合う様になりついに今日では10兆円産業とすらなった。理論実学ともに世界をリードできる様になったがその中には東北大の西沢潤一先生の様な発明王もおられたし又エサキダイオードで有名な江崎先生の力も忘れてはならないだろう。

後者は量子力学のトンネル効果を実際半導体 p-n junction で実現されたのであった。技術的な事柄に言及すればきりのない話だがケイ素 Si の製造工程は今日では無人化された工場で絶対に Na の汚染は厳禁であることそして SiO₂ の酸化被膜の発見と写真技術電子線リソグラフィ等が重大な進歩をもたらした。これは極度にクリーンな製造業といえよう。SiO₂ (石英) の保護膜の発見 (U. S. A.) はきわめて本質的なものでこれにより例えば MOS-FET (金属酸化物-半導体電界効果トランジスター) の量産が可能になったがこれは GaAs/AlGaAs のヘテロ接合トランジスター共に後述の二次元電子系を得ることを可能にしたし今では p-n 接合よりも MOS-FET の方が一層量産されている。これらはことごとくその界面つまり空間電荷層や反転層がきわめて重要な意義をもっている。更に加えてエピタキシャルの技術によって原子層を一枚一枚レンガを積む様に並べる手法がいやが上にも固体物理学や固体回路の進歩を具体化せしめた。エピタキシーは元来ギリシヤ語由来の英語で「arranged upon」の意味とされ、間もなく atom を一ケタ積み上げることも夢ではなくなるであろう。これにより従来技術的に不可能と思われたダイヤモンドの dope された半導体や SiC のそれも製造可能となる筈である。その他例えば GaAs 層と AlAs 層を交互に積み重ねて量子井戸ポテンシャル構造や超格子も比較的容易につくれる様になった。先刻の界面や空間電荷層等

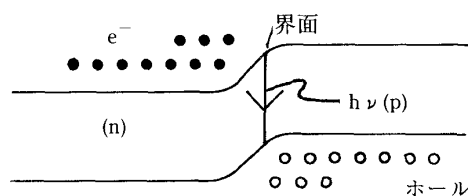
の厚さはほぼ電子の物質波 (de Broglie 波) 波長程度で 50\AA ~ 数百オングストローム位の範囲が我々にとって重要である。

□ガリウム砒素 GaAs 問題の重要性

III-V 化合物半導体たる GaAs は密度 5.3, 屈折率 4.3, 誘電率が 11.1, 融点が 1234°C , 電子移動度 ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{S}$) = 6000, 正孔の移動度 400, で禁止帯巾 (eV) は室温で 1.45, 結晶型は立方晶系である。CdS と共に圧電効果が大きく以前によく超音波変換素子として研究されて来た。

(一方 AlAs は禁止帯巾が 2.16eV だが電子正孔共に移動度が低く以前は用途が無視されたが最近超格子又は量子井戸構造の障壁層として工業的にも重視され始めた)。

1960年代では GaAs の単結晶 (バルク状) は専ら HB (水平ブリッジマン法) により炉に温度勾配を持たせて作製されて来た。転位の少い良質なバルク単結晶が作られた。60年代末にはじめて江崎による Ge と GaAs 間のヘテロ接合のアイデアが出現したが原子を一々積み上げる技術が無かったので実現はずっと後になった。一方 Esaki-diode ではその一つの特徴として I-V 曲線に明瞭な負性抵抗領域が存在するが Ge, Si よりも GaAs の方がはるかにその点で性能が高いことが早くから注目された。又 GaAs は後述の如く耐放射線や耐熱性も優れている。エレクトロニクスでは超高速, 超高周波増巾素子として 60~70年代からすでに期待が高まっていた。1962年に USA の M. I. Nathan 等は GaAs の pn-junction に大きな順方向電流を流すとレーザー光が発することをみとめたがこれが Semiconductor レザーである。発光は勿論電子が充満帯の正孔と再結合して生ずる。GaAs 半導体素子自身が空洞共振器となり鋭い分光特性のレーザー発光がおこる。混晶 Ga ($\text{As}_x\text{P}_{1-x}$) においては組成比により発光ピークが $6500\sim 8400\text{\AA}$ の間で変化し又同じく GaAs と InAs の混晶では $8400\sim 31000\text{\AA}$ の発光すら可能である。GaAs 系半導体は直接遷移型である為に Si にない優れた光学的特性があり将来のオプトエレクトロニクスや光通信との相性が優れている。GaAs レザーのエネルギー準位は図のようになる (P. 6 上段)。又 n-型の AlGaAs での光伝導と深い不純物準位 DX も関心のもたれる所である。DX は以前には不都合なものと思われていたのである。(P. 10右図)



GaAs 化合物半導体は本論文の一つの中核をなしている。多分レーザーの発明と同時期に歴史上で注目をあびはじめ我国では先刻の東北大学の西沢氏がその熱処理からはじめたのがきっかけであった。彼ははじめて As の蒸気圧制御下で電気炉の中で温度勾配下で GaAs の立方晶単結

晶作成に成功しセンセーションを巻き起こした。Ge, Si および GaP が間接遷移型なのに比べ GaAs や混晶 $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 等は直接遷移型に属し元来 GaAs は電子の易動度の大きいことで知られていた。

これは InSb と同様 III-V 化合物半導体で電子の速度は Si に比べても数倍高くそのヘテロ接合はバリステック性の為に超高速コンピューターの心臓部に欠かせないものとなった。

又赤色の光 diode にも現に活躍しているが青色の発光は無理で又別の例えば II-VI 化合物半導体¹⁾を探さなくてはならない (例えば CdSeZn 系の)。純粋な GaAs は共有結合性が予想以上に高く SiC よりもむしろ高く Pauling の式から 93% 位である。 $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$, InAs もほぼ同じ位の共有結合性をもつ。ダイヤモンドや Si, Ge は波数空間 (k 空間) で非対称で無放射遷移が多いが GaAs や InAs ではその様なことはない。k 空間で対称的であり又エネルギーギャップも例えば Si より大き目であるがこれが反って有利にもなる。GaAs 単結晶系で Ga と As の位置の交換でも不変である。屈折率が大変高い。Ga と As の原子半径はほぼ等しい。^{***}

1) Mg, Zn-S, Se 混晶系ですぐれた青色レーザーが実現されつつある。(CD 中に)

□正孔の再考察とバンド理論 (フェルミ粒子たる正孔)

すぐ前回の論文で大多数の高温セラミクス性超伝導体*の電流のキャリアが正孔だと事もなげにのべたし電子正孔ペアの「エキシトン」が発現に関与しているかも知れないと示唆をした又電子と正孔の間の擬似対称性を云々した。(* 特に電荷移動モデルは有望)

勿論正孔型というのは carrier の majority が正孔 (hole) で minority が電子 (e^-) の意味だ。

さて実は半導体 (diode や transistor) の発明発見はもとよりその作動メカニズムの説明にはぜひ正孔が必要であった。つまり正孔と電子の二本立てのシナリオが不可欠だった。それと同時に少数キャリアのドーピングの概念もしかりである。少数派は有限時間の後多数派キャリアと再結合して発光消めつする筈だがその寿命が半導体の周波数特性に大きく影響する。 e^- より mobility の低い正孔は厳密な意味で e^- の反粒子ではなく、真の反粒子はポジトロン e^+ であり、いかなる素粒子表にも正孔は無い。つまり固体物性論であたかも裏口入学的に粒子の仲間に入れてもらっているかの様で不思議な存在である。実は昭和23年当時我国には正孔とか少数キャリアドーピングの概念がなかったので東大の大先生ですら半導体の作動がわからなかったのは不思議ではない。正孔概念が何時登上したかは不明だが例えば alkali halide 結晶の F-center (Farb Zentrum) の様な格子欠かんに関して相当古くから見出されたのであろう。(或いは化学結合からかも知れない。例えば一電子結合には正孔が介在する)。結局、正孔とは e^- の抜け穴だが低エネルギーで励起され得る擬粒子なのである。他方我々現代人は無数のセンサーにより囲まれて生活している。ここでバンド理論の解説をするつもりはないが p 型半導体と n 型半導体は大抵セラミクス製であろう。これらはバンド構造から見て伝導体の巾の方が価電子帯の巾より広くその為に e^- の方が正孔より易動度が高い。同じ導電率を得る為に n 型の方は電

子数は少くてよいがP型では多数の正孔が必要となる。この事はP型半導体はサーミスター向きであるのに対しn型のそれはガスセンサーに適していることがわかり実際その様に使い分けられている。この様にセンサーの使い分けが可能になったのはバンド理論があつての事である。GaAs系でも重い正孔と軽い正孔がある。従つて励起子にも二種あることになる。

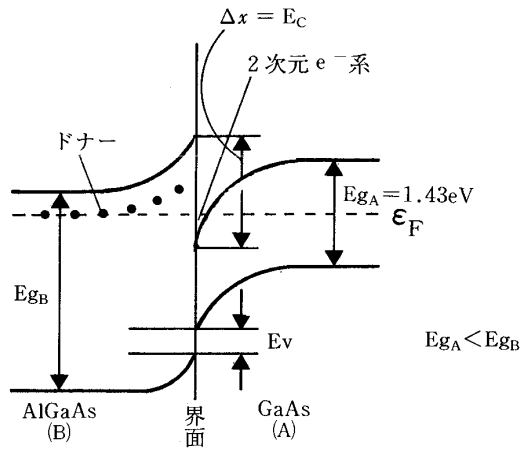
□固体回路（第二の真空の実現）

TVのブラウン管の様な真空管の真空を第一の真空と仮称すればSiやGaAs等の単結晶中の真空は第二の真空となろう。いずれも電子の制御にはぜひ必要なのだがその真空度は第二のそれははるかに完べきなものであろう。これはひとつに原子そのものの性質の利用で純粋な固体やその回路ではじめて可能になった。

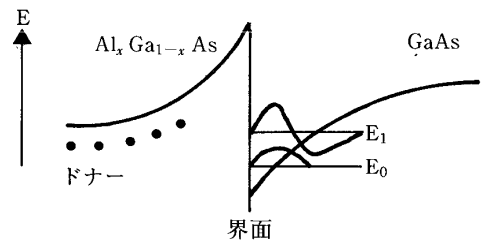
従つて単結晶Siを例にとればゾーンメルト（帯熔融法）やその他の超高度の技術は極度に人工的人為的にもかかわらず最後の所は自然たる原子中の真空を利用していることになる。

かくして電子は再び自由に動く場を得たことになるがそれは $+$ の電荷をドーブにより容易に駆使でき半導体中では正孔をやすやすと作れる。半導体ではドナーやアクセプターの「電流のもと」つまり活動要素を自由に真空中にばらまき固定させることができる。真空管と異なりガラスが破損する心配もなければ、非常に小さな空間にマイクロでデリケートな細工ができICの様なものも量産が楽に行く。又ヒーターも不要である。火災や耐震性の問題もなくなった。無限にコンパクト化も可能である。こうゆうことは第一の真空（真空管）では一切不可能であつた。固体回路は正に主役である。さて汎用コンピューターの1000倍のスピードの夢の超高速トランジスターHEMT: High Electron Mobility Transistor) が80年代に入ってから注目されているがこれは固体結晶たるGaAsとAlGaAsのヘテロ接合で具体化しようとしている。何故その中で電子が高速で走れるかだがHEMTではドナー不純物の添加領域と電子が走る領域が空間的に分離されているからでdopeしたAlGaAsとpureなGaAsの界面のGaAs側中を電子が散乱を殆んど受けずに走行できるからであり、しかも超低温に冷却すれば電子mobilityは飛躍的に向上する筈である。Siの実に50倍近いスピードが出せる!! このトランジスターはMOSFET型構造をしている。つまりコンデンサーの原理に基づく電界効果トランジスターである（それにより、ソースからドレイン電極が導通できる）。更にMOSFETのソース、ドレイン電極に超伝導物質を置いた超伝導トランジスターによるジョセフソン電流をつくる可能性すら論じられている。ジョセフソン素子はスイッチの早さでよく知られている。トンネル効果（波動関数 ψ のバリエーションに対する滲み出し）の考えにもとづくものだが原子を一ヶ一ヶpileする超ハイテク技術があれば実現できるに違いない。GaAs/AlGaAs系では（分数）量子Hall効果も見いだされその意義は多岐にわたる。

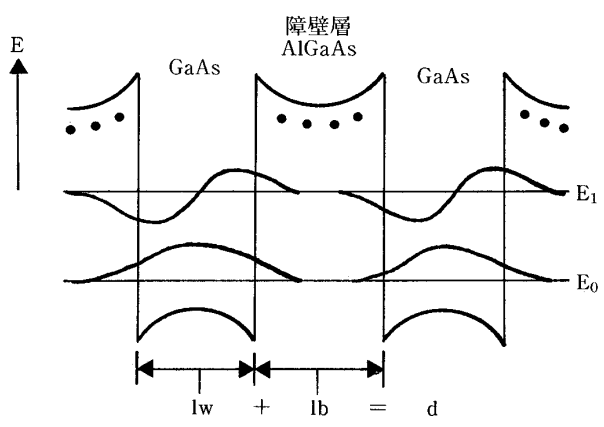
純理論的に興味のあるものとしてSAつまりスーパーアトム人工原子すらその製法が提案されているがその性質は普通の原子のオービタル順とは全く似ておらずむしろ原子核のそれに似ているが強いL-S結合は欠けている。更にSAは通常の原子と異り周期性も無いことが計算によって証明されている。普通の



(a) $(E_{gB} - E_{gA} = \Delta E_v + \Delta E_c) \doteq \Delta x + \Delta E_c$

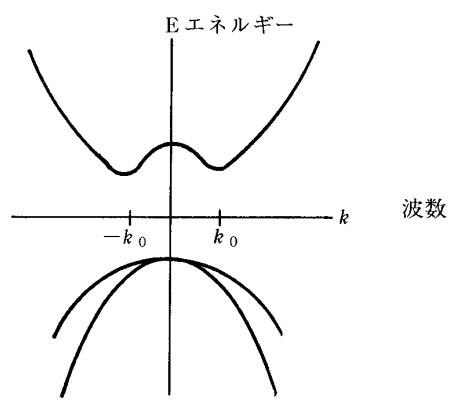


(b) サブバンド内の波動関数 φ

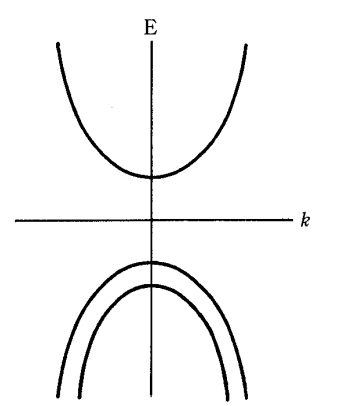


(c) 波動関数 φ の閉じ込め

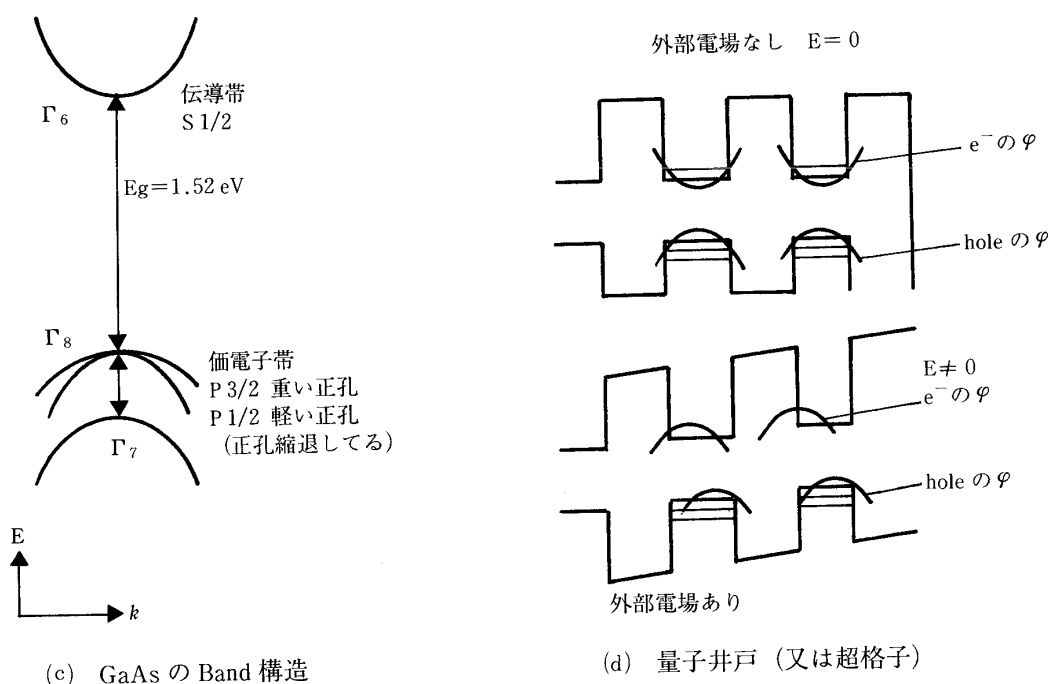
$Al_x Ga_{1-x} As$ で例えば
 $x=0.45$ でエネルギー gap はおよそ
 $2eV$ となる



Ge, Si
 間接遷移型
 (a)



正孔非縮退
 $GaAs$ 系
 直接遷移型
 (b)



(c) GaAs の Band 構造

(d) 量子井戸 (又は超格子)

原子とはエネルギー順位を異にしている。(オービタル順位の異常)

近年分子線エピタキシー (MBE) や金属有機物気相成長 (MOCVD), イオン注入法の様な超薄膜結晶成長法の進歩により優れた二次元電子系 (フェルミ準位が最低サブバンドであれば正確に二次元電子系又は二次元電子ガスと考えて良くこの系の大きな特徴は電子濃度を V_G ゲート電圧で自由に制御できる。これは界面平行方向電流を V_G でコントロールできるがこれが現在コンピューターの中核部に起用される MOS 電界効果トランジスタの原理でありシリコンの MOSFET は半導体 LSI 技術を生み出したデバイスである。電子親和力の異なる二種類の半導体を接合した半導体ヘテロ構造やポテンシャル量子井戸, 更にその周期的 repeat である多重量子井戸や半導体 super-lattice (超格子) でこの二系では非常に優秀な界面の作成が出来る為 MOS の反転層に比べてはるかに良質な二次元電子系が実現されその実例として前述の GaAs/AlGaAs のヘテロ構造と多重量子井戸ポテンシャルを図示しよう (P.6)。左図は単一ヘテロ構造で AlGaAs の障壁 potential と GaAs 中の電場により電子が界面付近に閉込められている所で, 右図はポテンシャル量子井戸で電子は AlGaAs 障壁ポテンシャルにより GaAs 層にやはり閉込められている。尚先述の分数量子 Hall 効果は GaAs/AlGaAs ヘテロ構造以外に二次元正孔ガスやシリコンの MOS 反転層でも観測されている。

コンピューターにおいて電源を切っても記憶内容を忘れないメモリが不揮発性メモリーだがこれには強誘電体と絶縁体の中間に半導体をはさんだものや先述のポテンシャル量子井戸によるものがあり後者は浮遊シリコンゲート型不揮発性メモリーが有名である。いわゆる PROM つまりプログラマブルリードオンリーメモリは正孔に関しても電子と対称的に起るように基板を構成して電子ホール (正孔) の注入が可能となりその結果電子で書込んだメモリはホール (正

孔) 注入により消すことができる。この試みはまさに正孔の存在を証明し、実感させる実験だといえるだろう。正孔が左へ行くことは電子が右へ進むのと同じである。尚不揮発性メモリーは浮遊ゲートに依ってポテンシャル井戸を作るかわりに SiO_2 と Si_3N_4 の二重層を作りその界面にできる電子の trap を利用する MNOS なるものがある。

□超伝導体と MOSFET の結合 (ジョセフソントンネル電流)

MOS 電界効果トランジスタのソースとドレイン各電極部位に夫々超伝導体を取りつければきわめて優れた超高速のトンネルジョセフソン電流が得られ超高速スイッチング作動が実現するだろう事は過去にも理論家によって指摘されたが超微細加工技術がなかったので具体化しなかった。今日では決して夢ではなくなった。というのはソースとドレイン間の間隔 L を自由にコントロールでき両方からの波動関数がオーバーラップ出来る程に狭く出来るからである。

($< 1 \mu$)。これは超伝導体の近接効果であり Cooper 対の波動関数 $\Delta(x)$ は距離 ξ だけ浸み出しソース・ドレイン間の間隔 L との間に $\xi \geq L$ ではジョセフソン電流が流れる。 ξ は正常状態にある電子の拡散係数 D と温度とすれば $\xi = (\hbar D / 2\pi k_B T)^{1/2}$ で現わされ、ジョセフソン接合の度合がゲート電圧で決められることになる。

ここで話は少し古くなるが1960年頃レーザーが発見された時と前後して接合検出器 junction-detector つまり原子核半導体検出器がとりわけ原子核研究等にはじめて使われこの分野に革命的進歩をもたらした。同検出器は界面たる半導体接合部に逆バイアスを印加し、この接合部に生じた空乏層により様々な放射線を検出するのだが、ここで得られた電気的出力パルスの大きさは電離放射線が空乏層でついやしたエネルギーとまさに比例関係が成立つ。

バックグラウンドの下で荷電粒子を測定したい時は空乏層の厚さを制御することにより測定を至適化することができこの厚みは逆バイアスと基板の固有抵抗の関数になっているが接合部に印加ができる電圧には上限がある為に特に軽い粒子の検出で必要とされる広い空乏層を得る為には高い固有抵抗の材料が不可欠となる。シリコン接合検出器 (表面障壁型や pn 接合検出器、及び Li ドリフト型 Si (又は Ge)) 検出器等が重要な役割をする。Li はシリコンにおける donor として働き 200°C に加熱されると Li イオンは移動し易くなる。Li を p 型 Si に拡散させると p-n 接合が生じさらに高温で逆電圧を加えると Li^+ は陰極へ移動し始めこの移動の途中に Li^+ は結晶格子中のアクセプターイオンたる B^- と出会い各々の電荷を打消し合ってそこにとどまる。かくして Li^+ が空乏層を順に通過して p 層で B^- イオンを打消し合い空乏層の厚さを増して行きついに 2 cm 位の厚さのものが得られる。これによって具体例として $^{207}_{83}\text{Bi} \rightarrow ^{207}_{82}\text{Pb}$ の γ 崩かいで、旧式のシンチレーション検出器に対し Ge (Li) のそれでは感度が数倍も上昇したのである。透電率 ϵ が NaI (Tl) にくらべめ 1/1000 以下であるためである。

□有効質量問題

金属では内部ポテンシャルの効果は非常に小さく有効質量と静止質量は殆んど同じであり自由電子モデルが良い近似であったが半導体とくに GaAs, InAs や Si, As, Sb の様な半金属では電子の有効質量は静止質量の $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 倍でしかなく又電気伝導度の高低がただちに有効質量の大小を反映するのではない事が明らかである。有効質量は k 空間での等エネルギー面の曲率で \hbar を割ったものとして定義され材質の方向と種類による。もし有効質量が負である場合、曲率 $\partial^2 E / \partial k_x^2 = \hbar^2 / m_x < 0 \quad \therefore m_x < 0$ ならばこれはまさしく正孔に相当するだろう。半導体の特徴は結局電流のキャリアが電子と正孔の両方であることと温度が昇ると電気伝導度が金属とは逆に上昇することであろう。そこでは有効質量方程式 $E_{nk} = E_g - \frac{R^*}{n^2} + \frac{\hbar^2 k^2}{2M}$, ($n = 1, 2 \dots$), $M = m_e + m_h$ が大切な役を演じる。 R^* は有効 Rydberg 定数である。

□GaAs 系半導体レーザー

ここで再度 GaAs/AlGaAs 系の半導体 LASER を取り上げることにしよう。LASER は強い「負の温度分布」が現実できなくてはならぬが数 μm の薄い GaAs を両側面から n 型 AlGaAs と p 型の AlGaAs でサンドイッチ状にしたものはまさに理想的な非平衡な負温度分布をし特に中央の GaAs の屈折率 $n = 3.6$ と大変高く従って高い反射率を有する。これは量子井戸に似て左側の n 型からは電子が、右側の p 型 AlGaAs からは正孔がやってきてエネルギーギャップの狭い GaAs のポテンシャル井戸にたまる。中央の GaAs はまさしく「誘電体導波管」の役を演じている。そして p - 及び n 型半導体の界面から電流と垂直方向へとレーザー光はとび出す。(位相のそろったコヒーレント発振はレーザーの一つの特長である)。(P. 11 中段の図)

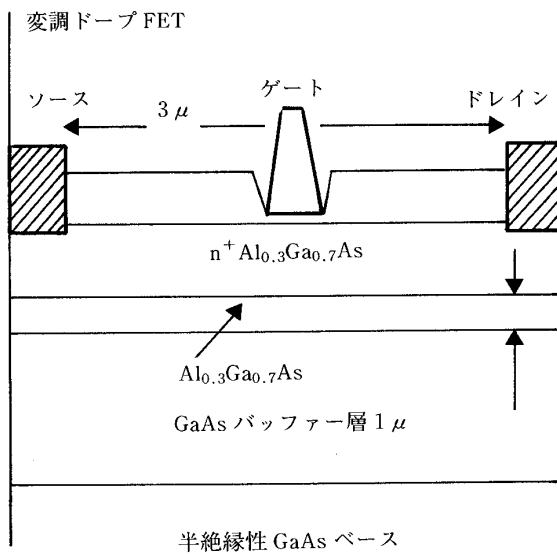
この世界でも $\Delta \nu \cdot \Delta t \geq \frac{1}{2}$ なるいわば不確定性関係*が成立つ。(* 単色性とパルス巾の間の)

□GaAs と Si の界面問題

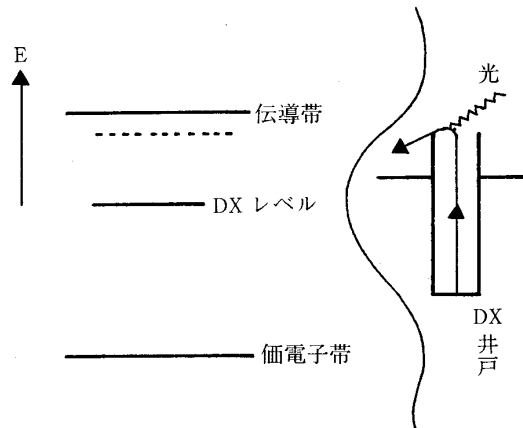
ガリウムヒ素の発光素子は光 IC (光集積回路) に用いることが出来るがつまりシリコン基板に GaAs 発光素子を組込む際 Si と GaAs の熱膨脹率の違いから発光素子にひずみが出て破損してしまう。GaAs 単独の光 IC は高価で発熱し易く小型化に限界があるのでどうしても Si 基板につくらせなくてはならないがその為に重大な工夫が必要である。Si 単独では発光しないのでそこに困難性が生じるが近々解決されるかも知れない。その為には Si と GaAs との界面で両方の熱膨脹率の差を吸収するメカニズムを考案しないとイケない。

最近ニューロントランジスターなるいはば脳神経細胞の超並列処理によく似た働きをするコンデンサーにより電圧 (情報) コントロールされる一種の MOS-FET がとりわけ東北大学で開発された。これは多数の入力信号のゲートがコンデンサーを介して接続された構造を有しその容量で入力信号 (電圧) に重みをつけそれらの加重平均によってスイッチ on, off を制御す

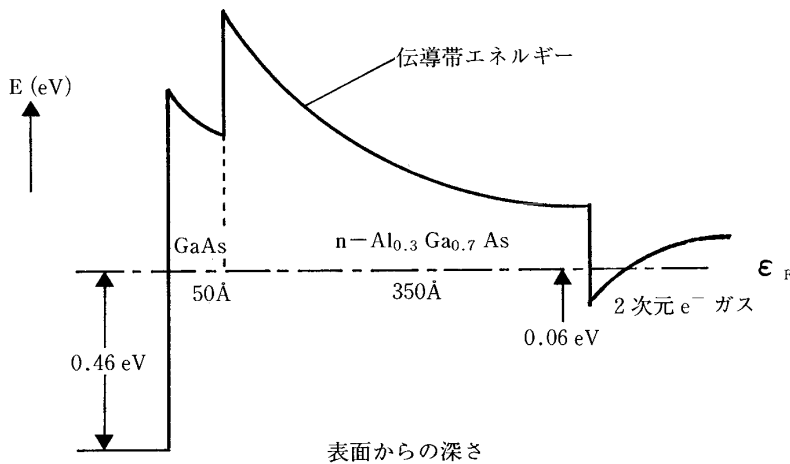
る点が人間のニューロンが複雑のシグナルを一度に総合的に判断評価して out put するのに大変似ているのである。AD コンバーター（4 ビット）では素子の粒が1/10以下に減らすことが出来消費電力も大巾に節約できるという。ここでも当然超 LSI は0.1 μ unit の超微細加工技術が重要になっているがこれを駆使して信号のゲート（入力電極）を複数化し、各ゲートに優先順位をつけ各信号の電圧合計が一定値を超えた時のみ出力するがその構造がニューロンが隣接し合った複数の細胞からのシグナルを総合判断し新たに送信する仕組みに酷似するニューロン MOS トランジスターと正式に呼ばれている。勿論素材を一部 GaAs 系でつくことも出来るだろう。MOS はバイポーラのトランジスター程高速に作動しないがより安価で経済性が良い。しかしあまり過大な期待はすべきでなく早くも学習プロセスが本物のニューロンの様には行か



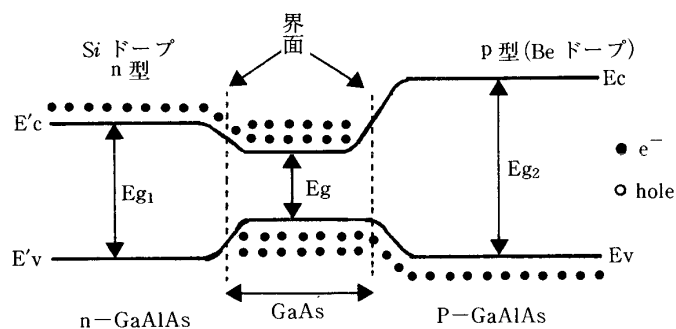
(a) 短ゲート変調 MODFET (HEMT) の 1 例



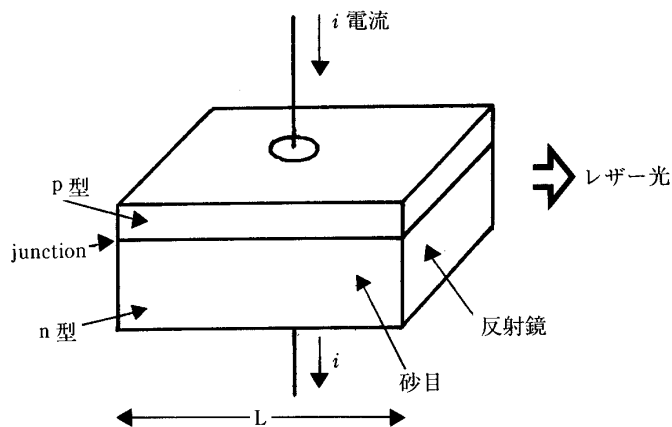
(c) n 型 GaAlAs での不純物準位…と深い準位 DX



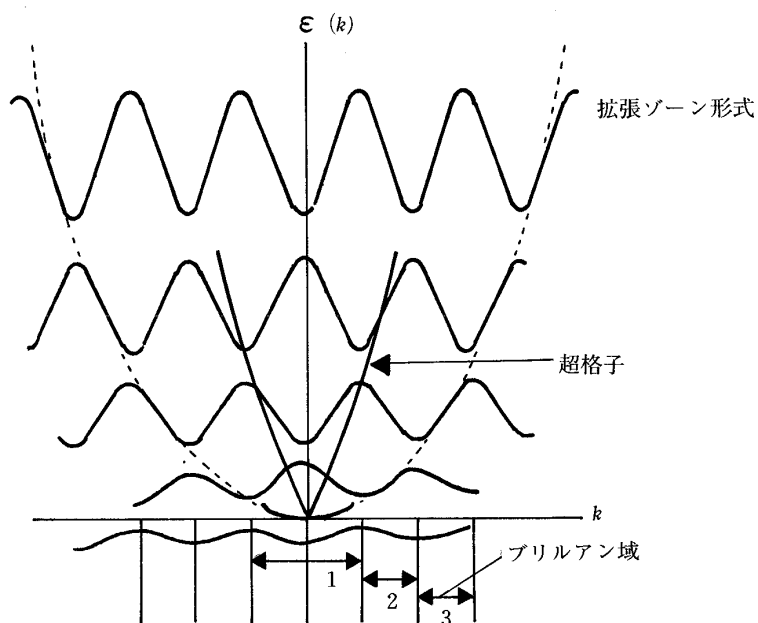
(b) 同じ MODFET のエネルギー図



(a) ダブル・ヘテロ接合 diode ($E_g < E_{g1} < E_{g2}$)
(相補性ダイオード)



(b) 光共機器
(例えば CD 用の二次元的レーザー)



(c) エネルギー帯

ないとの意見もある。

□再度 GaAs 系化合物，混晶半導体について

技術史から見て確かにポスト Ge はケイ素であったがはたしてポストケイ素が GaAs 系半導体だと一概にいうことは困難であろう。というのは GaAs 系は資源的に希少で高価であり又精製や製作技術も Si に比べそれ程完成度は高くないからである。しかし光学的，電氣的，磁氣的諸性質はいずれもケイ素にまさっており光 device とのつながりもより深いものがある。加えてより高速作動性，低電力消費性，高周波での低雑音性，耐熱性，耐放射能性，より優れたレーザー光，磁気敏感性，等々があることは疑いなく Si 半導体の持っていない短所をおぎなつて余りあると思われる。太陽電池に対しても明らかにより高いエネルギー変換効率を有する。

完全単結晶の製作は地上よりも無重力状態下のほうが将来有利だともいわれている。又 GaAs 系では半導体製作工程も Si より少なくて済みそうである。(SiO₂ 酸化膜不要) 又電気→光の変換の自由度が大きいことも見のがせない。Si 系では電気→光のプロセスは殆んど期待できなかった。GaAs 半導体系では直接遷移型なのでフォノンの媒介は不要でフォノンのそれだけで済む。(もっとも最近 Ge でも結晶を微細化できれば発光するとのことである)。近い将来 GaAs 系の価格を下げる可能性は一に超微細加工技術にかかっていると思われる。イオン注入方式等は有望であろう。すでにインジウム In を添加しなくても格子欠かんや転位のない又はきわめて少い GaAs 単結晶は得られている。完全結晶後に電子は殆んど散乱されずに超高速で走れる。単結晶は主に LEC 法つまり磁場のもとでチョクラルスキー引上げ法で達成される。その点では Si と同様だが，磁場をかけたひ B₂O₃ の封止液を使ったりよりきめ細かい技術が要求される。又 GaAs は「ガン効果^{*}」と称するつまり高電界をかけるとマイクロ波を出す大切な性質がある。このガン効果は発光現象におとらず GaAs の生命とも云える。かくして GaAs のウエハやチップは Si のそれに比べて歩留りは良くないにせよ FET (電界効果トランジスター)，IC，LIC，ソーラーバッテリー，レーザー光，ダイオード，LED 等のデバイスが可能になっている。FET はとりわけ MES-FET でここでは電子の走行時間を出来る丈短かくすることが重要である。ともかくヘテロ接合での様々なデバイスの性能はそのスムーズな界面の性質が決定することは確かである。(* Gunn effect, スピードメーターに利用されている。)

マイクロ波増巾器ではオーム性接合が，赤外線検出器では金属-半導体接合が又レーザーダイオードでは p-n 接合界面が，演算素子では金属酸化物半導体構造の夫々の界面がシャープであることが重要であろう。今日シンクロトロン放射光の利用により複雑なヘテロ接合界面構造を調べられる可能性が高まりその放射源は波長を変えることのできる高エネルギーフォトンのビームを供給し光電子分光の感度を上げて固体界面のナノメートルサイズの性質を論ずることが出来る様になったことは極めて有意義である。尚ヘテロ接合ではバンド不連続が生ずるがそのバンドラインアップ line up をあらかじめ量子化学的に計算することは近い将来もファク

ターが多すぎて無理である。

唯はっきりしていることは両方のエネルギーギャップの差 ΔE_g が伝導帯での差 ΔE_c と価電子帯の差 ΔE_v の和になっており経験的には $\Delta E_c \approx \Delta E_v$ である事である。(伝導帯の底辺が LUMO に、価電子帯の頂辺が HOMO に対応している)。現状では第一近似しか Band-line up を計算することは出来ず、実用的工学的にはあまり役立ちそうもないことは残念である。 ΔE_c はヘテロ接合にて電子親和力の差 Δx に大体等しいと考えられている。尚電子親和力の値自体がレーザーやエレクトロニクス技術の向上に負っている。

□化合物混晶半導体の量子井戸構造

液晶を別にすれば今日のエレクトロニクス素子はいずれも固体回路で構成され疑いもなく高度な量子力学の応用と考えられる。やや大胆な表現をすれば III-V 化合物或いは混晶半導体はポストシリコン的素材と呼べるものでその中でも GaAs 系が最近注目を集めている。現代程科学と技術が一体となり技術の進歩が基礎科学の発展に強く feed back される事態はかつてなかったが特にエレクトロニクスではその感が濃い。これらの製造技術はまさしくナノメートル (10^{-9} m) の極微の世界で原子のレンガを積層させるもので、走査線トンネル顕微鏡 STM の発明以来いわゆる原子文字すら画ける様になり原子のレンガ一ケずつを自由にコントロール出来る様になった。化合物混晶半導体にはケイ素にない光、磁気そして電氣的により優れた性質を有し加工技術次第では価格的にも充分立ちうちできる素材と信じられている。イオンビーム注入法の発見はコストの低下に有利であろう。光通信等の多くの光デバイスとの相性もケイ素よりはるかに優れている。とりわけ目をみはるものとして MODFET 変調ドープ電界効果トランジスター、すなわちいわゆる HEMT は最も成功した device であろう。(電子走行時間の短い点で) 又工学的には GaAs/AlGaAs の super lattice 超格子構造がきわめてすぐれた量子井戸構造を提供し従来の Si の MOSFET のそれを性能の上でうまわっている。そして優れた二次元電子系を実現している。FET ばかりでなくバイポーラトランジスターも少くとも原理的には作製できる。GaAs 系の素材のすごい魅力は電子の高速性 (スイッチング) もさることながら低電力消費性にあり、しかも耐熱性、耐放射線がより優れており Si, Ge にない特有な発光能力やガーン効果 (マイクロウエーブ発振) 等である。MOCDV 法による GaAs の極小素子は例えば $(\text{CH}_3)_3\text{Ga}$ とアルシン (AsH_3) とを交互に蒸着させ光 (UV) 照射すると Ga 原子から離れたメチル基は As についている H 原子と反応し CH_4 等の炭化水素となって揮発し GaAs が化学量論的に形成されるのだがその背後には完ぺきな真空技術がその行程を支えている。電氣的特性を劣化する転位デイスロケーションのないつまり無転位の完全結晶こそ最終目標であろう。そしてケイ素ではいわゆる相補性トランジスターつまり e^- だけでなく hole 正孔も超高速で走らせるデバイスはすでに完成しているが GaAs 系で相補性トランジスターをつくるのが出来ればより低電力消費性に貢献するだろうがこれには莫大な技術的困難がつきまとうだろう

う。ソーラー電池に対しても GaAs 系は Si のそれより効率が高いに違いない。(エネルギー問題への寄与)

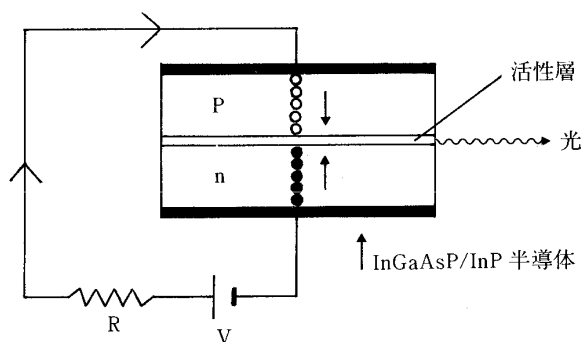
現に x, y を $0 < x, y < 1$ とし $\text{Al}_x \text{Ga}_{1-x} \text{As}$ や $\text{In}_{1-x} \text{Ga}_x \text{As}_y \text{P}_{1-y}$ を利用したレーザー diode, LED, 光検出器は一部実用化され始め, 高性能光通信や OEIC といった将来に対し一層性能の良い光デバイスが必要となろう。トランジスター性能の大幅の改善の為四元混晶たる $(\text{AlGa})_{0.52} - \text{In}_{0.48}\text{P}$ 混晶は GaAs 上の $\text{Al}_x \text{Ga}_{1-x} \text{As}$ よりも一層重要になると思われる。又 InP 上の 4 チャンネル層となる Ga In As, 障壁層となる Al In As の様な素材も先述の性能向上に有益となると見做れる。

広義の量子井戸構造たる超格子例えば GaAs/AlGaAs に依りエレクトロニクスにとって極めて有用な優れた発振素子とか負性抵抗を作ることが可能になる。(超格子の E-k スペースでのパラボラ的分散カーブにおいてブリルアン域は整数個の小さなミニゾーにより分割され, 分割された領域の境界にエネルギーミニギャップが生じる)。(P. 11 下段) 超格子でブリルアン域を小さく分割すれば電子の散乱をおさえることができるからである。三次元系より二次元系の方が状態密度が狭いエネルギー領域に密集しているので超格子は高性能半導体レーザー材料として期待されている。又磁場中での量子化されたエネルギー準位 (ランダウ準位) も二次元系でははるかに明確な状態を呈するが紙数の関係もありここでは言及しない。

結 語

ポストケイ素としての gallium arsenide 系半導体の物性を中心に特にそれらの素材から優れたヘテロ接合界面に出来る (量子井戸や超格子) 二次元電子系を論じた。特に超微細加工には光や電子線リソグラフ以上に FIB すなわち集束イオンビームのリソグラフ法が将来有望な様である。つい技術的なことばかり言及してしまったが我々にとって頭痛の種は日米特許戦争や知的財産権 (所有権) での争いではなかろうか。ちなみに半導体やそれを用いた CD の様な製品 ◎CCD (電子の目) ◎自動フォーカス技術, ◎ゲーム機等々の分野で特に目立つことになろう。素材たる GaAs 等も今に知的所有権を主張して来るのではないかと恐れられる。C. D. は明らかにレーザー技術と相まって GaAs 等化合物半導体が用いられているからである。尚かなり最近, いわゆる光子数スクイーズド光を発生させる為に III-V 混晶半導体たる $\text{InGaAsP}/\text{InP}$ 分布帰還型半導体レーザーを用いるアイデアが提唱されているがこれも一種の p-n 接合型ダイオードでその活性層界面で電子と正孔が一定の時間インターバルで再結合が起こり, サブポアソンをもつ赤色の光が放出される。いわゆる不確定性関係^{*}に従い光の位相成分を犠牲にすればフォトン数をいくらでも正確につくり出せる原理にもとづいている。(下図参照)。

(* $\Delta n \cdot \Delta \phi \geq \hbar$ の関係)



資源的見地からガリウムは楽観をゆるさない，例えばニュートリノ天文学では莫大な量を必要とする為エレクトロニクス分野と必ず資源のうばい合いが生ずるのであろう。又ヒ素はその毒性が気になる。PP・I 反応つまり低エネルギーの太陽からのニュートリノの検出には ${}^{71}_{31}\text{Ga}$ が30トンも必要とされる為である。

光伝導や DX 不純物準位も含め，以上とりわけ III-V 化合物混晶半導体の量子閉じ込めや 2 次元電子（正孔）系等界面デバイス等につき論じた次第である。

文 献

- 1) 現代物理学の展望 東京大学出版会 §8. 半導体と界面
- 2) IC の話 トランジスターから超 LSI 迄 垂井康夫 NHK Books 411
- 3) 物理学大辞典：量子ホール効果 丸善
- 4) ガリウム・ヒ素最前線 森彰英 読売科学選書 4
- 5) 半導体量子井戸の物理と光デバイスへの応用 小西正道 パリティ 1989, 10月, 30p
- 6) Compounds-Semiconductor transistors Lester, F. Eastman © 1986. American Institute of Physics. (Physics today Vol 39, No. 10)
- 7) 続々，物性科学のすすめ10章，新しい物質と測定技術 三浦登，生嶋明共編 培風館
- 8) NHK TV a) 「電子立国日本」 92年度 b) 「ナノメートルの世界」

註

*** P. 4 GaAs はウルツァイト型 (ZnS) でその格子点は，
 Ga $(0\ 0\ 0)$ $(\frac{1}{2}\ \frac{1}{2}\ 0)$ $(\frac{1}{2}\ 0\ \frac{1}{2})$ $(0\ \frac{1}{2}\ \frac{1}{2})$
 As $(\frac{1}{4}\ \frac{1}{4}\ \frac{1}{4})$ $(\frac{3}{4}\ \frac{3}{4}\ \frac{1}{4})$ $(\frac{3}{4}\ \frac{1}{4}\ \frac{3}{4})$ $(\frac{1}{4}\ \frac{3}{4}\ \frac{3}{4})$ で与えられる。

**** P. 1, P. 3
 衛星放送電波の周波数は12 GHz, 波長が25ミリで右旋円偏波として伝わりパラボラアンテナの口径は45cmが主流になりつつある。応答速度がおそいシリコン型トランジスターでは増幅が不能である。HEMT が主流になろうとしている。