

MOCVD法による化合物半導体 エピタキシャル成長（Ⅲ）

住友化学(株)

筑波研究所

秦 雅彦
井上 孝行
福原 昇
中野 強
長田 剛規*
秦 淳也**
栗田 靖之

Epitaxial Growth of Compound Semiconductors Using MOCVD (III)

Sumitomo Chemical Co., Ltd.

Tsukuba Research Laboratory

Masahiko HATA
Takayuki INOUE
Noboru FUKUHARA
Tsuyoshi NAKANO
Takenori OSADA
Junya HADA
Yasuyuki KURITA

GaAs-based semiconductor devices have been widely used in the front-end part of wireless telecommunication appliances such as handy phones, in order to support very high-speed data receiving and transmission. This paper reviews the requirement for p-HEMT switch ICs for the control of multi-band/multi-mode handy phone set, the market demand for which is increasing, and the design/manufacturing technology of the epitaxial substrate for the p-HEMT.

はじめに

近年、パソコン、ゲーム機やミュージックプレイヤー、各種家電におけるワイヤレス通信利用機器の発展には著しいものがある。さらに最近では高速移動中でも大容量のデータ通信可能な次世代ワイヤレスブロードバンドネットワークサービスの開始、またTVやHDDといった家電同士のHDTV信号情報のワイヤレス化等、次々に各種の高速・大容量無線通信技術が実現されつつある。将来は、このような各種端末類とそれらを支える基幹的なネットワークの発達により、これらの機器間通信のみならず、生活環境に設置された膨大なセンサー類からの情報をも取り込み、あるいは同様に配置された能動機器の制御を進めることでより快適・簡便な情報制御にサポートされたユビキタス社会の実現へと進化していく

ものと考えられている。

このようなワイヤレス機器の中で最も普及し、かつ現在も著しい進化を遂げつつあるのが携帯電話である。既に先進諸国では普及率は一定の水準に達しつつあるものの、様々なメディアとの接続等、その通信機能がさらに進化する一方、BRICs諸国及びそれに続く発展途上国においても急速にその普及率が伸びつつある。Fig. 1はNavian社による携帯端末台数及び搭載されるRFモジュール市場の実績と予測¹⁾であるが、高機能化と膨大な人口を抱える上記新興国家群での普及率上昇に牽引され、既に10億台を超えていると推測される端末台数は今後も5年以上にわたり高い成長率が見込まれている。

現在の携帯電話においてはその通信方式によってGSM (Global System for Mobile Communications)、CDMA (Code Division Multiple Access) 等、幾つかの規格が並存している。さらに同一規格においても使用可能な周波数帯は複数にわたっており、最新の高機能携帯電話においてはこれら複数の周波数帯及

* 現職：住化エレクトロニックマテリアルズ

** 現職：半導体・表示材料事業部

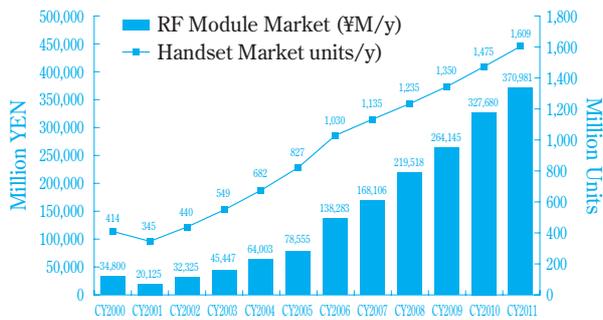


Fig. 1 Market of Wireless Handset and RF Module; Market Change (<2007) and Forecast (>2007); Estimated by Navian¹⁾

び通信方式に対応可能な、いわゆるマルチバンド/マルチモード対応型が増加しており、さらに場合によっては携帯電話以外に無線LAN、Bluetooth等のワイヤレス通信機能を付加するケースもある。携帯電話(及び多くのワイヤレス通信機器)のフロントエンド部は、Fig. 2¹⁾に示すように基本的に、電波の送受信アンテナ、周波数フィルター類とLNA(低雑音増幅器)を含むRx(受信部)、PA(電力増幅器)を含むTx(送信部)、送受信及び複数の方式に対応するRx,Txを切り替えるSW(スイッチ)と、それらを制御統括するRFIC及び各種周辺部品類等から構成されている。

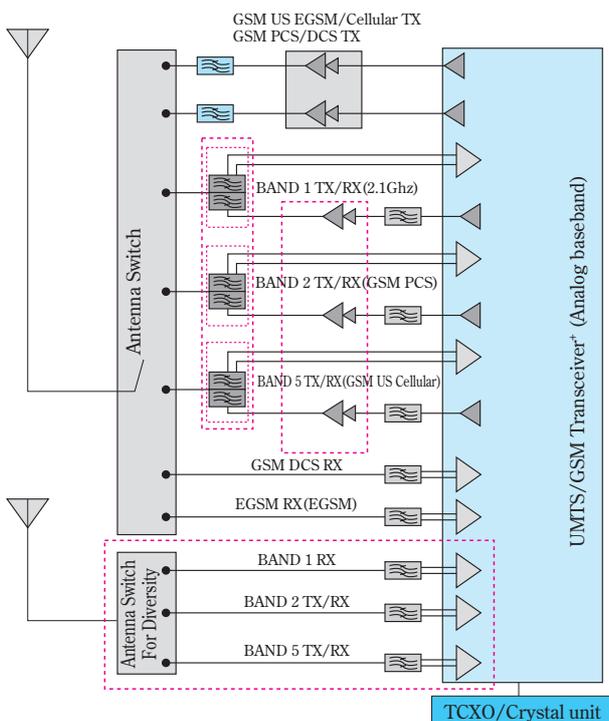


Fig. 2 Schematic Structure of Future UMTS/GSM RF Front End¹⁾

特にFig. 2に例示され、今後数量が大幅に増加すると予想されているマルチバンド/マルチモード対応型携帯端末においては、複数のバンド(周波数帯)あるいは複数の通信方式(モード)に対応するため、各バンド/モードに対応する数のRx及びTxを搭載し、利用状況に応じ、SWによりバンド、モード、及び送受信の切り替えを行っている。このようなマルチバンド/マルチモード対応型携帯端末は今後もさらに増加すると予想されており、端末あたりの平均使用バンド数/モード数の増加により、関連するRFモジュール部品市場は、端末個数の伸び以上に伸びるものと予想されている¹⁾(Fig. 1 棒グラフ部分参照)。このようなRFフロントエンド部で用いられる主要部品であるRx部のLNA、Tx部のPA、及びSWにおいてはGHz帯に及ぶ超高周波の信号を直接取り扱うため、使用する半導体も超高周波対応可能な化合物半導体が利用されることが多い。当社製品であるMOCVD法(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition; 有機金属気相熱分解法)化合物半導体エビウエハはこのようなフロントエンド部を構成する各種材料に用いられているが、本稿ではその中でも特に最近伸長の著しいSWについて、その概要と、SW向けに用いられるp-HEMT用エビタキシャル成長及び設計技術について概説する。

スイッチ用p-HEMTとその要求特性

複数の高周波信号を切り替えるスイッチには、複数のPINダイオードを組み合わせたものとFETを用いたIC等が用いられてきたが、最近では特に高周波に適したGaAsFETのICを用いるケースが増加している。GaAsFETのICスイッチはPINダイオードスイッチに比べ、切り替え動作時の消費電流が小さいこと、制御ICからの電圧信号により制御容易、高速切り替え可能、複数の機能を集積化可能、といった特徴を持ち、高機能化・小型化と省電力化に有効であることから、バッテリー容量が限られる小型軽量の携帯電話を中心とするワイヤレス端末に適合しており、特に高機能かつコンパクト化の要求されるマルチバンド/マルチモード対応型携帯端末において急速にその利用が拡大している。

FETを用いたスイッチ回路の基本概念をFig. 3に示す。SWは受信部(Rx)、送信部(Tx)、及びアンテナの間に置かれ、制御回路からのFETゲートへの入力信号により、各FETをON/OFFし、受信・送信を切り替える機能を持つ。マルチバンド/マルチモード端末では、バンド数/モード数に応じてRx、Txも増えるため、それだけ切り替えに使用するFETの個数も増加し、ICスイッチにおいては、それら多く

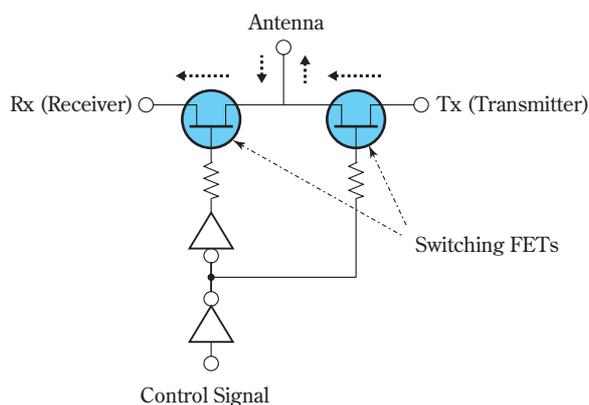


Fig. 3 Schematic Diagram of Switching Circuit

のFETがワンチップ内にモノリシックに集積化されている。

このようなFETスイッチICには主に下記のような特性が要求される；

- ア) ON状態のFET回路パスにおける低い挿入損失
- イ) OFF状態のFET回路パスにおける高いオフ抵抗と各回路パス間における信号の良好なアイソレーション
- ウ) 通過信号の低歪特性
- エ) 高い通過信号電力による高出力特性
- オ) IC全体としての低電圧・低消費電力

GaAsはSiに比べ電子移動度が高く、ON状態の抵抗を下げるのに有利である。また禁制帯幅が大きく、抵抗の極めて高い半絶縁性基板を利用することができるため、オフ抵抗を上げられるだけでなく、Siのような低抵抗基板とトランジスタの電極・配線等の間で不可避免的に生じる寄生容量が低く、これら容量成分を通じてON/OFFのいずれの場合にも生じる高周波電力の損失・漏洩を大幅に抑制できるため、本質的に高周波特性に優れている。GaAsFETスイッチICは従来、イオン注入法MESFETあるいは拡散法を用いた接合ゲート型FETが用いられてきたが、最近になり急速に増加してきたのが、上記GaAsの特徴をさらに活かした、p-HEMT (pseudomorphic High Electron Mobility Transistor) に代表される所謂ヘテロ接合FETを用いたICである。

p-HEMTの基本構造とその製造に用いられるヘテロエピタキシャルウエハについては既に解説を示してきた²⁾³⁾が、ここでその概略と実際のデバイス概観例をFig. 4に示す。p-HEMT用エピタキシャル基板の結晶層構造は、基本的には高抵抗基板上に積層されたバッファ層、チャンネル層、電子供給層/ゲート層、及びコンタクト層の各層から構成され、そこにデバイスプロセスあるいは結晶成長プロセスに応じ

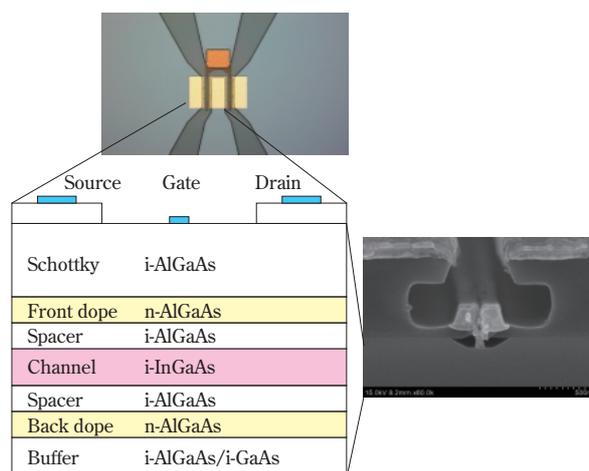


Fig. 4 Structure of p-HEMT

て、幾つかの機能層が付加される。従来型のGaAs-FETに対するp-HEMTの特徴的な点及びメリットとして第一には、いわゆる変調ドープ構造を採用していることである。ドーピング不純物添加層と実際に電子の走行するチャンネル層が空間的に分離されており、電子散乱の中でも大きな要素である不純物散乱が大幅に抑制され、高電流密度であるにも関わらず電子移動度を高く保つことができ、FETとしてはON時の挿入損失を下げるができる。またチャンネル層としてGaAsよりもさらに電子移動度が大きく、かつ飽和電子速度の大きなInGaAs層を用いることにより、この特性はさらに改良することができる。また第2には、高電界のかかるゲート層(兼電子供給層を一部含む)及びバッファ層にバンドギャップの大きなAlGaAs層を使用することができることである。このため、アバランシェ降伏により限界電圧の決まるゲート耐圧を高くとることができ、上記高電流密度と合わせ高出力対応が可能となる。

p-HEMT用多層エピタキシャル結晶の設計に当たっては、まずスイッチ動作及びトランジスタ回路設定に必要なしきい値電圧、動作電流密度に合わせて大まかな膜厚・組成・ドーピング濃度が決定され、さらに上記で述べた各種スイッチ要求特性をクリアするための、細かなチューニングが施される。

以下、これらの基本構造を念頭におきつつ、さらにスイッチ要求特性の中的主要内容とそれに関わる結晶設計及びエピタキシャル成長技術について述べる。

スイッチ用p-HEMT用結晶特性とその設計及び制御

1. ピンチオフ特性及びその制御

p-HEMTにおけるゲート電圧をパラメータとしたドレイン電流のドレイン電圧依存性をFig. 5(a)に示

At Linear Region, I_{ds} can be described;

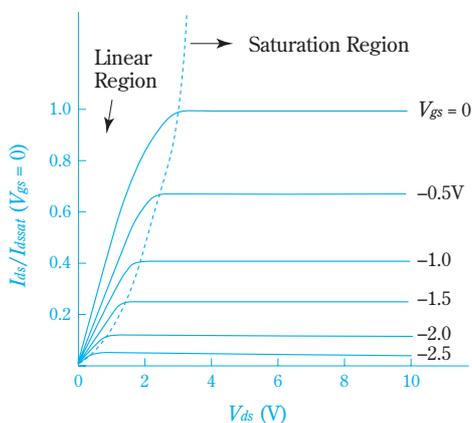
$$I_{ds} = \frac{Z}{LG} \mu_n C_i (V_{gs} - V_{th}) \cdot V_{ds}$$

LG : Gate length Z : Gate width

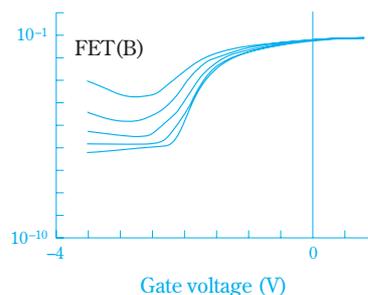
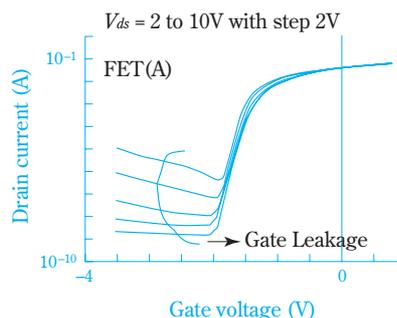
μ_n : Electron mobility

C_i : Gate capacitance

V_{gs} : Gate voltage V_{th} : Threshold voltage



(a) I_{ds} vs. V_{ds}



(b) $\log I_{ds}$ vs. V_{gs}

Fig. 5 I-V Characteristics of FET

す。またドレイン電流の対数值を、今度はドレイン電圧をパラメータとしてゲート電圧に対してプロットしたものがFig. 5 (b)である。

Fig.5 (a) (b)において、ドレイン電流の最大値は、ゲート耐圧と共にそのSWとして取り扱える最大電力に関係する。一方、最小値はオフ動作時のリーク電流であり、このリーク電流の低減(オフ抵抗の増大)はスイッチ動作においてひとつの回路パスがON状態になっている場合、その回路パスを通過する信号から他のOFF状態における回路パスとのアイソレーションを確保する上で重要である。またこの時のOFF状態においても高周波信号を扱う場合、OFF時の残留容量を介して信号の損失が生じる。高抵抗の半絶縁性基板を用いるGaAs系SWにおいては、Siのように高抵抗化の困難な基板使用時に生じる寄生容量成分が無視しうるほど小さいのは既に述べた通りであり、GaAs系SWの大きな利点のひとつである。ただし、このわずかな残留容量は信号歪みに関連し、GaAs系SW実用上、重要な設計要素のひとつであるので後述する。

さて、正常に製作されたp-HEMTでは、Fig. 5 (b)上段のFET (A) に示されるように左下部分の残留電流は、ほぼゲートからの逆方向リーク電流で決まり、通常、携帯電話動作に十分な低レベルであるが、p-HEMTを構成する結晶層の下部；すなわちバッファ層及び基板の設計と材料特性が不十分な場合、Fig. 5 (b)下段のFET (B) のようにゲート電位を負側に

絞り込んでも残留電流レベルが低減しなくなる。このようないわゆるピンチオフ特性不良は、不要な電力を消費するだけでなくSWとしてのアイソレーション特性を損なう。p-HEMTのトランジスタとしてのしきい値は解説²⁾³⁾で既に詳述したようにゲート電極下にあるエピタキシャル結晶の膜厚・組成及びドーピング不純物分布によりほぼ決定され、これらはゲート下断面の電荷分布及びそのゲート電界依存性を、上記パラメータを元に計算することで理論的に設計することができ、実際のトランジスタのしきい値と高い精度で一致させることができる。この時、その制御精度をさらに上げ、また上記ピンチオフ特性不良を抑制する上で重要なのが、基板及びノンドープ結晶の残留不純物制御及びエピタキシャル結晶層全体の微視的均一性に関する問題である。

(1) 残留不純物の影響とその制御

MOCVD法成長GaAs系エピタキシャル結晶の残留不純物特性については、既に解説²⁾において詳しく述べたように、原材料ガス及び反応設備内残留汚染への細かな配慮が必要である。特に原料ガスについては直接に結晶品質に影響するため、その詳細な分析と高純度化努力が払われてきた。特に代表的な不純物である有機金属原料におけるシリコン化合物と酸素化合物⁴⁾、アルシン原料におけるゲルマニウム化合物の低減努力⁵⁾⁶⁾により、今日ではこれらの原料ガスについては実用上問題のないものを工業的に安

定して入手可能である。一方、特にp-HEMT用エピ基板で多用されるAlGaAsのようなAlを含む混晶系の場合、Alの高い反応性のために、原料とは別に結晶成長環境における残留酸素及びシリコン等による結晶汚染が生じやすい。GaAs中において酸素は、格子内でGaとAs間に挿入されるGa-O-As型の格子間型欠陥と、単位格子内においてAs位置を置換し、かつその位置が2個のGa原子寄りにシフトしたGa-O-Ga結合を生成し、残りの2個のGaにダングリングボンドが残される、いわゆるオフサイト欠陥を生じる。前者は電気的には不活性であり、また結合形態としても安定型と考えられており、実際にGaAs中に存在する酸素のかなりの部分はこの不活性型と推定されている。一方後者も準安定形態として一定割合で存在し、禁制帯内で電子トラップ及びホールトラップの両様に働く深い活性な欠陥準位を生成し、半導体特性に様々な影響を与えることが知られている⁷⁾。このような結合状態はGaAsにおいてはGa-O結合に基づく赤外吸収スペクトルのGa同位体効果に基づく微細構造の解析により明らかにされている。一方、AlGaAsにおいては、Al,Gaの混晶効果によりスペクトル微細構造が失われ詳しい解析は行われていないが、Alと酸素の強い結合エネルギーや、AlGaAs : O系でも同様な電子・ホールの両様トラップが高密度で確認されることから類似のオフサイト欠陥あるいは格子間酸素欠陥が生成しているものと推測され、実際に高密度の各種トラップが報告されている⁸⁾⁹⁾。オフサイト欠陥は、添加したドナーあるいはアクセプター不純物の不活性化を引き起こし、精密なドーピング制御を必要とする電子デバイス用結晶制御に多くの有害な影響を及ぼす。

一方シリコンについては、基板表面や室内環境から残留酸化ケイ素・有機ケイ素化合物等によるものと思われる汚染が認められる他、反応設備内で多用される石英あるいはステンレス部材等含有シリコンも汚染源のひとつであることがわかっている。AlGaAs中に取り込まれたシリコンはその一部は同時に取り込まれた酸素と結合し不活性化しているが、他はドナーとして活性化し、バッファ層の絶縁性を低下させ、しばしばFig. 5 (b) 下段FET (B) のような電流リークを引き起こしp-HEMTのオフ特性を悪化させる。従って特にAlGaAs系においては原材料のみならず反応設備に使用される材料の選択と事前処理に十分な配慮が必要である。

これらの外因性不純物及び原料ガス中の不純物が十分に排除されたMOCVD法AlGaAs結晶においては最終的な結晶純度は、炭素アクセプターにより決定される。原料有機金属の熱分解時には成長時の基板表面における最終吸着分子種はモノメチルガリウム

あるいはモノメチルアルミニウム(Ga-CH₃、Al-CH₃)と考えられており、同時に供給されるアルシンからの活性水素の作用により最終的にCH₄が生成離脱すると考えられているが²⁾、AlGaAsにおいては高いAl-C結合エネルギーを反映して、通常の結晶成長条件下、GaAsのそれよりもおよそ1~2桁高い10¹⁵~10¹⁷/cm³の残留炭素アクセプターが存在する。このためGaAsのごとく高純度かつ高抵抗な結晶を得ることは容易ではないが、p-HEMTのバッファ層として用いる場合には、この残留アクセプターにより、チャネル層近傍のn型ドーピング層との間で形成される一種のpn接合電界によりチャネル電子のバッファ層への漏洩を抑制することができ、ピンチオフ特性の改良にむしろ有用である。残留炭素アクセプターの濃度はAl組成、成長温度、及びアルシン分圧により精密に制御可能であり、これを利用してトランジスターのピンチオフ値及びオフ耐圧を正確に制御することが可能となっている。

(2) 素子間アイソレーション及び酸素ドーパバッファ技術

残留不純物の影響とピンチオフ特性については既に述べてきた通りであるが、ここで当社独自の酸素ドーパAlGaAsバッファ技術について若干述べておく。酸素は既に前項で述べたようにAlGaAs結晶の中に容易に取り込まれ、禁制帯内に深い準位を形成し、ドナーあるいはアクセプタードーピング制御に影響を及ぼすため一般には有害な不純物と考えられているが、その応用によっては興味深い特性を示す。

その特徴のひとつは酸素により形成される禁制帯内の深い準位の性質である電子トラップ及びホールトラップとしての両様性である。既に再々述べているようにGaAsの特徴のひとつは高抵抗半絶縁性基板が得られることである。これはGaAsの禁制帯幅が1.4eVと広く、真性半導体としてフェルミ準位が禁制帯中央付近にきた場合、室温での熱励起によるキャリア濃度が絶縁性を保つのに十分に低いことに由来するが、現実の材料技術では多少の残留不純物の混入は避けられず、純粋なノンドーピング結晶で良好な絶縁性を得ることは容易ではない。そこで実際に用いられているのが補償技術である。例えばGaAs単結晶基板においては、ある程度高純度化されたGaAsの単結晶化雰囲気中の炭素濃度を制御することにより10¹⁶/cm³台の炭素アクセプターを結晶中に導入し、同時に過剰As圧と適切な熱処理を加えることで禁制帯中央付近に深い電子トラップ準位を有するドナー型固有欠陥(EL2)を炭素アクセプターより過剰に形成させる。このような操作により、炭素濃度を超えない範囲での残留ドナー不純物、(EL2濃度-炭素濃

度)を超えない範囲での残留アクセプター不純物による残留キャリア濃度変動を電氣的に補償し、フェルミ準位を実質的にEL2の準位近辺(禁制帯中央部)に固定して絶縁性基板を得ることができる。

一方、酸素ドーパAlGaAsでは、酸素が禁制帯内で深い電子及びホールトラップを同時に形成するため、酸素濃度(正確には活性酸素濃度)を超えない範囲の残留ドナー、アクセプター不純物を補償し、絶縁性の高い結晶を得ることができる。上記に述べたように酸素とAlの結合エネルギーは極めて高く、かつ酸素の固溶限界も高いため、AlGaAs中には最大 $10^{20}/\text{cm}^3$ に及ぶ酸素を導入することができる。このような高濃度酸素ドーパAlGaAs結晶をFET用結晶のバッファ層として用いた場合、次のような特徴を持つ;すなわち、第一に、エピ成長時の基板表面汚染、及び反応炉内残留不純物類によるエピ結晶中残留不純物をドナー/アクセプター種類によらず効果的に補償することができる。このため、現実の結晶成長に際して生じがちな基板表面や反応炉内の一時的な汚染に対し、再現性良く、安定したピンチオフ特性を有するFETの製造が可能である。第二の特徴は、このような高濃度酸素ドーパ結晶においては、電子と正孔の再結合速度が極度に速くなる点である。禁制帯に深い準位を形成する酸素は再結合中心としても働くことが知られており、例えば発光デバイスにおいてはこのような酸素の特性は発光効率の低下をもたらすデバイスに致命的な効果をもたらすが、一方電子デバイスにおいては、適当な条件下では特に高いドレイン電圧印加時のドレイン電流の増加を抑制する、あるいは隣接するFET素子間の絶縁分離特性を向上させる、といった有用な効果を示す。MOCVD法と共にエピ基板作製によく用いられるMBE法(Molecular Beam Epitaxy;分子線エピタキシー)においては、低温で過剰As条件下でEL2を含む大量のストイキオメトリ欠陥の導入されたいわゆるLT-GaAsバッファ層がやはり高い再結合速度と共に、FET特性に関して似たような特徴を示すことが知られている¹⁰⁾。このような作用のメカニズムについては必ずしも明確に説明されていないが、極度に速い再結合速度により、現実のFET内において高電界下で発生・拡散する過剰電子・正孔を速やかに消滅させることで、これらの過剰キャリアの結晶中への漏洩・拡散により変動するFETデバイス内の電界分布を安定化させるのに寄与しているものと推測される。このような特性は、FETのSWとしての要求特性、特にオフ抵抗・アイソレーション特性の向上や、FETの高密度集積化にきわめて有用であり^{8) 11) 12)}、当社のSW用p-HEMT向けエピ基板にも広く採用されている。

(3) 微視的な特性ゆらぎの影響とその制御

これまで述べてきたように、ピンチオフ特性は、バッファ層中の残留不純物濃度と密接な関係があるが、もう一点実用的な観点から重要な課題が、結晶材料の微視的な均一性の確保である。云うまでも無く、半導体ウエハ内での巨視的な結晶の均一性は、製造される半導体デバイスの歩留まりに直結する。MOCVD法においては、エピタキシャル結晶の膜厚・組成・不純物濃度といった主要パラメータは、CVD反応炉内のガスの流れと原料の拡散流束・分解反応速度により決定され、CVD技術の発達により今日ではこれらの主要パラメータのウエハ面内での均一性は6インチウエハにおいても $\pm 1\%$ 以内という良好な値を達成している。通常、FET(あるいはp-HEMT)のしきい値電圧は、ゲート電極下の結晶の膜厚・組成・不純物濃度の分布により決定される。一般にマイクロ波領域で用いられるp-HEMT ICのチップサイズは数mm角以下であるが、微視的な均一性とは、上記の巨視的な分布が問題にならないような、このような単一の微細なチップ内において、生じうる、よりミクロな結晶均一性の問題である。

エピタキシャル結晶の膜厚・組成・不純物濃度は通常、数百 μm から数十mmに及ぶ各種評価用プローブあるいは評価用デバイスにより計測される。実際には、これらのパラメータは統計的あるいは非統計的ゆらぎにより幾らかのミクロな分布を持っており、実際に計測されるのはそのプローブ面積内での平均的な値であるため、デバイスの構成とサイズによっては実際のデバイス特性との間に乖離を生じることがある。例えばドーピング不純物は多用される $10^{18}/\text{cm}^3$ 前後でのドーピング濃度の場合、母体結晶原子約4万個に1個の割合で分布するが、実際に一辺10nmの立方体結晶の中に1個ずつ分配されている訳ではなく、一定の統計的な分布をもって結晶内に散布されており、微細化のすすむVLSIでは最終的にはこのような統計的ばらつきによりFET特性のばらつきも支配されると考えられている。これは半導体デバイスにおける極限現象のひとつであるが、現状のp-HEMT ICの場合は、もう少し大きな領域での結晶不完全性を考慮する必要がある。ここではその一例として、p-HEMTのチャネル層を構成するInGaAs結晶層の微視的な結晶モフォロジーについて述べる。

GaAs半導体結晶の表面には最小段差約0.28nm程度の原子ステップ構造が存在し、エピタキシャル成長に際しては、気相を通じて拡散供給される原子が表面拡散の後、ステップサイトに取り込まれることによってステップが前進するいわゆるステップフローモードで結晶成長が進行する。InGaAsにおいては、既に解説²⁾で述べたように、Inの表面拡散長に起因

して複数の原子ステップが凝集して高さ数nmに及び巨大なステップを生じることがあり(ステップバンディング現象) GaAsあるいはAlGaAsに比べ著しく平坦性を損なう。またこのようなInGaAs層においては、Inの偏析に起因してInGaAs組成分布についても空間的な不均一が認められる。またこのようなInGaAs層の上にGaAsあるいはAlGaAs層を積層した場合、表面原子ステップ構造は若干の遷移層を経て次第にGaAsあるいはAlGaAs層固有のステップ構造に移行していくが、InGaAs表面の巨大な凹凸は埋めきれず、ステップ進行方向に少しずつずれながらFETにおいてゲートが形成される界面付近まで到達する。このような状態を模式的に示したのがFig. 6であるが、図中の幾つかの矢印で示したポイントにおいては、AlGaAs層、InGaAs層の膜厚が異なることがわかる。

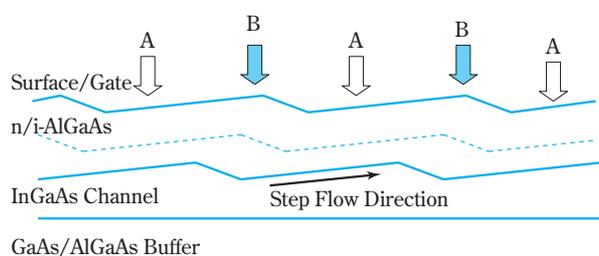
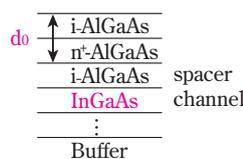


Fig. 6 The Motion of Macro-Step Flow of AlGaAs/InGaAs Hetero Epitaxial Growth

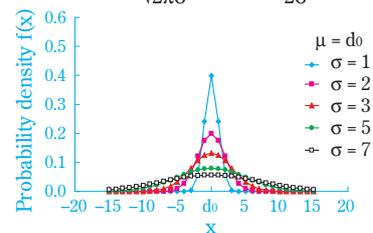
このような結晶にゲートを形成し、p-HEMTを作製した場合、次のような現象が生じる。すなわち、図中矢印Aに示した点においてはAlGaAs(電子供給層)膜厚は小さいため、トランジスタとしてのピンチオフしきい値は+側にシフトする。一方矢印Bの点においてはAlGaAs(電子供給層)膜厚は大きいため、トランジスタとしてのピンチオフしきい値は-側にシフトする。従って、同一のトランジスタにおいて同一電圧をゲートに印加した場合でもその結晶位置によってピンチオフ特性が異なり、同じゲート下電界に対してチャネル電流の挙動が場所により異なることになる。このような現象をより定量的に取り扱うために、一個のp-HEMTをゲート幅の非常に小さな微細p-HEMTの並列接合された集合体と仮定し、各微小p-HEMTを構成するAlGaAs(電子供給層)膜厚が所定の平均値と標準偏差をもって統計的に分散しているモデルを考えることができる(Fig. 7(a)参照)。Fig. 7(b)はこのようなモデルに基づいて作製した仮想p-HEMTの電流電圧特性を、AlGaAs(電子供給層)膜厚の標準偏差をパラメータとして示したものである。

Device Structure of SH-pHEMT for Simulation



Interface Roughness of the Top Layer Thickness

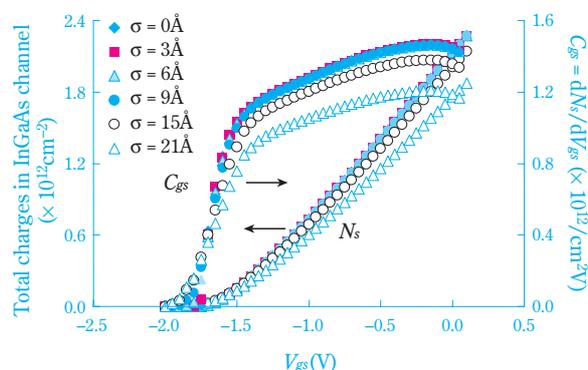
$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$



Calculation

- One dimensional Schrödinger's eq. and Poisson's eq.
- Total charges (N_s) in InGaAs/AlGaAs well
- Gate voltage (V_{gs}) dependence of N_s → Trans-conductance (g_m)

(a) Modeling of Microroughness in p-HEMT



(b) Impact of Microroughness on p-HEMT; Calculation Results

Fig. 7

標準偏差の値がゼロの場合、すなわち完全に均一な結晶の場合には、微細p-HEMTの基本特性とそれらの集合したp-HEMTの特性は一致する。しかし、標準偏差が大きくなると共に、しきい値の-側へのずれ、最大電流値の減少、及びゲート電圧値に対する電流値の傾きの低下が顕著になることがわかる。このような状態においては、平均値を基準に設計された結晶の特性と実際に製作されたp-HEMTデバイス特性との相関が崩れ、ピンチオフ特性や電流値等、所定のデバイス特性を得ることが困難になる。これは微視的平坦性の不良なp-HEMTで実際に生じる現象であり、特に結晶面に乱れを生じ易い、物理化学的性質の異なる複数種類の結晶を接合して作製されるヘテロエピタキシャル結晶の微視的モフォロジーの改良は重要な結晶工学的課題である。

一般的に言って、ある一定の結晶成長条件(温度、圧力、ガス種類、原料分圧及びその混合比、等)下では表面ステップ構造に代表される結晶の微視的モフォロジーはその結晶種類・組成に応じて固有の形状を有する。GaAsに対してAlGaAsはAl組成の増加と共に平均表面原子拡散長は減少し、ステップ間隔

は減少する。一方InGaAsではIn組成の増加と共に平均表面原子拡散長は増加し、ステップ間隔は増大する。また不純物ドーピングによってもステップ形状は変化する。理想的な結晶成長モードは基板GaAs面上に存在するステップ形状と、組成・不純物濃度の異なるエピ結晶成長層のステップ形状を一致させることであるが、下地基板の表面ステップ長に比してエピ成長結晶の表面拡散長が短い場合は、ステップ端とステップ端の間のテラス部において3次元核成長を生じ、一方エピ成長結晶の表面拡散長が長すぎる場合にはステップ同士の凝集を引き起こし、結果的にいずれの場合も3次元的な凹凸が加速される。そのため、p-HEMTに代表されるヘテロエピタキシャル結晶においては、ステップ構造をなるべく近づけるべく、基板の選択やエピ層を構成するAlGaAs層、InGaAs層及びGaAs層の成長条件の最適化と、各結晶層の成長条件を相互に移行させる界面制御技術を幅広く検討する必要がある。Fig. 8はこのようにして検討されたp-HEMT用InGaAsチャンネル層の表面モフォロジーの原子間力顕微鏡像の一例である。

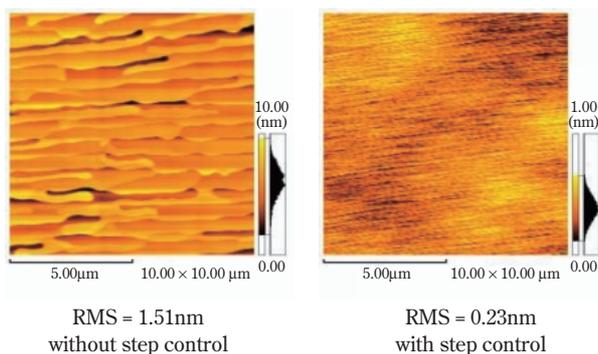


Fig. 8 AFM Image of The Surface of InGaAs Channel in p-HEMT

一般的な手法による結晶 (Fig. 8左側) に比べ、ステップフローを制御し最適化された結晶 (Fig. 8右側) においては表面凹凸の偏差 (RMS) が0.23nmとなっており、これは (100) 面GaAs表面における原子ステップ高さ (0.283nm) に近い値であることがわかる。このような手法を通じて形成されたGaAs / InGaAs系単量子井戸構造においては、狭い半値幅を有するInGaAs井戸層からの鋭いPL発光が観察され (Fig. 9 (a))、またフォトリフレクタンス / エレクトロリフレクタンス法において明瞭な量子準位間遷移が観察され (Fig. 9 (b))、高品質なInGaAs / GaAsヘテロ接合結晶層が実現されていることがわかる。

このような制御技術を通じて形成されたInGaAs系p-HEMTにおいては、微視的均一性も良好であるため、

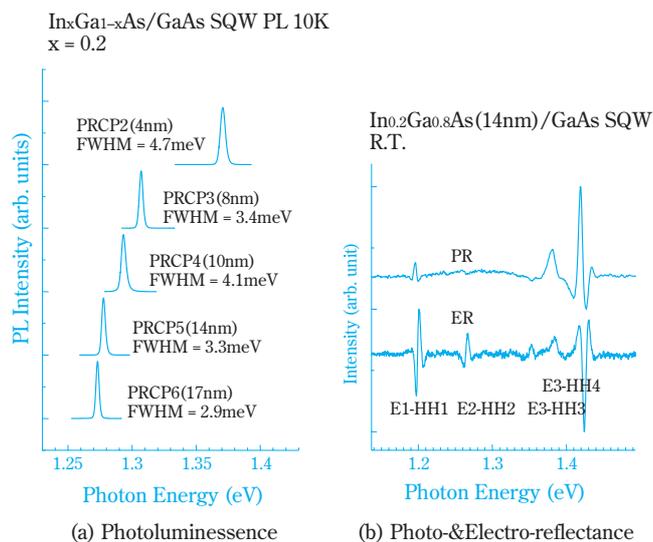


Fig. 9 Optical characteristics of GaAs/InGaAs/GaAs QWs

エピ結晶の設計値と実際のp-HEMTデバイスにおけるしきい値等のデバイスパラメータ等との相関は極めて良好である。またこのような結晶ではIn組成を上げることにより、より高い電子移動度を実現することができ、次に述べるSW用としての挿入損失の低減にも効果的である。

2. 挿入損失の低減と高移動度結晶

さてここで話題を変え、SWとして最も重要な課題のひとつである挿入損失とその低減に関する結晶側からのアプローチについて述べる。Fig. 5 (a)において低ドレイン電圧の線形領域におけるドレイン電流の立ち上がり (傾き) の逆数はRon (オン抵抗) と定義され、スイッチとしてのON動作時の挿入損失IL (Insertion Loss) はRonに密接に相関する；

$$IL (\text{挿入損失: dB}) = -20 \log (2R_o / (2R_o + R_{on}))$$

このSWを経由したTx (電力出力部) からの実効効率PAE'は、元のPAの電力効率PAEに対し、下記の相関がある；

$$PAE' = PAE \cdot 10 \exp (-IL/10)$$

PAEの値にもよるが、ILの1dB低下により実効効率PAE'の低下はおおよそ10~15%にも及び、PAE'の値はそのままそのワイヤレス端末使用時のバッテリー寿命に直結する。またRx (受信部) に対しては、SWにおける挿入損失が受信部の雑音指数に直接相関し、ILの1dB低下により、その端末の受信可能なカバーエリアが約10%低下する。そのため、SWとして使用

する際のp-HEMTのRonの低下はきわめて重要な課題である。

p-HEMTのRonは、大別すると、ア)ソース/ドレイン電極からエピタキシャル結晶へキャリア注入/取り出しのためのオーミック電極におけるコンタクト抵抗、イ)チャンネルとなるInGaAs量子井戸層における横方向のチャンネル抵抗、及びウ)オーミック電極注入部からチャンネルまでの縦方向の抵抗、の成分に分けられる。結晶製造の観点から、これらの各成分を最小化するため、他の要求特性とのバランスを取りながら結晶組成・濃度・膜厚と種類の異なる結晶のヘテロ接続界面の形成法等を決定していくわけであるが、ここでは他の要求特性とのトレードオフが少なく、かつRonに対する最も影響の大きな因子であるチャンネルInGaAs層における電子移動度の向上について詳しく述べる。

Fig. 5 (a) 中のドレイン電流とドレイン電圧の相関式にあるように、Ronは、図中の低ドレイン電圧領域の線形領域における傾きの逆数で定義され、実質的に；

$$R_{on} = L_g / (\mu_n \cdot C_i \cdot Z)$$

と、表され、同一ゲート寸法 (L_g (ゲート長) × Z (ゲート巾)) 条件では C_i (ゲート容量) と μ_n (電子移動度) に反比例する。 C_i はp-HEMTやMOSFETの場合、チャンネル層に誘起される二次元電子密度に比例し、これも高いほうがRonに関しては有利であるが、

ON・OFFに伴うゲート充放電容量も増加する結果、消費電力の増大を招くため、他特性との関連で最も好ましいのは電子移動度の増加である。

電子移動度は、チャンネル構成材料の電子有効質量と、チャンネル走行の際に受ける散乱要因により決まる。散乱要因としては結晶格子の熱振動(フォノン)による散乱、混晶の場合に存在する構成元素のランダムな分布による混晶散乱、等の材料により決まる要因と、不純物散乱、既述の界面での微視的な凹凸による散乱、等、結晶成長技術やエピタキシャル層設計により制御可能な要因がある。p-HEMTにおいてはチャンネル材料としてInGaAsを用いており、通常のHEMTのGaAsチャンネルに比較すると、電子有効質量が小さい、すなわち本質的に移動度が高いことが期待されること、また電子供給層となるn型AlGaAs層との伝導帯下端のエネルギー差が大きいため、チャンネルを構成する量子井戸が深くなる結果、チャンネル電子が効果的に閉じ込められ、n型AlGaAs層に高密度に存在するイオン化ドナーによる不純物散乱を受けにくいことが特徴である。実際、後者の効果は量子力学的な計算によっても確認できる。Fig. 10は、標準的な選択ドープInGaAsチャンネル内における電子分布のチャンネル厚さ・InGaAs組成との関係を示しているが、In組成の増加と共にAlGaAs側にわずかに生じる電子分布の“裾”が小さくなり、より効果的に電子が閉じ込められていることがわかる。さらにこの時の波動関数の形状を調べると、基底準位では概ねチャンネル内に閉じ込められている波動関数が、第

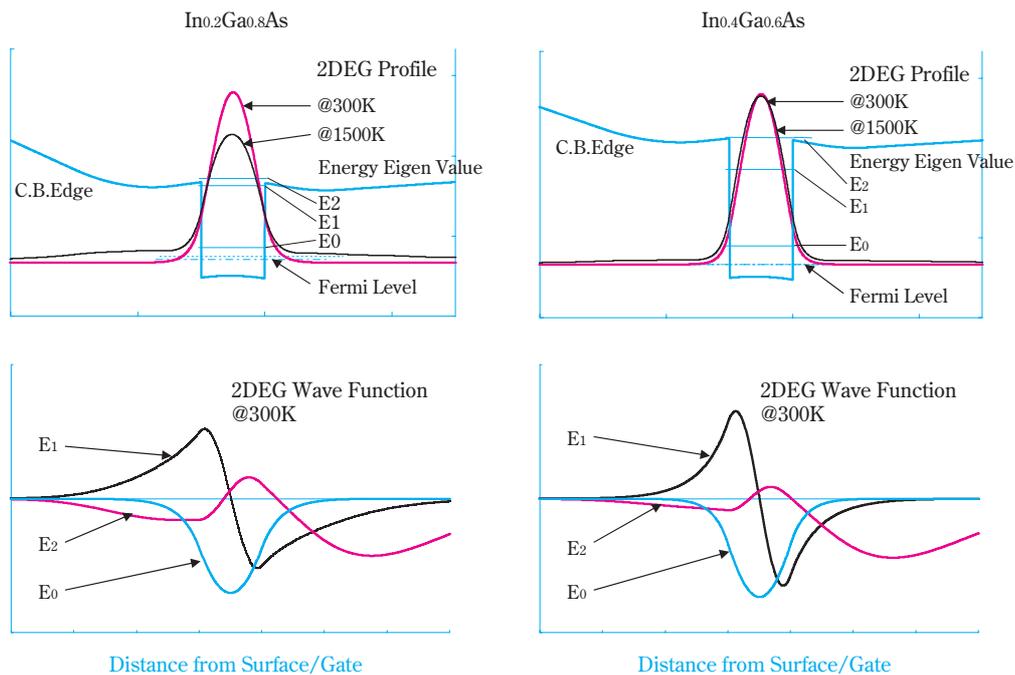


Fig. 10 The Spatial Distribution of 2DEG Density and Wavefunction in p-HEMT

一励起準位、第二励起準位と上がるに連れ、AlGaAs側に拡がり易い状況がわかる。Fig. 10における電子分布は室温熱平衡状態における値であるが、実際のチャンネル内電子は、トランジスター内電界による加速のため、高い励起準位に上がりながら伝導すると考えられ、より高次の励起電子を効果的に閉じ込めることができるInGaAsチャンネル、特に高In濃度チャンネルの優位性を示唆している。

また実際のp-HEMT用結晶においては、電子供給層に対しわずかに沁み込む電子に対するイオン化ドナー散乱による移動度低下を避けるため、数nmのノンドーブ Spacer 層を入れることが一般的であるが、高InGaAsチャンネル結晶においては、電子沁み出しが小さいため、Spacer層膜厚を薄く、またより高濃度な電子供給層ドーピングが可能となる。このことは、より効率的にチャンネル内2次元電子濃度を上げることができることに相当し、p-HEMT設計においては、トランジスターしきい値電圧を一定に保ちつつ、最大電流値あるいはゲート耐圧を向上するために効果的である。

そこで、既述のような表面ステップ構造を制御しながらエピタキシャル成長されたInGaAs結晶量子井戸系において実際に選択ドーピング構造を組み合わせた時の移動度特性を調べてみた。ドーピングに際しては、InGaAs結晶層の上下にSiドーブn型AlGaAs結晶を配したダブルヘテロ型構造としており、 $2.2 \sim 2.4 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ という高い2次元電子密度が得られるのが特徴である。チャンネルとして用いる歪InGaAs層の組成を変化させた時の室温における電子移動度をFig. 11に示す。

Fig. 11中の印は、InGaAs層成長時のステップ制御を行わず、数nmに及ぶステップバンチングが生じている従来の結晶でのデータで、In組成の増大と共に移動度の低下が認められる。一方、印はステップ制御を行い、チャンネル界面付近の結晶凹凸が0.3nm以下に抑制され、フォトリフレクタンス計測においてFig. 9に示すような明瞭な量子井戸構造とGaAsよりも小さな有効質量が確認されたQW成長と等価な成長条件下で成長された結晶に基づくデータである。ステップ制御結晶ではIn組成の増大と共に移動度は増大し、In組成0.41において $9680 \text{ cm}^2 / \text{Vsec}$ に達している。一般にInGaAsのような混晶においては、通常の不純物散乱やフォノン散乱に加え、III族側元素(この場合はInとGa)のランダムな配置による混晶散乱の影響による移動度の低下と、有効質量の低下による移動度の向上が同時に生じるため、実際に観測される移動度はやや複雑な挙動を取るが、Fig. 11のデータにおいては、少なくともIn組成が0.3以上ではGaAsの移動度を明らかに上回る高い移動度が観測さ

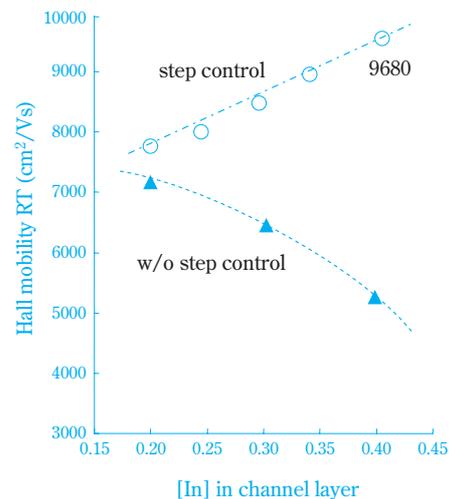


Fig. 11 Electron Mobility of 2DEG in Selective-doped DH-AlGaAs/InGaAs

れている。特にIn組成0.41における上記移動度は、筆者らの知る限り、これまで室温で観測されたGaAs基板上GaAs及び歪InGaAsチャンネルでのいかなる2次元電子移動度報告値よりも高い値である。このことは、歪QW構造においても実際にInGaAsにおける電子有効質量が小さいというエレクトロリフレクタンスによる計測結果を裏付けるものであると共に、GaAsという工業的に広く用いられる基板上において、従来のp-HEMTデバイスプロセス技術により、高価なInP基板格子整合InGaAs系に近い特性が得られる、という点でも実用上大きな意義を持つものである。

3. 歪み特性と線形性の課題と改良

最後にスイッチとして要求される歪み特性について若干触れておく。送信部においてパワーアンプの増幅特性は線形であることが理想であるが、実際には、特に高効率な動作が可能な高出力部分で高次高調波の発生により、線形性が損なわれる。PAでは既に各種の歪補正技術により線形性は相当の改良が図られているが、信号がSWを通過する際、当該SWを構成するトランジスターを含む回路の線形性が悪いと同様な歪み問題が生じる。また例えばWCDMA方式においては、周波数の異なる信号間での相互変調歪みと呼ばれる効果により、送信側Txと受信側Rx間でSWを介して周波数の異なる信号の相互干渉が生じる。いずれも、例えば当該端末の通信限界エリア付近において、送信エネルギーが大きくなり、また受信エネルギーが小さくなるような場合に、他端末の信号との間で干渉を生じさせ、接続上の問題を生じるため、その歪み量に対しては厳しい規格が設けられている。

SWにおける歪特性は、OFF側FETにおいては、残留容量が、当該FETに印加される電圧に対して一定ではなく、僅かに電圧依存性を有するためその残留容量を介した高周波電力の漏洩を引き起こし非線形性効果発生要因となっている。特に多バンド/多モード対応の多機能SWではON状態のFETは一個であるが、他のFETは全てOFF状態にあり、多くのFET残留容量が並列に接続・合成されるため、その影響は小さくない。この時の残留容量及びその電圧依存性は、主にゲート部に近接する半導体層のドーピングに伴う空間電荷密度とその分布に依存していると考えられ、デバイスで実際に採用されている形状並びに回路設計の影響が大きい。結晶側でもデバイス構造に対し、関連残留容量を数値計算により算出し、印加電圧依存性を最小にするように細かく結晶の膜厚・組成及び不純物プロファイルを調整することで、ある程度の改良が可能である。

一方、ON側FETにおいては、低電界での印加電圧に対する電流値の線形性が、重要な指標である。GaAsにおいては従来型PINスイッチに比べ実は線形性は必ずしも良くない。GaAsにおける広範囲な電界強度に対する電子速度の依存性を示したものがFig. 12である。

Fig. 12(左図)の電子速度曲線の一次微係数(点線)が移動度に相当し、GaAsにおける低電界での電子速度の立ち上がりの早さは高い移動度に由来するものである。しかし、GaAsにおいては急激に電子速度が立ち上がる一方で、ある電界側でピークをむかえた後急速に低下する。これはGaAsのバンド構造(Fig. 12右図)と密接に関連し、通常 帯に位置する有効質量の小さな高移動度電子が電界加速により高エネルギー状態に移行すると共にフォノンとの散乱を介し、 帯の約0.29eV上方に位置する、状態密度と有効質量が大きく移動度の低いL帯への遷移が生じる結果である。このようなバンド構造に基づく非線形性は半導体の種類によって様相は異なり、特に 帯とL帯とのエネルギー差は重要な因子と考えられて

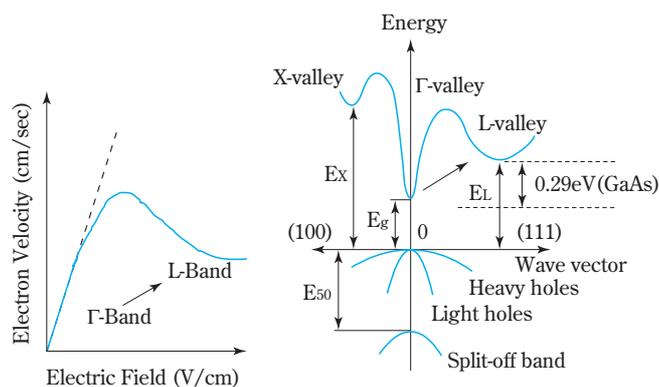


Fig. 12 Band Structure and Non-Linear Electron velocity at High Electric Field

いる。Table 1に主要な半導体の物理パラメータを要約しておく。

InAsにおいては 帯とL帯エネルギー差は0.78eVと大きく、GaAsに比べ大きい。InGaAsについてもその線形補完により L帯エネルギー差は増大すると考えられるため、特に前項で示したような高In組成チャネル構造においては、L帯への遷移レートは相対的に低下するものと期待されるが、チャネルIn組成とON側FET線形性との実際の相関については今後の検証課題となっている。

おわりに

最近の携帯電話を中心とするワイヤレス通信機器の発達により利用の増えつつあるp-HEMTスイッチとそれに用いるエピタキシャルウエハの最近の技術について概要を述べてきた。技術的には性能のさらなる向上及びチップサイズの縮小のため、オン抵抗のさらなる低減努力と歪み特性の改良が必要であるが、その優れた基本特性と集積回路としての使いやすさにより今後ともp-HEMTスイッチICの市場は伸びていくものと期待される。また本稿では触れなかったが、LNAあるいはPAとしてもp-HEMTは優れたが

Table 1 Electron and hole mobility and other typical physical parameters of various semiconductors

	Si	Ge	GaAs	InGaAs(In=0.5)	InAs	InP	InSb
Electron Mobility@RT	1,500	3,900	8,500	11,000	33,000	6,000	80,000
Electron effective mass	0.98(X)	0.082(L)	0.065	0.045	0.023	0.077	0.0135
Hole Mobility@RT	450	1,900	420	-	460	150	1,700
Hole effective mass	0.16(lh) 0.49(hh)	0.04(lh) 0.28(hh)	0.082(lh) 0.45(hh)	0.053(lh) 0.43(hh)	0.024(lh) 0.41(hh)	0.12(lh) 0.56(hh)	0.016(lh) 0.438(hh)
Energy Gap(eV)@RT	1.12(indirect)	0.66(indirect)	1.42	0.89	0.36	1.35	0.18
$\Delta E_{\Gamma-L}$ (eV) of conduction band	-	-	0.29	0.54	0.78	0.50	1.67

Si, Ge : Ref.13), GaAs, InAs, InP, and InSb : Ref.14)

InGaAs(In=0.50) : electron mobility : experimental data, other parameters : interpolated from GaAs and InAs

テンシャルを有しており、これらのフロントエンド部を構成する他の主要部品としてもp-HEMTの今後の発展を期待したい。

引用文献

- 1) 安藤 嘉泰, “RF Devices/Modules For Cellular 2006-2007”, 有限会社ナビアン (2007), p.122 (Fig. 1) 及び p.74 (Fig. 2).
- 2) 秦 雅彦, 福原 昇, 松田 芳信, 前田 尚良, 住友化学, 1994-I, 34 (1994).
- 3) 秦 雅彦, 福原 昇, 笹島 裕一, 善甫 康成, 住友化学, 2000-I, 10 (2000).
- 4) M.Hata, H.Takata, T.Yako, N.Fukuhara, T.Maeda and Y.Uemura, *J.Crystal Growth*, **124**, 427 (1992).
- 5) M.Hata, N.Fukuhara, Y.Zempo, M.Isemura, T.Yako and T.Maeda, *J.Crystal Growth*, **93**, 543 (1988).
- 6) 住友化学(株), 特開平02-201918 (1990).
- 7) J.Schneider, B.Dishler, H.Seelewind, M.Mooney, J.Lagowski, M.Matsui, D.R.Beard and R.C.Newman, *Appl.Phys.Letters*, **54**, 1442 (1989).
- 8) Y.Sasajima, N.Fukuhara, M.Hata, T.Maeda and H.Okushi, *Materials Research Society Symposium Proceedings*, **483**, 425 (1998).
- 9) H.Terao and H.Sunakawa, *J.Crystal Growth*, **68**, 157 (1984).
- 10) C.L.Chen, F.W.Smith, A.R.Calawa, L.J.Mahoney and M.J.Manfra, *IEEE Trans.Electron Devices*, **36**, 1546 (1989).
- 11) 住友化学(株), 特開平04-328822 (1992).
- 12) 住友化学(株), 特開平07-006957 (1995).
- 13) S.M.Sze, “Semiconductor Devices”, 2nd. Edition, Murray Hill (1981).
- 14) 生駒 俊明, “最新化合物半導体ハンドブック”, サイエンスフォーラム (1989).

PROFILE



秦 雅彦

Masahiko HATA

住友化学株式会社
筑波研究所
研究グループマネージャー



長田 剛規

Takenori OSADA

住友化学株式会社
筑波研究所
主席研究員
(現職: 住化エレクトロニックマテリアルズ)



井上 孝行

Takayuki INOUE

住友化学株式会社
筑波研究所
主席研究員



秦 淳也

Junya HADA

住友化学株式会社
筑波研究所
主任研究員
(現職: 半導体・表示材料事業部)



福原 昇

Noboru FUKUHARA

住友化学株式会社
筑波研究所
主席研究員



栗田 靖之

Yasuyuki KURITA

住友化学株式会社
筑波研究所
主席研究員
農学博士



中野 強

Tsuyoshi NAKANO

住友化学株式会社
筑波研究所
主席研究員