

## 4 ミリ波デバイス

### 4-1 ミリ波半導体デバイス研究計画

#### 4-1 Research Project on Millimeter-wave Semiconductor Devices

松井敏明 篠原啓介 東脇正高 広瀬信光

Toshiaki MATSUI, Keisuke SHINOHARA, Masataka HIGASHIWAKI, and Nobumitsu HIROSE

#### 要旨

ミリ波帯通信システムの実用化を図るために、システム構成のための要素技術として通信デバイスの高性能化と小型軽量化を実現する必要がある。通信総合研究所では、各種のミリ波応用システムに対応できる高性能なミリ波帯通信装置技術を開発するために、ミリ波半導体デバイス研究を進めている。その成果は、遮断周波数472GHz(世界最高速)のHEMTという形で表れている<sup>(注1)</sup>。以下に、InP系及び窒化物化合物半導体デバイス、Si-Ge系半導体デバイス、Si-CMOS集積回路を含めた今後の研究計画について概説する。

Putting millimeter-wave communications system in to use, it is crucial to improve communication devices efficiency and to minimize their size. In our institute, we focus on millimeter-wave semiconductor devices due to develop millimeter-wave communication technology which can be adapted to various applications. Our result was shown by achieving cutoff frequency 472GHz, the world fastest at this moment. Following manuscript, we shall introduce our research project including InP and nitride compound semiconductor devices, Si-Ge semiconductor devices, Si-CMOS integrated circuit and SiN passivation film using hot-wire CVD process.

#### [キーワード]

無線通信, 半導体デバイス, ミリ波, HEMT, InGaAs, InP, GaN, InN, Si-Ge, HotWire, SiN  
Wireless communications, Semiconductor devices, Millimeter-wave

### 1 研究の背景

産業構造の急速な変化が不可避となっている現在、生き残りをかけて産業のIT化が推進されている。その成否はコンテンツ、ソフトウェア、ハードウェアの統合的発展にかかっている。基盤的技術であるハードウェアの技術シーズを先行的に見だし、発展させ、実用化に結びつけることが公的研究機関としての重要な責務であると考えている。

近年、ハードウェアの基本構成要素である半導体デバイス分野では、シリコン(Si)素子、特にSi-CMOSの著しい性能向上が継続的に実現している。汎用MPUのクロック周波数は現在2GHzに達し、2007年に20GHz達成が目標とされている。

しかしながら、インターネットを中心とした通信の分野では、現在でも更に高い周波数で動作する半導体が必要とされている。例えば、インターネット情報端末として使用者数がPCをし

のぐと予想される携帯電話の無線周波数は、そのデータ処理量の増加に伴い、2GHz帯から5GHz帯が用いられるとされており、BluetoothやIEEE802.11などの無線LANにおいても2.4GHz帯が用いられる<sup>[1]</sup>。さらに、オフィス・家庭内LANのラスト1mの解決を担うことが期待される60GHz帯無線LANなど、ミリ波・サブミリ波応用も近づいている。これらの周波数帯で要求される半導体素子の遮断周波数( $f_T$ )は、2.4GHz帯で40GHz、5GHz帯では80GHzであり、60GHz帯では150GHz以上にも達する<sup>[2]</sup>。

改めて指摘するまでもなく、通信装置の性能はそれを構成する電子デバイスの性能、とりわけ能動増幅デバイスであるトランジスタの性能に支配される。トランジスタの動作速度向上のアプローチは

[甲] 半導体材料の移動度の高速化

[乙] ゲート(ベース)の微細化(薄膜化)

の二つがある。Siデバイス的高速化は、[乙]のアプローチにより実現された。それに対し、移動度がより高い化合物半導体(GaAs, InP, GaN, InNなど、詳細は後述する)を用いのは[甲]のアプローチである。電子走行層とキャリア供給層を分離したHEMT<sup>[3]</sup>は、化合物半導体の移動度がSiに比べ桁高いという優れた特性を十全に発揮できる構造であり、衛星放送受信アンテナの小型化や携帯電話の小型軽量化を実現した。

しかしながら、携帯電話機の利用周波数帯は1GHz近辺、衛星放送でも高々12GHzである。通信端末の爆発的増大とデータ通信速度高速化によってもたらされた深刻な周波数資源のひっ迫を解消するためには、ミリ波帯で実用的な増幅度を有する電子デバイスの開発が急務である。我々は、GaAsに比べ、2倍の移動度(電子走行層であるInGaAs)を有するInP系HEMTの性能向上に取り組んでいる。さらに次世代の半導体材料として有望な窒化物化合物半導体とSi-Ge HEMTの研究も開始した。窒化物化合物半導体は、広いバンドギャップと高い電子飽和速度を有し、地上での通信情報端末向け基地局用途のみならず、通信衛星等にも応用が期待されている。またSi-Ge半導体は、現在最も広く用いられている半導体材料であるSiとの集積化が可能であり、通信装置全体のコスト削減を実現すると

同時に、今後重要性が大いに増すであろうセキュリティ向上にも資するところ大きい。

これら核となる通信デバイスの研究に加え、高周波フロントエンドと密接に関係するベースバンド(BB)部の開発、パシベーション膜(保護膜)として有望なHotWireCVD法によるSiN膜の成膜の研究にも取り組んでいる。

## 2 InP系半導体デバイス

ミリ波～サブミリ波の周波数帯は、光とマイクロ波の間に残されたあまり利用の進んでいない電波の周波数帯であるが、近い将来の超高速通信システムの実現には欠くことのできない重要な技術領域である。この周波数帯を有効に利用するため、周波数の高いミリ波で性能が発揮できる超高速のトランジスタは重要なキーデバイスとなる。高い周波数特性を持つトランジスタは、増幅器として用いた場合、一段の増幅でより大きな利得と低雑音特性が得られるほか、より高い周波数変換性能が期待でき、ミリ波通信装置の大幅な高性能化が可能である。

従来のGaAs系のHEMTに比べて、InP系のHEMTは『電子移動度が大きい』、『電子の飽和速度が大きい』、『電子濃度が高い』等の特徴があり、デバイス特性の更なる高速化が望める<sup>[4]</sup>。また、光通信のための半導体レーザーやフォトダイオードに用いられる半導体材料と同じであるという点から、光デバイスとの集積化も可能である。InP系HEMTの研究は20年ほど前から行われており、その主な性能指数である遮断周波数(トランジスタの増幅動作が可能な上限の周波数)が350GHzに達したという報告が1992年になされた<sup>[5][6]</sup>。

これまでに我々はInP系HEMTの半導体結晶構造及びプロセス技術を最適化することによって、世界最小ゲート(25nm)で安定に動作するトランジスタを開発し、 $f_T=472\text{GHz}$ の世界最高速の値を実現した<sup>[7][8][9]</sup>。この値はこれまでに報告されていた値を大きく上回るものであり、デバイス内の電子輸送に関して、これまでに見られなかった新しい現象が起こっている可能性がある。今後、この物理現象を解明し、一層の高速化を図ることが課題である。

トランジスタを実際のシステムの中で使用するためには、増幅器やミキサー、発振器といった機能を持つ回路を構成することが必要であり、上記HEMTの優れた特性を生かした実用化に向けての研究も進めている。例えば増幅器に用いた場合、一段の増幅で100GHzにおいて10～12dB程度の電力利得が見込まれ、従来の常識を覆すシステム構成が可能となる。今後、トランジスタと周辺回路を一体化する技術の開発を進める。

さらに、HEMT素子を低温に冷却することによって低雑音特性を更に向上させることができ、電波天文分野等に用いられる、300GHzを超えるサブミリ波帯の受信機として利用できる可能性がある。今後、低温評価システムを確立し、低温でのデバイス特性の評価を進め、デバイスの高周波化とともに低雑音化を目指す。

### 3 窒化物化合物半導体デバイス

現在、ミリ波帯以上(>30GHz)の周波数領域で動くトランジスタは主に化合物半導体を材料としている。これは、化合物半導体の持つ材料物性がSiに比べて優れており、ミリ波帯以上の高周波ではSiの物性では十分な性能のデバイスを作製することが困難であるからである。しかし、これらの化合物半導体に関しても、本質的な短所や限界が明らかになりつつあり、それを克服するためには新しい材料を開拓していくことが必要になってきている。

その有望な候補の一つに窒化物化合物半導体が挙げられる。我々は主に窒化ガリウム(GaN)と窒化インジウム(InN)に関して現在材料研究を進めている。GaNは青色LEDやレーザーダイオードで1990年代後半に一躍脚光を浴びた半導体材料である。主に青色発光デバイスへの応用を

目的に盛んに研究が行われてきたが、最近高周波ハイパワー電子デバイス(主にGaN/AlGaIn電界効果トランジスタ)への応用に関する研究も行われるようになってきている<sup>[10]</sup>。これは表1に示すように、バンドギャップが3.39eVと非常に大きいことによりトランジスタのゲートの耐圧が大きいことによる。応用としては基地局と各家庭を結ぶラストワンマイルの高速無線通信用パワーデバイスが挙げられる。バンドギャップが大きいことは、半導体にとって過酷な条件下、例えば強力な放射線が降り注ぐ宇宙空間や300を超えるような高温下でも機能し得るデバイスを可能にする。このような環境下では、Siや他の化合物半導体を用いたデバイスは原理的に動作不可能である。またInNは理論的に非常に電子スピードが速くなることが予測されており、高品質単結晶InNをトランジスタの材料に応用できれば、これまで以上に優れた高周波特性を示す新しいトランジスタが得られる可能性がある<sup>[11]</sup>。表1の物性値のうち、特に飽和電子速度がゲート電極直下を通過する際の電子の速度に関する一つの目安となる。InNの場合、この飽和電子速度が、理論的には現在用いられている中で最も高速なInGaAsの1.5倍以上となり、これは単純に考えてfTが1.5倍になることを示している。またInNはそのバンド構造から、高周波トランジスタで用いられる短ゲートトランジスタの場合、ゲート電極直下を通過する電子の速度が1.5倍+に伸びることも予測されている。実際、理論予測では、InP基板上的InGaAs HEMTではゲート長100nmでfT=250-300GHzのところ、InNトランジスタでは1THzを超えるとされている。また、窒化物化合物半導体はGaAsなどと違い有毒な物質(ヒ素等)を含まないため環境への配慮からも非常に有用な物質である。

研究計画としては、まず最初に結晶成長に関

表1 主たる半導体材料の物性比較

	バンドギャップ(eV)	電子移動度(cm <sup>2</sup> /Vs)	飽和電子速度(cm/s)
GaN	3.39	2000	2.9 × 10 <sup>7</sup>
InN	1.89	4000	4.2 × 10 <sup>7</sup>
GaAs	1.43	6000	1.8 × 10 <sup>7</sup>
InGaAs	0.86	12000	2.7 × 10 <sup>7</sup>
Si	1.10	1200	1.0 × 10 <sup>7</sup>

する研究を行い、高品質のGaN、InN結晶成長を行うことを目的とする。GaNに関しては現在まで多くの機関で研究がなされ高品質なものが報告されており、研究の方向性としては、既に報告されているものを参考に結晶成長条件の最適化を行えばよいと考えている。一方InNに関しては、まだほとんど研究が行われておらず、結晶成長に関する報告が少しある程度である。現在報告されている数少ない報告例では、結晶成長が非常に困難であることもあり、理論的に予測されている程度の優れた物性を示す高品質な結晶は得られていない。そこで、これまで実現されていない高品質単結晶InNの結晶成長を実現することを第一の目標とする。その上で、GaN及びInNをチャネル層に用いた短ゲート高周波トランジスタを試作し、高周波特性を評価することを計画している。

#### 4 SiGe-HEMT

近年、Si-CMOS集積回路は微細化の進展により急速に動作可能周波数を高めている。NMOSトランジスタに限れば、ゲート長0.18  $\mu\text{m}$ で遮断周波数 $f_T$ は60~70GHzに達し、5GHz帯のアプリケーションまで使える能力を有している。今後更に微細化は進むと考えられ、ゲート長50 nm以下の領域では $f_T = 200 \sim 300\text{GHz}$ が得られるという予想もある。Si-CMOSの高速化が進むに伴い、ローエンドの汎用品(例えばBluetoothなど)ではRF部もSi-CMOSで構成して<sup>(注2)</sup>、BB部と一体化した集積回路を目指そうという動きが出てきた。もし実現すれば大幅なコスト削減につながるが、残念なことにNMOSトランジスタと対をなすべきPMOSトランジスタは、キャリアである正孔の移動度が低いため高速化が本質的に困難である。その一方で、携帯電話に代表される通信情報端末は、昨今の無料配布商法[俗に言う新たなビジネスモデル]からも明らかのように、利用者の広がり重要な意義があり、コストに極めて敏感な応用分野である。化合物半導体デバイスはコスト低減が難しく、これをSi系半導体デバイスに置き換え1チップ構成とすることが強く求められている<sup>[12]</sup>。

このような事態を解決し得る、SiGe半導体素

子が期待されている。SiGeは、SiとGeという同じIV族半導体の混晶であるため、これまで蓄積されてきたSi半導体製造技術を適用でき、コスト削減が容易である。また、素子性能は化合物半導体には及ばないものの、上記アプリケーションの周波数帯での素子動作は十分可能である。既にRF部の一部をSiあるいはシリコンゲルマニウム(SiGe)のBiCMOS(BJTとCMOSの混載)で実現し、BB部と一体化させた集積回路も登場している。

SiGeを用いたSi系半導体素子は、大きくSiGeバイポーラ素子とSiGe-FET素子に大別される。バイポーラ素子であるSiGe-HBTは既に市販され、FET素子である歪Si-MOSFET、Si系HEMTの開発が盛んに行われている。これらの素子はそれぞれ特徴を有するが、将来の集積化を念頭に置くとFET素子が有利であり、一方、歪Si-MOSFETの性能向上は従来のSi-MOSFETの数十%に過ぎないことが明確になってきている<sup>[13]</sup>。Si系HEMTは、衛星放送受信素子として化合物半導体の高周波応用の道を切り開いたGaAs-HEMTと素子動作が同じであり、原理的に高周波動作に有利であると考えられる。

我々は、上記の考察にかんがみ、SiGe-HEMTを中心としたデバイスの開発を行っており、特にHEMT素子作製のためのウエハ評価技術、素子作製プロセス技術、素子性能評価技術等の関連技術の研究開発を統合的に行っている。

#### 5 Si通信用集積回路

無線通信システムにおけるSi-CMOS集積回路の主な役割は、アナログの高周波(RF)部から出力される中間周波数(IF)信号を受けてデジタル処理を行うBB部である。InP系、InN系、SiGe系などのHEMTによってハイエンドの無線通信における利用周波数がミリ波帯まで高周波化するのに伴ってIFも高周波化し、それを受けるBB部のデジタル集積回路も高速化が要求される(図1)。将来的に高周波無線通信においてシリコンCMOS集積回路の占める役割は増大していくと考えられ<sup>[14]</sup>、CRLとしてこの分野の研究を進展させていくことは非常に重要である。

単純に動作周波数の面では高速化を遂げてい

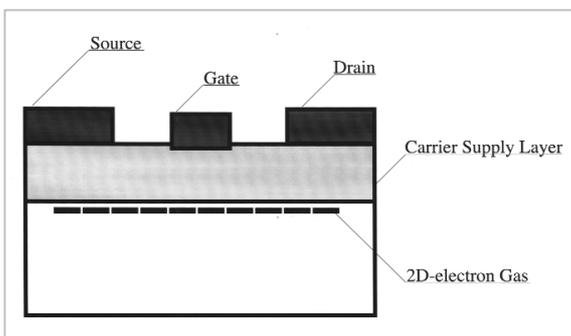


図1 HEMTの模式的構造図

るとはいえ、まだまだ解決しなければならない課題も多い。現時点では単位電流当たりの動作可能周波数はCMOSよりBJTのほうが勝っており、この理由としては、MOSトランジスタはBJTより相互コンダクタンスが小さく、インピーダンス整合に大きな受動素子が必要であること、微細化に伴ってペアトランジスタの特性整合が悪くなることなどが挙げられる。また、素子が微細化されると耐圧の関係で電源電圧を低くせざるを得ず、低電圧時のSN比の劣化を克服することも必要である。

これらの問題を解決するため、二通りのアプローチが試みられている。一つは、更なる微細化の推進やlow-k / high-k 誘電材料の開発といった物理的アプローチ<sup>15)</sup>、もう一つは素子の構造や回路構成の工夫によるアプローチであり、我々は後者のアプローチに力点を置く。例えば、マイクロマシンを応用した立体素子構造の導入による受動素子の小型化、RF部からBB部へのアナログ-デジタル(A/D)変換やBB部のデジタル信号処理にはニューラルネットを応用した自律的な回路構成を用いて、小型高性能化を図ることが考えられる。特にBB部においては、効率の良いハードウェア(専用回路)が求められる。効率の良いハードウェアを用いれば動作速度とコスト面で有利であるが、ハードウェアの効率が悪いとかえってファームウェア(CPUとソフトウェアの組合せ)より不利になってしまう場合もある。目的に適した効率の良いハードウェアの構成を追究していく必要がある。

研究手法としては、所内に小規模ながら短いターンアラウンドタイムで効率良く設計・製作・評価のサイクルを回せる設備を確立し、数千ゲート規模の重要な部分回路(セル)の研究開

発を行う。LSIレベルの大規模な検証は、セルの研究開発によって蓄積した設計・製作・評価についてのノウハウを用いて、外部のファウンドリなどと協調して行うことができる(図3)。

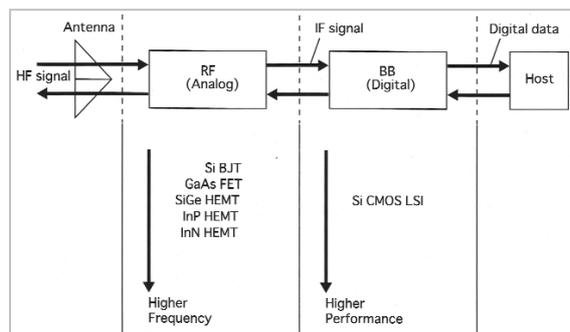


図2 通信機器の構成概念図

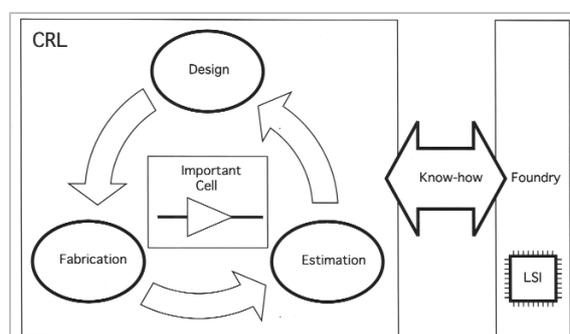


図3 CRLと外部協力ファウンドリとの関係

## 6 HotWireCVD プロセス

HotWireCVD( CatCVD )は、アモルファスシリコン薄膜の成長プロセスとして Matsumura と Tachibana によって 1985 年に提案された<sup>16)</sup>。図4に構造図を模式的に示す。膜中の水素の含有率が低いこと、減量ガスであるシランの利用効率が高いこと、大面積プロセスへの応用が容易なことなどから研究が活発化し、一部では量産行程にも取り入れられている。我々は、化合物半導体のパシベーション膜へ応用を検討しているが、諸特性改善のためには、反応機構を解明することが不可欠である。原料ガスはシランとアンモニアであるが、シランの分解過程は研究が進んでいるが<sup>17)I18)</sup> アンモニアのそれはいまだ明らかになっていない。また、基板近傍にフィラメントが位置する構造から、基板温度上昇による化合物半導体へのダメージが懸念される。特にInP基板は熱伝導率が低く、基板背面を冷却

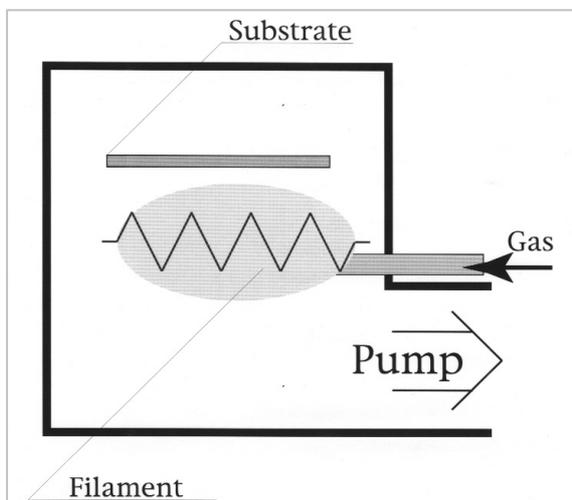


図4 HotWireのCVD装置の構造図

しても肝腎の表面温度は上昇するものと予想される。

図5は、アンモニアガスを分解した時のフィラメント温度(パイロメータで測定)に対する反応に関連するマスピーク( $m/e=2:H_2$ ,  $=16:NH_2$ ,  $=17:NH_3$ ,  $=28:N_2$ )強度を示したものである。チャンバ圧力は4Pa、アンモニアガスの流量は100SCCMである。チャンバ圧力の調整は主排気ポンプであるターボ分子ポンプの回転を制御することによって行った。フィラメント温度が

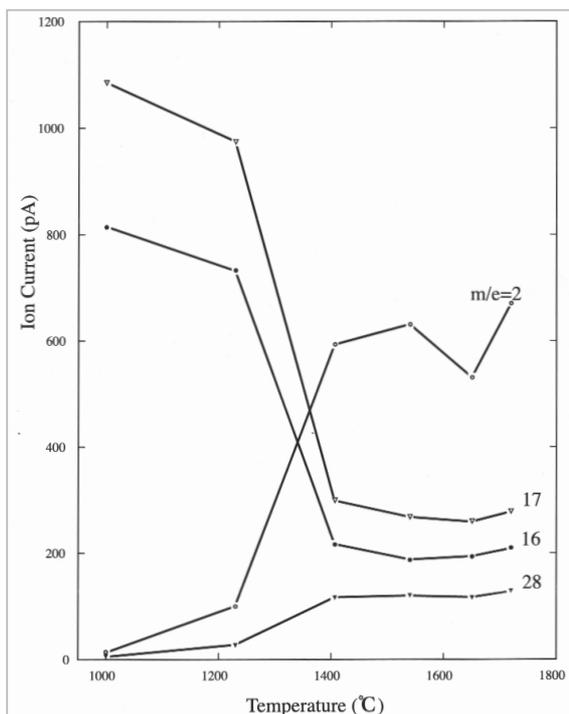


図5 フィラメント温度に対するアンモニア分解スペクトル

1250 以上で分解は急速に進行し、1400 以上に昇温しても未分解のアンモニアガスがあるにもかかわらずピーク強度が大きく変化することはなかった。

今後このようなデータを積み重ねると同時に、基板最表面の温度を測定し、反応機構の解明とプロセスの低温化を図る。

## 7 まとめ

新しく開発される通信システムの性能は、通信デバイスの性能、更にはそれらの構成要素である半導体デバイスの性能に強く支配される。未利用周波数帯の開発と将来の超高速通信システム実現のための基盤技術として、半導体デバイス技術研究の重要性は極めて大きいと考えられる。本計画では、テラヘルツ級トランジスタや、高出力のミリ波トランジスタ、高速信号処理デバイスの実現を目指しており、地上系無線通信システム、成層圏無線中継システム、宇宙通信システム、更には無線通信のセキュリティのための暗号化技術などの多くの通信技術分野への発展の可能性が期待される。通信総合研究所におけるデバイス研究は、これまで幾つかの民間企業、大学、公的研究機関との協力関係によって進めてきた。新機能デバイス研究と実用化技術の開発については、今後とも多くの外部機関との協力の下に推進することを計画しており、各方面からのご協力をお願いしたい。また、新しいミリ波通信システムの実用化を推進するために各種の機能部品や、高性能通信装置の開発など、応用技術の研究開発を進めている。

## 謝辞

本稿執筆に当たり、数々の有用な助言を頂きました富士通研究所の河西博士、笠松博士に深く感謝いたします。

(注1) 2001年9月末日現在

(注2) 従来、高周波回路では、ベースバンド(BB)部はSi-CMOS、高周波(RF)部にはGaAs等の化合物デバイスがパイポーラ・ジャンクション・トランジスタ(BJT)という棲み分けが一般的であった。

## 参考文献

- 1 加藤, 三宅, “ 汎携帯主義・1チップ・ケータイ無線回路が鍵を握る ”, 日経エレクトロニクス, No.773, pp.126-131, 2000.
- 2 Tad Yamaguchi, “ 1チップ・ケータイの要SiGe技術を詳説する ”, 日経エレクトロニクス, No.776, pp.156-161, 2000.
- 3 T. Mimura, S. Hiyamizu, T. Fujii, and K. Nanbu, "A New Field-Effect Transistor with Selectively Doped GaAs/n-AlxGa1-xAs Heterojunctions", JJAP, vol. 19, No. 5, pp. L225-227, 1980.
- 4 末光, “ InP系高電子移動度トランジスタ(HEMT) ”, 応用物理, Vol.69, No. 2, pp.141-151, 2000.
- 5 L. D. Nguyen, A. S. Brown, M. A. Thompson and L. M. Jelloian, "50-nm Self-Aligned-Gate Pseudomorphic AllnAs/GalnAs High Electron Mobility Transistors", IEEE Trans. ED Vol. 39, No.9, p. 2007-2014, 1992.
- 6 C. Y. Chen, A. Y. Cho, K. Y. Cheng, T. P. Pensall, P. O'connor and P. A. Garbinski, "Depletion Mode Modulation Doped AlO. 48In0.52As-Ga0.47In0.53As Heterojunction Field Effect Transistors", IEEE EDL, Vol. EDL-3, No. 6, p. 152-155, June 1982.
- 7 Y. Yamashita, A. Endoh, K. Shinohara, M. Higashiwaki, K. Hikosaka, T. Mimura, S. Hiyamizu, and T. Matsui, "Ultra-Short 25-nm-Gate Lattice-Matched InAlAs/InGaAs HEMTs within the Range of 400 GHz Cutoff Frequency", IEEE Electron Device Lett., Vol. 22, No. 8, pp. 367-369, 2001.
- 8 K. Shinohara, Y. Yamashita, A. Endoh, K. Hikosaka, T. Matsui, T. Mimura, and S. Hiyamizu, "Ultra-high-Speed Pseudomorphic InGaAs/InAlAs HEMTs With 400-GHz Cutoff Frequency", IEEE Electron Device Lett. Vol. 22, No. 11, pp. 507-509, 2001.
- 9 K. Shinohara, T. Matsui, T. Mimura, S. Hiyamizu, "Novel Asymmetric Gate-Recess Engineering for Sub-Millimeter-Wave InP-based HEMTs", IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp., Vol. 3, pp. 2159-2162, 2001.
- 10 大野, 葛原, “ 高度情報通信社会とGaN系高周波デバイス ”, 応用物理, Vol. 69 No. 7, pp.815-819, 2000.
- 11 B. E. Foutz, S. K. O'Leary, M. S. Shur and L. F. Eastman, "Transient electron transport in wurtzite GaN, InN, and AlN", J.Appl. Phys. 85, p7727-7734, 1999.
- 12 加藤, 三宅, “ 汎携帯主義・1チップ化の要SiGeチップの量産始まる ”, 日経エレクトロニクス, No.773, pp.140-145, 2000.
- 13 高木, 杉山, 水野, 手塚, 畠山, 臼田, 黒部, “ ひずみシリコンのCMOS応用とひずみSOIMOS構造 ”, シリコンテクノロジー, No.18, pp.52, 2000.
- 14 高柳, 羽鳥, “ Bluetooth 応用システムLSI ”, 電子情報通信学会誌, Vol.84, No.8, pp.565-571, 2001.
- 15 岩井, 大見, 百瀬, 大黒, 勝又, “ マイクロ波Si系半導体素子・回路の技術動向及び今後の展望について ”, 電子情報通信学会論文誌C, Vol. J83-C, No.10, pp.911-919, 2000.
- 16 H. Matsumura and H. Tachibana, "Amorphous silicon produced by a new thermal chemical vapor deposition method using intermediate species SiF<sub>2</sub>", Apl. Phys. Lett., Vol. 47, pp. 833-835, 1985.
- 17 J. Doyle, R. Robertson, G.H. Lin, M.Z. He, and A. Gallagher, "Production of high-quality amorphous silicon films by evaporative silane surface decomposition", J. Appl. Phys., Vol. 64, No. 6, pp.3215-3223, 1988.
- 18 H. L. Duan, G.A. Zaharias, and Stacey F. Bent, "Probing Gas Phase Radicals in Hot-Wire CVD Using Single Photon Ionization", Extended Abstract 1st Int. Conf. on Cat-CVD, pp.35-36, 2000.

まつ いとし あき  
松井敏明

無線通信部門 ミリ波デバイスグループ  
リーダー  
高周波精密計測、ミリ波要素技術



しの はら けいすけ  
篠原啓介

無線通信部門 ミリ波デバイスグループ  
研究員 博士(工学)  
高周波半導体デバイス



ひがし わき まさ たか  
東脇正高

無線通信部門 ミリ波デバイスグループ  
研究員 博士(工学)  
半導体結晶成表、半導体デバイス  
プロセス

ひろ せ のぶ みつ  
広瀬信光

無線通信部門 ミリ波デバイスグループ  
主任研究員 工学博士  
半導体プロセス技術、極微細加工技術