

平成 1 8 年 3 月修了
博士（工学）学位論文

化合物半導体事業のイノベーション過程に関する考察

A Study of Innovation Process in Compound Semiconductor Business

平成 17 年 12 月 14 日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻（起業家コース）

学籍番号 1068004

松野年伸

Toshinobu Matsuno

目次

論文要旨

1 章 序論

2 章 本研究の背景と意義

2-1 I T 革命の進化に対応する半導体技術

2-2 ユビキタス社会を支える化合物半導体

2-2-1 化合物半導体デバイス発展と応用の歴史

2-2-2 化合物半導体により実現されたイノベーションの事例と 社会へのインパクト

3 章 化合物半導体に関する基礎的研究

3-1 化合物半導体結晶の物性に関する新しい考察と応用

3-1-1 N-AlGaAs/InGaAs 選択ドープシングル- 及び ダブルヘテロ接合 FET 構造の結晶成長と特性評価

3-1-2 12GHz 帯低雑音トランジスタへの応用

3-2 新しいヘテロ接合結晶成長技術の開発

歪層及び歪緩和層 InAlAs/InGaAs HEMT 構造における 2次元電子ガスの移動度

3-3 SiGe ヘテロ接合の新しい応用による高耐圧化に関する研究

コレクタ選択イオン注入 SiGe HBT を組み合わせたパワーアンプ

4 章 松下における化合物半導体の開発と事業創出

4-1 UHF/SHF テレビジョン受像機用 MMIC

4-2 携帯電話送受信用 MMIC

4-3 半導体レーザーと光ピックアップ用モジュール

5 章 化合物半導体におけるイノベーションの経営学的考察

5-1 異文化イノベーション

5-2 異文化イノベーションのインテグレーション経営モデル

ヘテロジニアスインテグレーションモデル

5-3 化合物半導体の R&D における ROI の考察

6 章 結論

謝辞

学会発表リスト

特許リスト

論文の要旨

本論文は、筆者が松下電器産業（株）にて研究開発に従事してきた化合物半導体デバイス事業に関するものである。研究開発の初期の段階から、事業化を行い、今日の情報通信社会を支えるキーデバイスへと発展する過程においてどのような形でイノベーションが行われてきたかを松下電器産業における化合物半導体事業をモデルケースとして、経営学的な観点から研究を行ったものである。論文は大きく分けて以下の3部より構成される。

- 1．化合物半導体物性に関する基礎的研究
- 2．化合物半導体事業の創出に関する研究
- 3．イノベーション過程に関する経営学的考察

第1章 序論

半導体産業は今日の情報通信社会やマルチメディア社会を支える産業として今や無くてはならない存在である。半導体の分野を材料の観点から分類すると、大きく2つに分類される。1つはマイコンや大規模集積回路（LSI）に代表されるシリコン（Si）系の半導体である。もうひとつは半導体レーザーや携帯電話や衛星放送などの超高周波の無線回路に用いられている砒化ガリウム（GaAs）に代表される化合物半導体である。化合物半導体の市場はシリコン半導体の市場と比較すると1/10程度であるが、マルチメディア分野や無線通信分野においてシリコン半導体と車輪の両輪の役割として不可欠な存在にまで発展してきた。

第2章 本研究の背景と意義

半導体レーザーの実現は、光情報記録を可能とし、大容量の動画記録を実現し、マルチメディアの発展に大きく寄与した。また通信用半導体レーザーや受光素子の開発によりインターネットが大きく普及したことや、化合物半導体トランジスタの開発により、小型、低消費電力の携帯電話が実現され、今や国民の約7割が所有しており、生活やビジネスに欠くことのできない存在になっている。また衛星放送は情報の国境をなくし、東欧社会に変革をもたらす1つの要因になったと考えられている。

- 1．経済的効果：応用機器、サービスの実現による新たな産業の創出と拡大
- 2．政治的効果：情報通信インフラの発達への寄与、情報のボーダーレス化
- 3．社会的効果：人々の生活を変革

第3章 化合物半導体を事例とした新事業への基礎技術開発

本章では化合物半導体デバイスにおいてキーテクノロジーである結晶成長技術の研究開発とその電子デバイス応用を目的とした技術について述べる。

3-1 化合物半導体結晶の物性に関する新しい考察と応用

3-1-1 N-AlGaAs/InGaAs 選択ドープシングル- 及び ダブルヘテロ接合 FET 構造の結晶成長と特性評価

3-1-2 12GHz 帯低雑音トランジスタへの応用

AlGaAs/GaAs 接合を用いた HEMT (High Electron Mobility Transistor) の発明により、電子の走行速度の向上や、電流駆動能力の向上により、高周波性能が大きく向上し、応用分野が大きく広がった。さらに性能向上を図ることが可能な AlGaAs/InGaAs 歪層ヘテロ構造が提唱された。しかしながら AlGaAs と InGaAs とは結晶の格子定数が異なるため、結晶の歪を制御し、良好なヘテロ接合を作製するための、結晶成長技術が重要となる。ここではシングルヘテロ及びダブルヘテロ接合 AlGaAs/InGaAs FET 構造について結晶歪が電気的特性に与える影響の違いについて明らかにした。また AlGaAs/InGaAs HEMT 構造は電子速度が大きく、電子濃度が大いことから、FET の微細化により、高い遮断周波数、超高周波帯での低雑音特性が期待される。またダブルヘテロ構造によりさらに、電子濃度を向上させることにより、高周波のパワー増幅器やスイッチ IC への応用が可能となる。ゲート長 0.2 μm 以下の AlGaAs/InGaAs HEMT を試作し、衛星放送で用いられる 12 GHz で NF= 0.54dB の超低雑音特性を実現した。

3-2 新しいヘテロ接合結晶成長技術の開発

歪層及び歪緩和層 InAlAs/InGaAs HEMT 構造における 2 次元電子ガスの移動度

InGaAs 歪ヘテロ接合 FET 構造では InGaAs チャンネルの In の組成を大きくすることで電子の飽和速度の向上、および電子濃度のが向上が期待できる。同時に物理的な格子歪も大きくなり、臨界点を超えると結晶の歪が緩和し、逆に特性が劣化する。この問題を解決する手段として、膜厚と共に一定の変化量で In 組成が増加するグレーディッドバッファ層を用いた格子緩和技術により、任意の In 組成の格子緩和高品質の InAlAs/InGaAs ヘテロ接合 FET 構造を実現した。InAlAs/InGaAs ヘテロ接合 FET 構造において格子歪構造と格子緩和構造について格子歪の観点から解析を行い、その電気的特性の違いについて解析を行った。

3-3 SiGe ヘテロ接合の新しい応用による高耐圧化に関する研究

コレクタ選択イオン注入 SiGe HBT を組み合わせたパワーアンプ

近年、シリコン系デバイスの技術の向上により、高周波性能の向上が著しく、SiGe のトランジスタの実現により、化合物半導体との応用ターゲットがオーバーラップする領域が拡大した。小信号応用分野については集積化が可能であるというメリットから、携帯電話や無線 LAN の無線部への実用化が進んでいる。しかしながら、高周波パワー応用については、Si/SiGe の材料に起因する高周波性能と耐圧とのトレードオフという課題が存在するため携帯電話等では実用に至っていない。SiGe HBT 構造において、コレクタ層の不純物濃度と膜厚を最適化により、耐圧を向上させ、その高周波パワー応用について可能性を検証した。さらに多段構成の増幅器について、前段と後段の増幅器にコレクタ構造を変え、耐圧の異なるトランジスタを用いることで、耐圧と高周波特性の向上が可能であり、マイクロ波領域での高出力デバイスとしての可能性を示した。

第4章 松下における化合物半導体の開発と事業創出

松下電器における化合物半導体事業をモデルに、化合物半導体の開発初期段階から、事業化、今日の発展に至るまでのビジネス戦略や事業化に至る過程をいくつかの事例で検証した。松下において化合物半導体の研究開発は 1960 年代に始まったが、黎明期においては技術の成熟度が低く、アプリケーションに応用できる段階には至ってなかった。半導体レーザーについてはその用途は明確にあったが、室温での連続発振、信頼性を実用レベルまで高めるのには長い時間を必要とした。一方、電子デバイスについてはレーザーとは逆にその高周波性能に対する材料のポテンシャルは高いものの、コストも高く、化合物半導体でなくてはならないという応用分野にまだ目処がなかった。そのような状況から始まって、技術のデスバレイに陥ることなく、生き残り、事業として発展を成し遂げ、情報通信、マルチメディア社会を支える産業にまで発展するまでの過程と、その転機について考察する。

4-1 UHF/SHF テレビジョン受像機用 MMIC

他社は化合物半導体トランジスタにおいて予想される超高周波性能でのポテンシャルから、将来、サービスが予定されている SHF 帯（2-30GHz）の衛星放送用の低雑音受信アンプへの応用を目指したデバイス開発を行っていた。しかし、高周波波化のための超微細加工技術も必要であり、サービスが開始され、事業として立ち上がるまでの期間、企業として利益を生み出せない。そこで、他社が目をつけず、その時点でのデバイスレベルでも性能的にメリットの出る UHF 帯のテレビチューナへの応用、事業化を行った。ニッチであってもビジネスに早期に展開し、継続しつつ、将来の大きな市場を目指して技術の向上を図っていった。

4-2 携帯電話送受信用 MMIC

NTT の主導により、電機メーカーに携帯電話用セットの委託開発がスタートした。開発段階からセット、部品、企画、研究所、製造、マーケティングの関連各部門が集結、全社プロジェクト体制のもと垂直的立ち上げを果たした。電池の技術と化合物半導体を用いることでの低消費電力化、IC 化による部品としての小型化、高周波性能の向上及び設計技術等によりセットの低消費電力を実現し、携帯電話の普及に寄与した。その後の携帯電話の爆発的な拡大に牽引され、化合物半導体事業が大きく伸びる契機となった。そのアプリケーションで最も求められるものを実現し、他社の性能を上回ること競争の少ない段階で市場を確保し、利益を出すことが出来た。インフラがデバイス開発に大きく影響した事例の一つでもある。

4-3 半導体レーザーと光ピックアップ用モジュール

光ディスクの読み出しや書き込みには半導体レーザーが用いられている。レーザー事業の初期に、レーザー単体では無く、ホログラムユニット（＝モジュール化）とすることにより、付加価値を見出し、単価が高くても売れる利益率の高い商品を実現する事業戦略により、事業拡大を実現した。

SiGe HBT

携帯電話の高周波受信部には GaAs の IC が用いられてきたが、シリコン系デバイスの性能向上により、SiGe HBT への置き換えが可能となった。化合物事業としての市場は減少したが、企業全体としては、高周波応用分野で最適な選択により利益を出せるという点でメリットは大きい。それにより、化合物半導体はさらに高速、高周波性能が必要な分野へと棲み分けが図られてきた。応用機器、システムによって最適なデバイスソリューションを提供する方向に変化してきている。

第5章 化合物半導体におけるイノベーションの経営学的考察

化合物半導体事業化の過程においていくつかの共通するモデルが見出した。1つは新たな技術を研究開発から、実用化に結び付ける過程において、そのアプリケーションが明確でない場合、もしくは市場を含めてビジネスのターゲットは明確であるが、現状の技術ではすぐに要求される性能を満たすことが困難な場合や、もしくはインフラにかかわる技術の場合で、実施までに長い期間がかかる場合がある。今日の激しい技術開発競争においても、全く新しい材料や原理を用いて、実用レベルの技術に仕上げていくには長い年月を要する。そのような状況下で、最終的にビジネスを成功させるには、まずは技術自体を存続

させることが重要である。企業における研究開発は利益の追求がひとつの大きな目的であるため、投資に対して一定の期間での回収、ROI（Return of Investment）が求められる。そこにおいて、技術の本質を見極め、その時点の未成熟な技術レベルにおいても既存技術に対する優位性、新たな価値を製品に付加できるアプリケーション、市場を探索し、たとえばそれがニッチな市場であっても、参入、事業化を行うことが重要であると考え。事業を推進する中で、技術の向上を図り、最終ターゲット市場で要求されるデバイススペックを満足するレベルまで発展させ、ビジネスの拡大へとつなげる戦略が必要な場合もある。

また本研究を通じて、そのイノベーションの過程において、異文化同士の接触がひとつの大きな役割を果たしている事を見出し、事例を基に検証を行った。その考察を基に異文化イノベーションとさらに複合化した、ヘテロジーニアスインテグレーションモデルを提唱した。単一の文化の中で発展してきた技術が、他の異なる文化を持つ技術と接触することにより、ある活性化エネルギーを得て、イノベーションへと発展するケースが挙げられる。さらに単一の文化が複数、複合、融合することによってイノベーションが生まれる事を見出した。

6章 結論

化合物半導体事業におけるイノベーションの過程について考察を行った。化合物半導体の実用化により、社会変革をもたらし、大きな経済波及効果も生み出してきた。今後もユビキタス社会の実現に向けて情報通信、マルチメディア技術を支える化合物半導体はより重要な役割を果たすことが予想される。化合物半導体は異なる元素を組み合わせることで単一の元素には無い、発光することや電子高速で動作するといったこれまでに無い、新たな物理現象生み出す、多様性を有するダイバーシティーテクノロジーといえる。

研究開発から事業化、ビジネスへの発展の過程においていくつかの共通するモデルが見出された。ニッチで事業化し、メジャーへ展開するというモデルとその過程においてイノベーションが起こる際に、異文化同士の接触がひとつの大きな役割を果たしている事について事例を基に検証を行った。その考察を基に異文化イノベーションとさらに複合化した、ヘテロジーニアスインテグレーションモデルを提唱した。単一の文化の中で発展してきた技術が、他の異なる文化を持つ技術と接触することにより、ある活性化エネルギーを得て、イノベーションへと発展するケースが挙げられる。さらに単一の文化が複数、複合、融合することによってイノベーションが生まれる事を見出した。化合物半導体において考察を行ったものであるが、本モデルは他の技術分野においても適用が可能である。さらに一つの技術のシーズが事業として発展し、社会的なイノベーションに発展するには、技術的なイノベーションのみでは、成し得ず、そこには、ビジネスにおけるイノベーション、すなわち戦略の介在がキーとなる。ユビキタス社会の実現に向けて、化合物半導体はひとつのキーデバイスであり続けると考えられる。今後、ビジネスとして発展させて行くには以

下の観点が必要であると考える。

- ・化合物半導体のみでなく、シリコンデバイスも含め、高周波、セットの観点でベストソリューションを提供。

- ・セットやシステムの高機能化に伴い、シリコン LSI 制御等技術との融合による、ソリューションを提供。

今後のイノベーションの可能性

- 1．原子の組み合わせによる新たな物性を用いた新しいデバイスの開発
- 2．化合物半導体を用いることで実現可能な新しいシステム、応用の模索
- 3．新テクノロジー（MEMS、マイクロマシン等）との融合による高付加価値化

化合物半導体技術を次元の高いものへと発展させ、ビジネスとしてさらに大きく発展させるためには、化合物半導体が本質的にもつ多様性のさらなる追求と、これまでにない新たな文化をもつ技術との接触、融合がキーとなると結論づける。

第 1 章 序論

この章ではまず本研究を行った背景と本研究の目的について述べる。次に研究対象とした化合物半導体について述べ、材料の基礎研究から応用研究を経て、今日の産業への応用に至るまでの発展の歴史について概説する。

本論文の背景と目的

今日の情報通信社会やマルチメディア社会はそれを支える産業としての半導体産業なくしては成り立たない状況にまで至っている。半導体を材料の観点から分類すると、大きく 2 つに分類される。1 つはマイコンや大規模集積回路 (LSI) に代表されるシリコン系の半導体である。もうひとつは半導体レーザーや携帯電話や衛星放送などの超高周波の無線回路に用いられている砒化ガリウム (GaAs) に代表される化合物半導体である。化合物半導体の市場規模はシリコン半導体の市場と比較すると約 1/10 と非常に小さいが、マルチメディア分野や無線通信分野においてシリコン半導体と車輪の両輪の役割として不可欠な存在にまで発展してきた。しかしながら、研究開発の初期段階から事業化が行われ、今日のよ

うな発展に至る過程は必ずしも順調ではなかった。

化合物半導体デバイスは半導体産業において今日の IT、情報化社会、ユビキタス社会を支えるキーデバイスとして発展してきた。先に述べたように、異なる原子を組み合わせることで新たな物性が発現し、光と超高周波動作という独自の特性が得られる。その特徴を生かし、シリコン半導体と競合ではなく、集積化と大容量データ処理に優位なシリコンの特性との融合により、共生、補間関係において新たな価値及びビジネスを創出してきた。本論文の目的は、その化合物半導体産業の発展してきた中でどのようにイノベーションが行われてきたかについて具体的事例を基に検証を行うことにある。その事例として筆者が化合物半導体の研究開発を長年行ってきた松下電器産業 (株) における化合物半導体事業を取り上げ、検証を行った。

本論文の構成

本論文は化合物半導体事業の発展過程においてどのような形でイノベーションが行われてきたかについて松下電器における化合物半導体事業をモデルケースに考察を行った。第 1 章では、序論として本研究の背景について述べる。第 2 章は研究の背景と意義について述べ、化合物半導体について概説した。さらに化合物半導体が今日の社会に与えたインパクトについて 3 つの事例について検証を行った。第 3 章では、化合物半導体技術のキーテクノロジーとしての結晶成長技術の研究開発について述べる。第 4 章では松下における化合物半導体の開発と事業創出について事例研究をおこなった。第 5 章では経営的観点から

イノベーションについて考察を行った。第 6 章では結論と今後の発展に向けての取り組みについての総括を行う。

半導体産業における化合物半導体の位置づけ

本研究における化合物半導体の位置づけを明確にするため、その材料物性についてまず示した。1、2) 半導体材料としては表 1 の原子周期律表の IV 族であるシリコン (Si) が最も一般的であるが、II 族と VI 族、III 族と V 族といった元素を組み合わせた化合物においても半導体の性質を示す。その組み合わせによって、化合物半導体を構成する個々の元素単体にはない電子の走行速度が大きな材料や光を発するといった新たな物性が発現し、固有の特性を有する。その結晶構造は図 1 - 1 に示すようにシリコンが単一原子によるダイヤモンド構造と呼ばれる構造であるのに対して、化合物半導体は閃亜鉛鉱構造と呼ばれる構造を有する。これらの化合物を複数組み合わせたものは、混晶半導体と呼ばれ、混晶の比率を変化させることにより、その物性を連続的に制御できる。例えば 1 つの例として GaAs と AlAs の混晶である $Al_xGa_{1-x}As$ において混晶比 x を変えることにより、発光波長を変化させることができる。図 1 - 2 に示すように、さらに異なる化合物半導体層を接合させ、ヘテロ接合と呼ばれる構造を形成することで新たな機能を持たせることが可能となり、この複数原子の組み合わせにより、無限の可能性を秘めた材料である。上述の組み合わせを設計することにより、さまざまな機能を制御できることが、化合物半導体の大きな特徴としてシリコン半導体と異なる特徴として独自の形態で発展してきた。本論文が研究の対象とする化合物半導体は高周波トランジスタやレーザーやフォトダイオードなどの発光受光素子に応用される Ga、In、Al、As、P からなる III-V 族化合物半導体とする。さらに高速・高周波デバイスへの応用という観点から、厳密には IV 族同士の混合物であり、化合物半導体とは異なる Si と Ge の混晶である SiGe 半導体も異なる材料をからなるヘテロ接合技術からなり、さらに今後の高周波関連ビジネスにおける有力なデバイスの選択肢の一つであることから研究の対象として取り上げた。

表 1-1 . 化合物半導体材料の元素周期律表

IIb	IIIb	IVb	Vb	VIb
	B	C	N	O
	Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In	Sn	Sb	Te

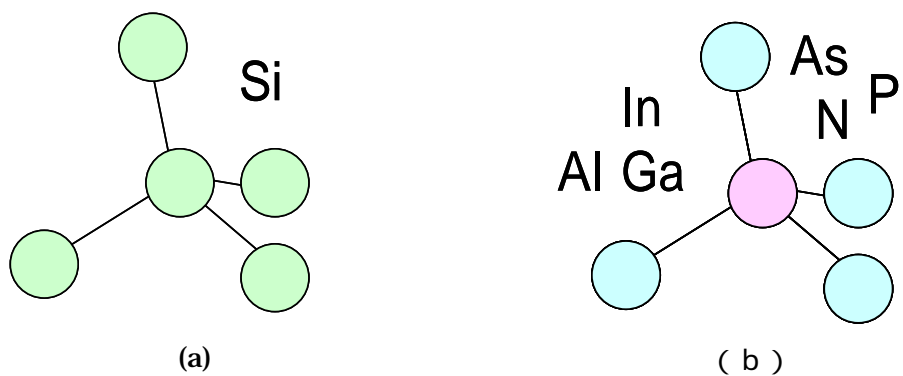


図 1-1 . シリコン半導体 (a) と化合物半導体 (b) の結晶構造

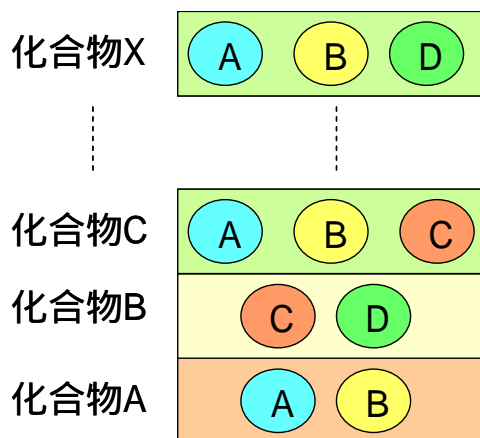


図 1-2 . 化合物半導体とヘテロ接合

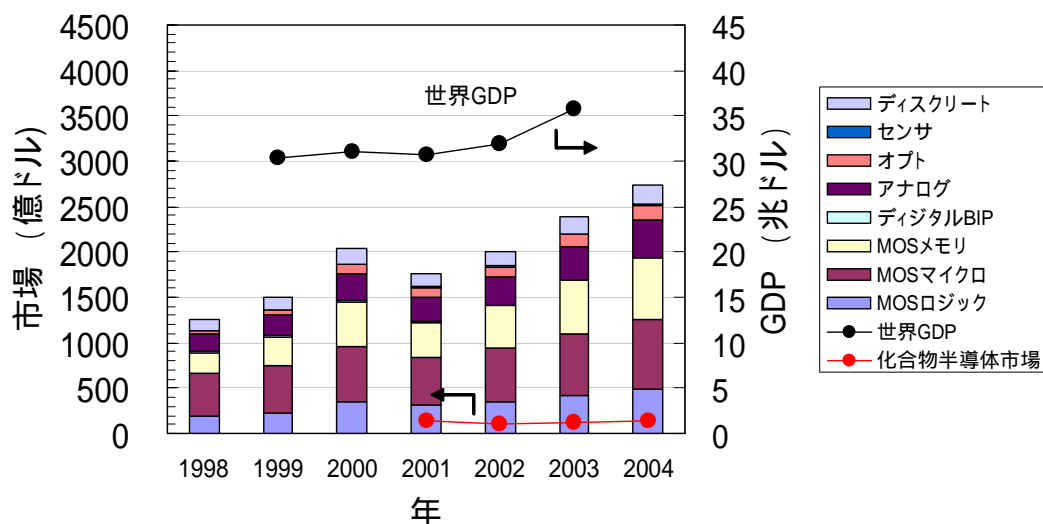
序論の参考文献

- 1) 最新化合物半導体ハンドブック サイエンスフォーラム社 (1982)
- 2) 上田大助 監修・著：「高周波・光半導体デバイス」 電子情報通信学会 (1999)

第2章 本研究の背景と意義

2-1 IT革命の進化に対応する半導体技術

半導体を材料の観点から分類すると、大きく2つに分類される。1つはマイコンや大規模集積回路（LSI）に代表されるシリコン系の半導体である。もうひとつは半導体レーザーや携帯電話や衛星放送などの超高周波の無線回路に用いられている砒化ガリウム（GaAs）に代表される化合物半導体である。図2-1に応用分野別の世界の半導体市場とGDPの推移を示す。化合物半導体の市場規模はシリコン半導体の市場と比較すると約1/10と非常に小さいが、マルチメディア分野や無線通信分野においてシリコン半導体と車輪の両輪の役割として不可欠な存在にまで発展してきた。これらの半導体技術はIT革命をもたらし、現在も進化しつつ、さらにビジネスとしても大きな市場を形成してきた。



下記データ出典を基に筆者が作成

- ・半導体市場：WSTS
- ・化合物半導体市場：BUSINESS COMMUNICATIONS COMPANY, INC
- ・世界GDP：財団法人 世界貿易投資研究所 (ITI)

図2-1 応用分野別の世界の半導体市場とGDPの推移

2-2 ユビキタス社会を支える化合物半導体

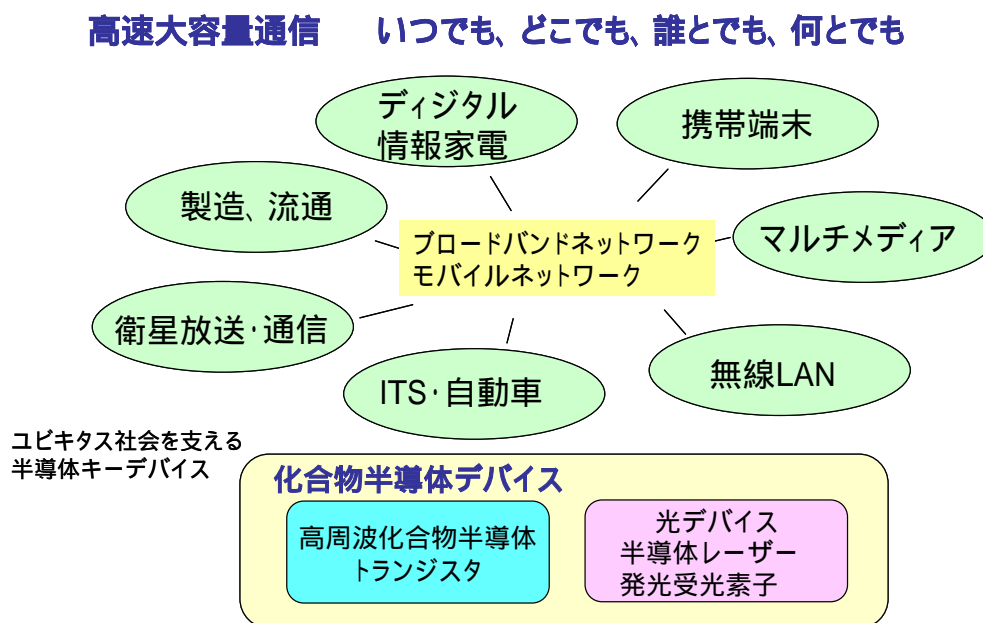
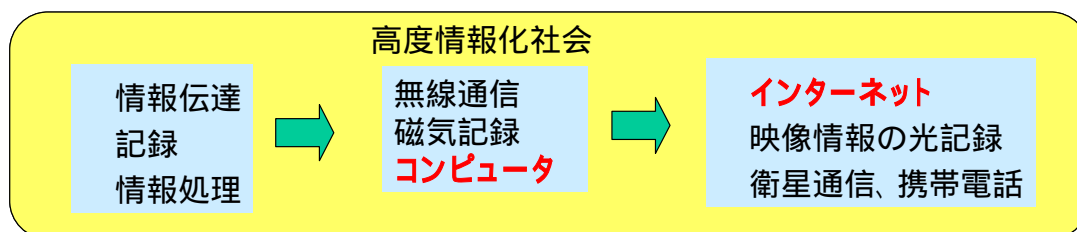


図 2-2 ユビキタスネットワーク社会と化合物半導体デバイス

これまで人類は情報コミュニケーションの手段として、音声にはじまり、音声や画像を有線から無線へと情報伝達手段を発展させてきた。また情報を紙に始まり、磁気記録方式による情報を記録して残す手段や持ち運び及び配布可能な媒体を実現する情報記録技術を開発してきた。さらにそれらの情報を処理し、活用するという要望が生まれ、簡単な計算機から始まり、複雑な処理が可能なコンピュータを生み出した。さらにコンピュータ同士を有機的に結び、インターネットの概念や大容量のデータや画像や動画を記録可能な光記録、地球上で映像情報の遠距離の通信を安定に行うえる衛星通信、いつでもどこでもコミュニケーションが可能な携帯電話など、社会的なイノベーションとして人間の願望を技術という手段によってイメージを具現化、実現してきた。このような状況においては次の願望としてより高速、大容量のデータを扱うというところに必然的に至る。これまでコンピュータを実現してきたシリコン半導体においてはさらにトランジスタや LSI において微細化、集積化を極限までを進め、ナノテクの領域まで踏み込み、CPU を複数個使用した並列演算処理やソフトウェアの改良により、さらなる高速、大容量化を進めてきた。しかしながらこれらにはシリコンという材料を用いている限りにおいては、その材料物性からおのずと限界がある。そこでシリコンにはない、化合物半導体の光するという特徴と高速動作=超高周波での動作性を有する物性に必然的に目が向けられ、基礎的な研究が進められてきた。

なぜ化合物半導体なのか？

社会的なイノベーション



高速！大容量！

技術的なイノベーション

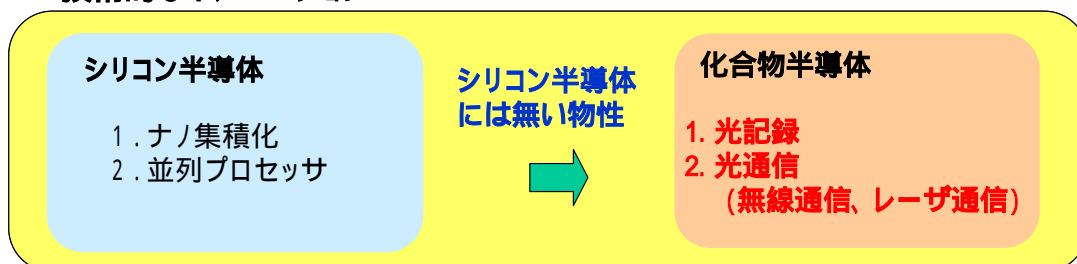
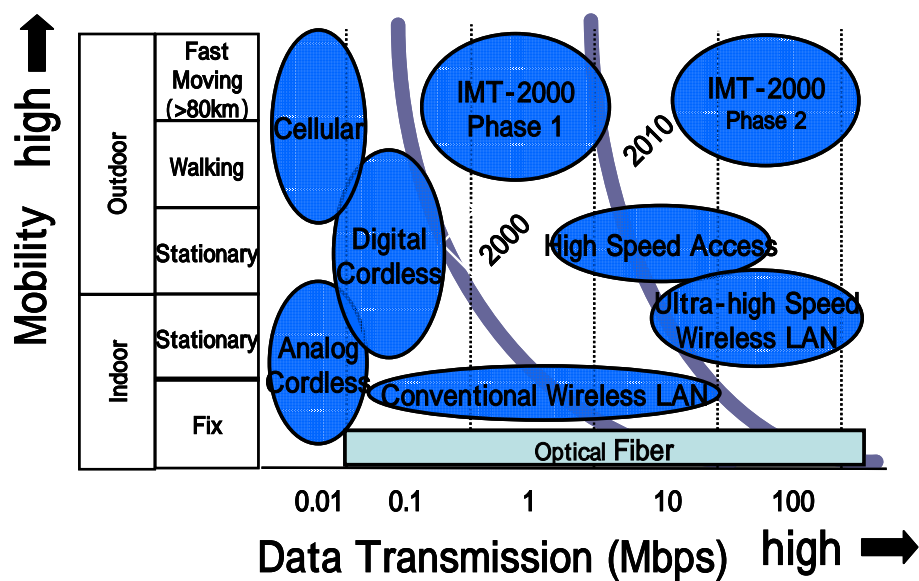


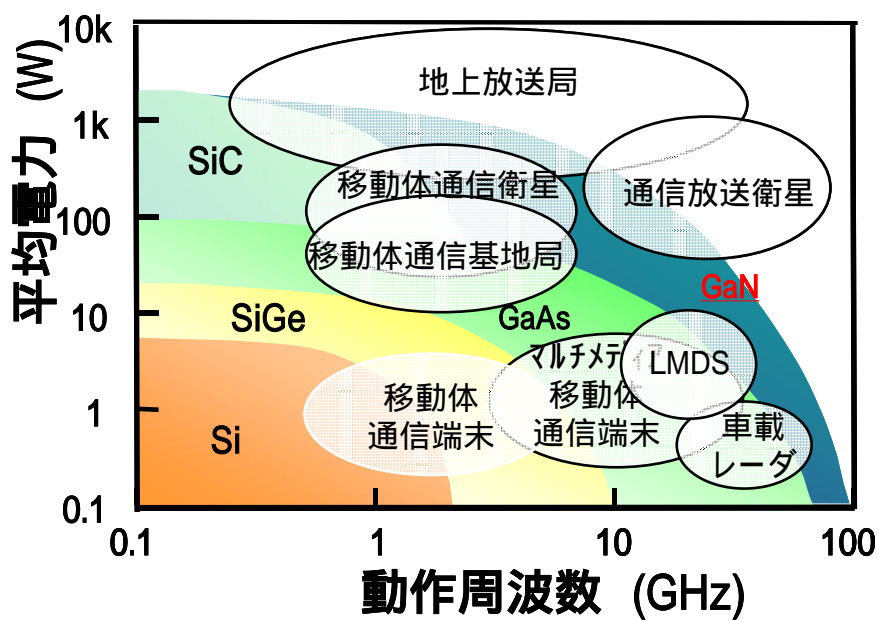
図 2-3 化合物半導体デバイスに求められるもの

そのような発展過程においてさらに高速、大容量の情報通信という点と光情報記録という2つの面から、その背景について述べる。まず情報通信の分野については、図 2-4 に示すようにデータの転送容量と移動速度によってさまざまなシステムが考案され、実現されてきた。現在では携帯電話では室内のアナログのコードレスから始まり、屋外において、また車などで高速移動中でも通信可能なデジタルのセルラーフォンまで実現された。一方、転送容量の大容量化には光ファイバによる通信が対応している。今後はさらに、高速移動かつ大容量の通信が可能な方式の実現に向けて開発が進み、ブロードバンド化が加速する。図 2-5 に通信システムが求める周波数・出力と高周波デバイスについて示す。また情報通信の方式により、使用される周波数も超高周波へと拡大し、無線通信で用いられる高周波のパワーにおいても小さいものから大きなものまで用途によって異なるデバイスが用いられる。



松下電器社内資料より

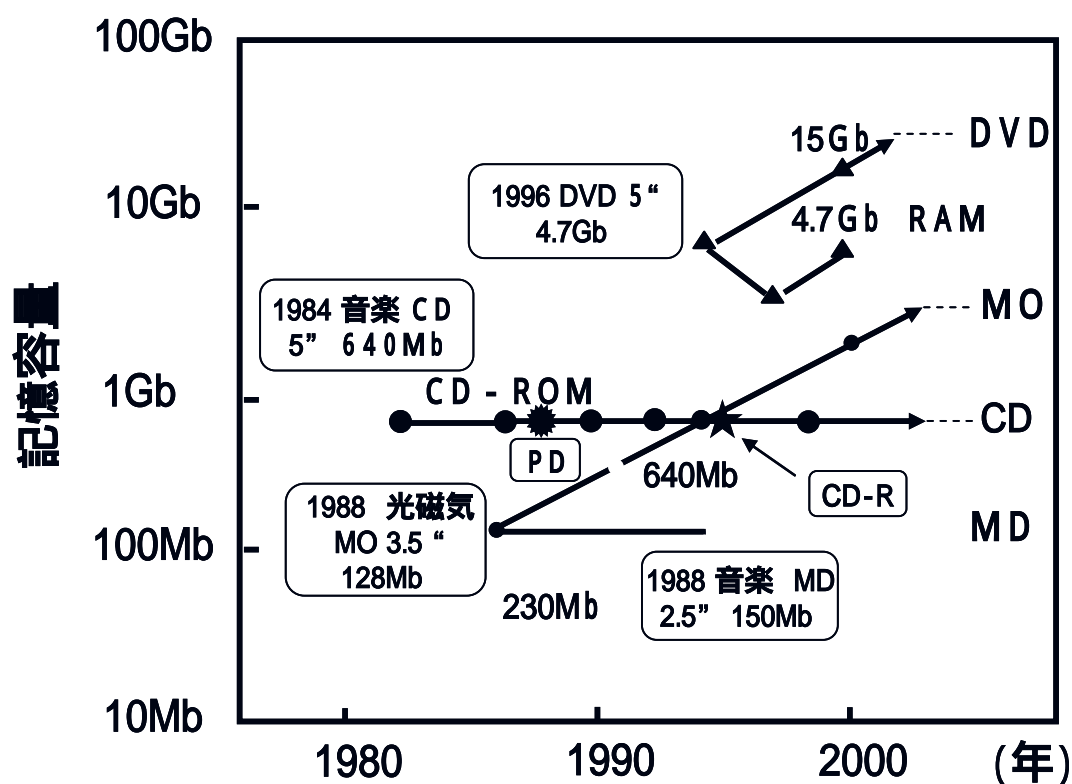
図 2-4 情報通信のトレンド



松下電器社内資料より

図 2-5 通信システムが求める周波数・出力と高周波デバイス

図 2-6 に光記録方式と記憶容量の変遷を示す。光情報記録の分野では 1984 年に音楽用の CD-ROM が世に出て依頼、パーソナルコンピュータ（PC）の発展と共に記憶容量の大容量化の要望により、光磁気記録方式の MO や相変化方式の PD（層変化型記録方式）が開発され、640MB 以上のデータの記録が可能となった。一方でコンピュータの処理能力の向上やマルチメディアへの期待により、映像、動画の記録が可能な DVD へと進化してきた。さらに次世代の DVD システムとして波長の短い青紫色レーザーを採用することで記憶容量がディスク 1 枚当たり 10Gb を超える Blu-ray ディスクシステム等も実現されている。このように光記録デバイスも大容量、高速と高度化してきており、それに伴い、読み出し、書き込みに用いられるレーザーも高性能化が求められてきた。



出典：「高周波・光半導体デバイス」 電子情報通信学会 （1999）

図 2-6 光記録方式と記憶容量の変遷

2-2-1 化合物半導体デバイス発展と応用の歴史

化合物半導体のレーザー(1-5)やトランジスタのアイデア自体は 1960 年代から存在し、研究開発が行われてきたが、当初は技術的に成熟度が低く、期待されるデバイス性能の実現が困難であった。化合物半導体デバイス技術においては結晶成長、ヘテロ接合形成技術がキーとなる技術であり、1970 年代から 80 年代にかけて結晶成長技術のブレークスルーにより、良好なヘテロ接合を有する結晶が作製可能になった。さらにエッチング技術、電極形成技術、熱処理技術、パッシベーション技術の開発が進んだ結果、ダブルヘテロ構造によるレーザーの室温発振の実現(6-8)や、HEMT(High Electron Mobility Transistor)(9)、ヘテロ接合トランジスタというキーデバイスが実現された。そのことにより、光の分野と無線通信の分野で超高周波でのパワー、低雑音、低歪特性等に優れる化合物半導体とシリコンの大容量で複雑な高速信号処理技術の融合技術による新たなアプリケーションの開発が可能となった。それにより応用レベルにおいてのビジネスモデルが急速に現実性を帯びて、実現に向けて集中的な開発が進んだ。その例として CD(コンパクトディスク)や、衛星放送、携帯電話などの応用アプリケーションの実現可能性が急速に高まると共に、急激に開発軌道上を進化してきた。そこに光情報記録によるマルチメディア、インターネットの発展への寄与や携帯電話などの新たなアプリケーションからビジネスが生まれた。これらのアプリケーションが新たな市場において、ユーザーの価値観とコスト意識とのバランスにより受け入れられるか否かが決定される。インターネットや携帯電話、光情報記録等も市場に投入された直後は製品や導入コストも高いうえ、機能も必ずしも十分でなく、急速な普及は期待できなかった。しかし、その利便性や商品サービスとしての魅力が理解され、消費者の価値観が高まると急速に普及が始まり、コストも下がることで加速度的に市場が立ち上がり、最終的にはデファクトスタンダードとなる。このようなサイクルで化合物半導体デバイスを用いたセット商品が売れることにより、シリコン半導体と共に化合物半導体ビジネスも急速に拡大してきた。

2-2-2 化合物半導体におけるイノベーションの事例と社会へのインパクト

これまで化合物半導体デバイスが開発されたことにより、どのような分野や製品に応用され、それらが起こしたイノベーションの事例と社会的なインパクトについて一般論として述べる。図 2-7 に化合物半導体デバイスが用いられている代表的な製品についていくつかの例を示したものである。これらのセットはキーデバイスである化合物半導体レーザーや受光素子、GaAs 系の超高周半導体トランジスタの開発により実現したものである。



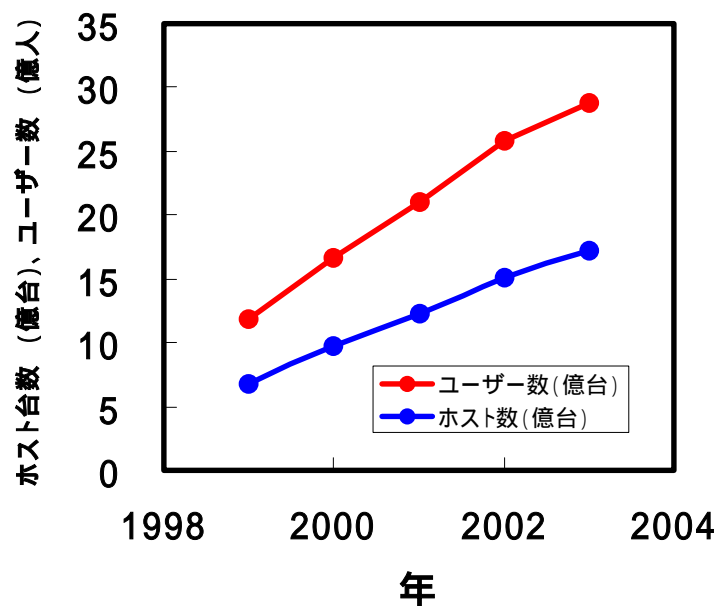
個々の写真を松下電器 ホームページより転載し、図を筆者が作成

図 2-7 化合物半導体デバイスの応用製品

インターネット（IT 革命）

インターネットの歴史は、1969 年に米国の国防総省高等研究計画局（ARPA）が、軍事目的で開始した ARPAnet に起源がある。非常時においても、国内の通信機能が停止しない構造を持った情報通信インフラとしてのネットワーク作りを目指した。

今日、インターネットは世界規模のネットワークとなり、また、接続されているコンピュータの数も非常に大きく拡大してきた。また、ARPAnet の思想は確実に受けつがれ、世界のどこかのコンピュータが停止しても、インターネット全体は動き続けるという非常に強いネットワークとして、今や社会の基盤へと発展した。図 2-8 にインターネットへの接続ホスト台数、ユーザー数の推移を示す。当初の軍事的な目的から、一般的な利用へと拡がり、2003 年には全世界でのインターネットに接続するホスト PC 台数は約 17.2 億台利用者数：28.8 億人にも達している。



下記データ出典を基に筆者が作成

データ出典：International Telecommunication Union, World Telecommunication
Development Report 2004

図 2-8 インターネットへの接続ホスト台数、ユーザー数の推移

インターネットの特徴として以下が挙げられる。

情報の国境が消失

リアルタイムな情報流通 = 瞬時に情報が伝達

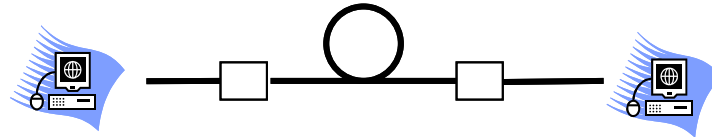
不特定多数がアクセス

膨大な情報量

双方向のコミュニケーション

上記のような特徴を有する情報通信手段を一般の民間人や企業が手にすることにより、生活、社会、ビジネス、政治、経済のあり方を変革したのはいうまでもない。現在ではインターネットの幹線網は光ファイバを用いた光通信より結ばれており、近年ではマルチメディアコンテンツの普及や動画での通信、大容量のデータ通信などの需要も増えており、一般の家庭への接続にもより高速、大容量性が求められるようになりつつある。光ファイバネットワークのサービスが開始され、その利用者数も増加し始めている。図 2-9 にインターネットの光通信システムの基本構成を示す。

コンピュータ 基幹光ファイバ網



レーザー

APD フォトダイオード

光電気変換 IC

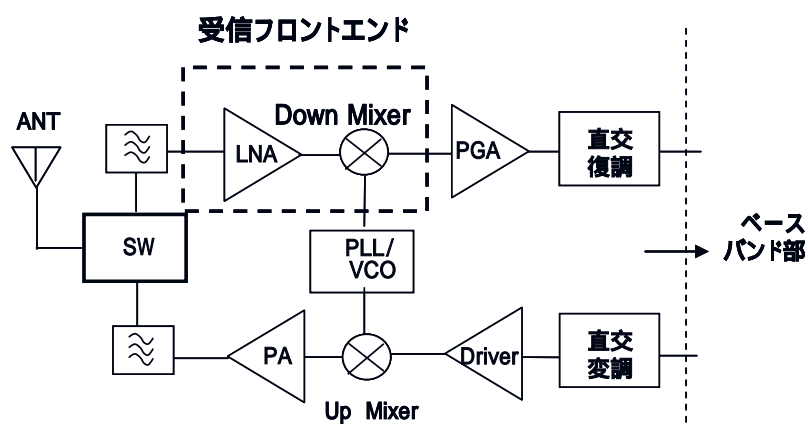
図 2-9 インターネットの光通信システムの基本構成

化合物半導体はインターネットの基礎技術である光通信技術において、光信号のキャリアとなる光を発生する半導体レーザーと受光するフォトダイオード、さらにこれらの素子を高速で信号の変調、復調を行うための行うための光電気信号変換 IC として用いられている。これらの発光デバイスは化合物半導体でしか実現できないもので、高速動作には、受光素子及びレーザー駆動用 IC も化合物を用いることで初めて 10Gbps 以上の高速データ伝送を実現された。

携帯電話（化合物半導体トランジスタ、IC）

移動体通信及び携帯電話の発展の経緯について述べる 9)。有線の固定電話から移動体通信への移行の流れとして、1979 年に日本電信電話公社（現在の NTT）による 800MHz 帯の自動車電話のサービスが開始されたことを契機に、急速に進歩してきた。1982 年には MCA（マルチチャンネル・アクセスシステム）やパーソナル無線の出現により、一般消費者が移動体通信環境を手にすることが可能になった。これらのシステムの出現は通信業界や社会に大きなインパクトを与え、今日の携帯電話につながる起爆剤的な存在として大きな貢献を果たした。しかしながら、MCA は一部の個人事業者の利用であったことやパーソナル無線は使用可能なチャンネル数が少ないことや、利用可能なエリアが小さいなど、インフラ面でも不利な面があり、一般には普及へは向かわなかった。「いつでも」「どこでも」「誰とでも」という要望は高く、技術開発やインフラが敷設され、1987 年にアナログによる「携帯電話」のサービスが実現されるに至った。携帯電話を実現するための技術的課題として、システムの開発とともに携帯ということから端末の小型化、長時間の使用を可能にする低消費電力化が必須であった。これらの課題を解決するため、小型、大容量なニッケル水素電池の技術や LSI の高集積、低消費電力化、周辺部品の小型化、稠密な実装技術開発が進

められた。その中で、携帯電話の高周波部については、パワーアンプは約 1W の電力の送信を行うため大きな電力を消費する部分であり、低消費電力化が利用可能時間の大きな鍵となる。また受信においても 800MHz という高い周波数において携帯端末の小型アンテナでさまざまな位置、環境で安定して、低雑音、高品質な音声を実現する必要があった。この要望を満たすことは従来のシリコントランジスタでは困難であり、電子移動度が大きく、オン電圧が小さく、かつ高耐圧、超高周波動作が可能な化合物半導体を用いることにより課題を解決してきた。



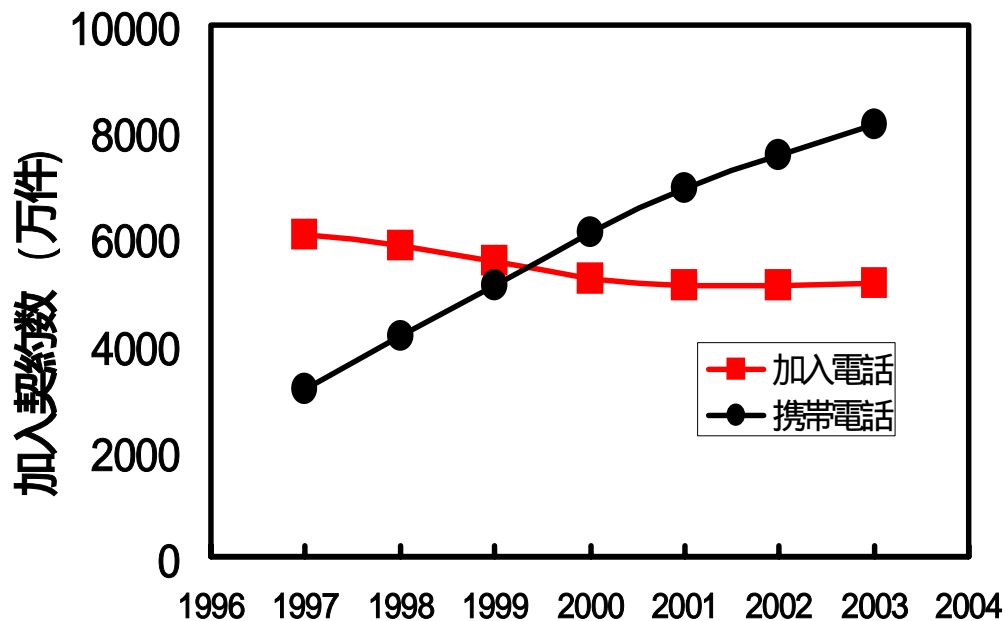
無線送受信部

- ・受信フロントエンド IC
- ・送信アンプモジュール
- ・アンテナスイッチ IC

松下電器社内資料を基に筆者が作成

図 2-10 携帯電話の高周波部の回路ブロック図

図 2-10 に携帯電話の高周波部の回路ブロックを示す。化合物半導体は其中で高周波のパワーアンプ、送受信を切り替えるアンテナスイッチや受信部のフロントエンドのトランジスタや IC として使用されている。



テレコムデータブック 2005(TCA 編)データを基に筆者が作成

図 2-11 加入電話と携帯電話の加入契約者数の推移

その後、首都圏や主要都市を中心に爆発的に利用者が増大し、サービスエリアも拡大し、デジタル方式（PDC）へと移行し、現在では TV 電話に代表される動画の利用が可能な第 3 世代携帯電話に至っている。図 2-11 に加入電話と携帯電話の加入契約者数の推移を示す。

国内携帯電話契約数は 87,435,300 件（平成 17 年 4 月末現在 社団法人電気通信事業者協会（TCA））であり、国民の平均約 7 割が所有している状況にある。すでに日常生活におけるコミュニケーションツール、ビジネスツールとして今や無くてはならない存在になっている。このような携帯電話社会は化合物半導体技術、無くしては、実現し得ないものであった。

衛星放送、通信（超低雑音ヘテロ接合トランジスタ）

化合物半導体により、実現された技術の中で、世界情勢にまで影響を及ぼした技術が衛星放送/通信である（10、11）。衛星通信は従来の音声での無線通信を地球上の異なる地点間で映像情報をリアルタイムでやりとりすることを可能にし、通信インフラの無いような地域や災害地などの、インフラが破壊された場所においても、簡易な仮設中継基地を設置す

ることにより通信を可能にした。また衛星放送の普及により、受信設備を入手することにより、近隣諸国の放送を受信することが可能になり、他国のニュースを映像情報で入手することさえできるようになった。

地球規模の公衆通信網

情報の大衆化、ボーダーレス化

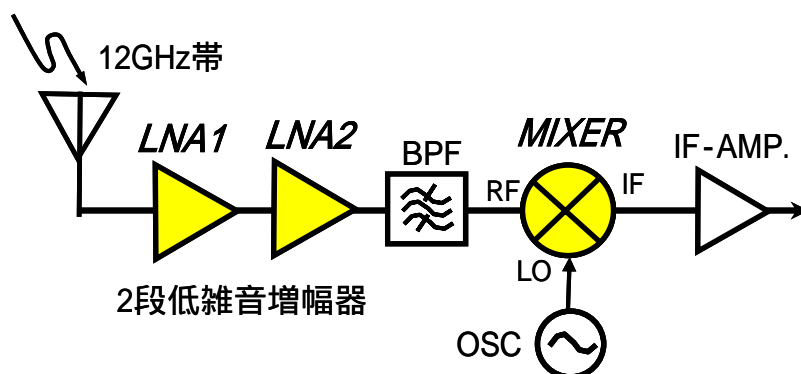
映像メディアの訴求力

衛星放送、通信が影響を及ぼしたと評される国際政治的な出来事

天安門事件、一連の東欧の激変、ベルリンの壁の崩壊、ルーマニアの革命、

ソ連の内部崩壊冷戦の終結、湾岸戦争。

1つの技術が世界情勢、社会構造をも変え得る可能性を秘めているという事例である。



松下電器社内資料よりを基に筆者が作成

図 2-12 衛星放送受信コンバータ部のブロック図

化合物半導体はパラボラアンテナ部に装着されたコンバータ部に使用されている。図 2-12 はコンバータの一般的な回路ブロック構成を示したもので、化合物半導体は 12GHz の衛星からの電波を受信する低雑音増幅器 (LNA1, 2) と低い周波数に変換するための MIXER 部のトランジスタとして用いられている。12GHz 帯で衛星からの微弱な電波を低雑音で増幅することはシリコン半導体では困難であり、大きなパラボラアンテナが必要であった。また化合物半導体を用いた場合であっても、一般家庭でもアンテナの設置が可能なサイズを実現するため、更なる高性能化が要求された。トランジスタの雑音特性を向上させることで、直径 50cm 以下のレベルまでパラボラアンテナの小型化を実現し、一般への衛星放送の普及へ大きな寄与をした。

化合物半導体デバイスの実用化により、これまで述べてきたアプリケーションやシステムが実現され、以下に挙げる効果を伴う、大きなイノベーションがもたらされた。

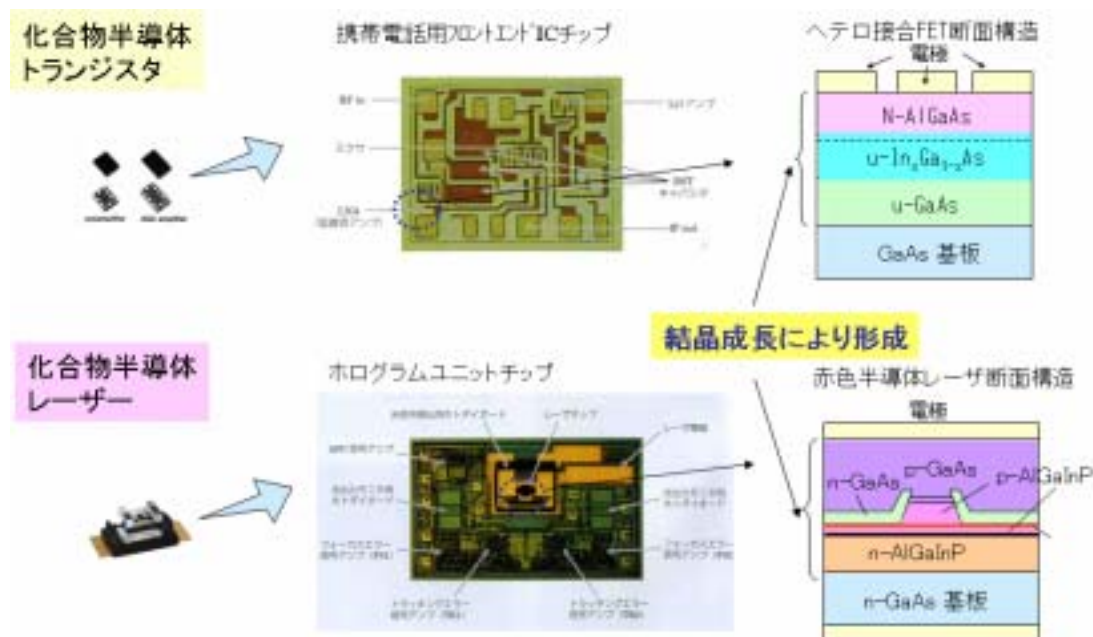
- 1．経済的効果：応用機器、サービスの実現による新たな産業の創出と拡大
- 2．政治的効果：情報通信インフラの発達への寄与、情報のボーダーレス化
- 3．社会的効果：人々の生活に変革(IT化、ユビキタス化)

第2章の参考文献

- 1) W. P. Dumke, Phys. Rev., vol. 127, no.5 pp1559-1563, Sept. 1962.
- 2) R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, And R.O. calson, Phys. Rev. Lett., vol.9, no. 9, pp366-368, Nov. 1962.
- 3) M. I. Nathan, W. P. Dumke, G. Burns, F. H. Dill, Jr., and G. J. l a s h e r , Appl. Phys. Lett., vol.1, no.3, pp62-64, Nov. 1962.
- 4) T. M. Quist, R. H. Rediker, R. J. Keyes, W. E. Krag, B. Lax, A. L. MacWhorter, and H. J. Zeiger, Appl. Phys. Lett., vol. 1, no. 4, pp91-92, Dec. 1962.
- 5) I. Hayashi, M. B. Panish, P. W. Foy, and S. Sumski Appl. Phys. Lett., vol7, no.3, pp109-111, Aug. 1970.
- 6) S. Ymamamoto, H. Hayashi, S. Yano, T. Sakurai, and T. Hijikata, Appl. Phys. Lett., vol.40 , no.5, pp372-374, March . 1982.
- 7) T. Sugino, Itoh, M. Wada, H. Shimizu, and I. Teramoto IEEE J. Quantum Electron., vol.QE-15, no. 8,pp. 155-157, Feb. 1971.
- 8) T. mimura, S. Hiyamizu, T. Fujii and K. Nanbu: Jpn. J. Appl. Physs., 19, L.225 (1980)
- 9) Mtsushita Technical Journal Vol.51 No.3 Jun. 2005
- 10) 徳久勲 「情報が世界を変える：衛星・ボーダレスの時代」 丸善株式会社 (1991)
- 11) 福田益美、平地康剛共著 「化合物半導体の魅力」工業調査会 2003年1月

第3章 化合物半導体に関する基礎的研究

本章では化合物半導体デバイスにおいてキーテクノロジーである結晶成長技術の研究開発とそのデバイス応用について述べる。化合物半導体は異なる種類の原子を組み合わせることで、個々の構成要素である単一原子には無い、新たな物性が発現する。さらに複数の異なる化合物半導体を積層させた構造（ヘテロ接合構造）とすることで、新たな機能を生み出すことができる。化合物半導体の特徴である発光や受光が可能であることや、電子の走行速度が大きいことから超高速高周波での動作が可能であるという特徴を有している。第2章で述べた応用事例の中で、携帯電話の受信部のフロントエンド IC と CD-ROM や DVD などの光ディスク装置でディスクに信号を読み書きするためのホログラムユニットチップに用いられるヘテロ接合 FET 及びレーザー素子の断面図を図 3-1 に示す。これらの素子は GaAs 基板上に結晶成長により形成された化合物半導体からなる多層ヘテロ接合構造からなっている。アプリケーションに応用するには、高性能なデバイスを作製する必要があり、そのためには高純度、高品質の化合物半導体結晶成長技術が不可欠となる。



出典：「高周波・光半導体デバイス」 電子情報通信学会 (1999)

図 3-1 化合物半導体トランジスタとレーザーのデバイス断面構造

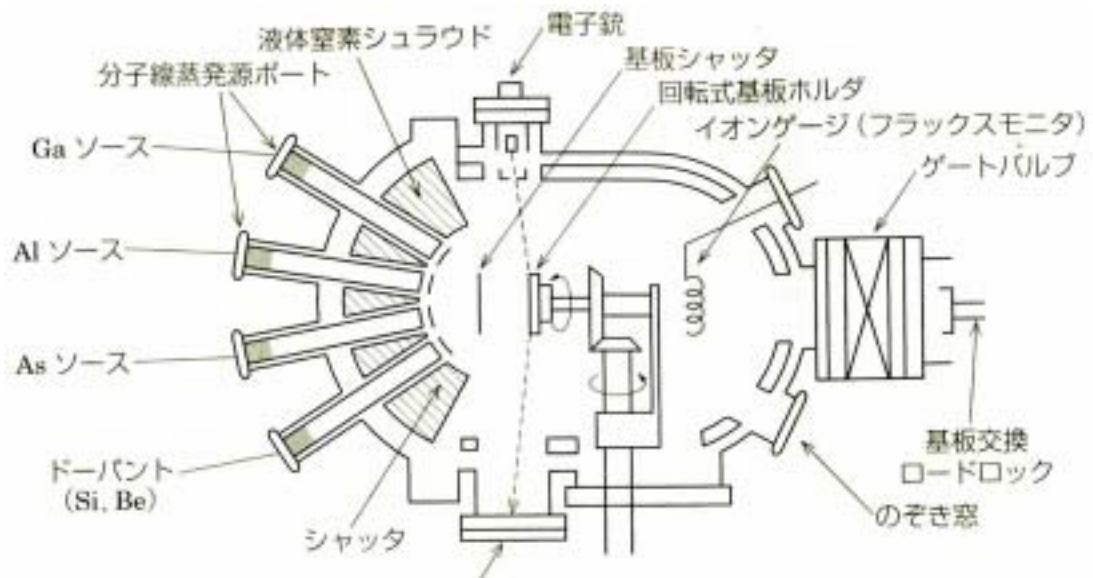
分子線エピタキシャル結晶成長 (MBE) 技術

本章では筆者が行ってきた、電子デバイスへの応用を目指した結晶成長技術の研究開発について述べる。化合物半導体トランジスタは初期の段階では半絶縁性の GaAs 基板にイオン注入法により、活性領域を形成する MESFET (Metal Semiconductor Transistor) が主流であったが、化合物半導体の特徴であるヘテロ接合を形成するには薄膜の結晶成長技術が必要不可欠である。化合物半導体の薄膜成長方法はい大きく分けて2つの方法がある、一つは、TMG (Tetra Methyl Gallium) などの有機金属とアルシニングスなどを用いた有機金属気相エピタキシャル成長法と Ga や As の固体原料を真空中で過熱し、半導体基板上に化合物半導体結晶を成長する分子線エピタキシャル結晶成長技術 (MBE: Molecular Beam Epitaxy) がある。図 3-2 に分子線エピタキシャル結晶成長装置原理図を示す。MOCVD 法は反応状態での蒸気圧の高い P などを含む化合物の形成には気相成長であるため有利で、成長レートを高く出来るため、AlGaInP など P 系を含み、2 μ m 以上の比較的厚い膜を必要とするレーザーの結晶成長に主に用いられてきた。一方、MBE は高蒸気圧材料や厚膜の成長は不得意であるが、 1×10^{-10} torr (1.3×10^{-8} Pa) という超高真空中で高純度の単原子材料を用いて成長を行うため、ノンドープの高純度膜が得られ易く、一般にトータルの積層膜厚が 1 μ m 以下のヘテロ接合トランジスタの研究開発には多用されてきた。また MOCVD に砒素 (As) やリン (P) 材料として用いられるアルシン (AsH_3) やフォスフィン (PH_3) といった危険な半導体ガスをを用いないことから、装置的にも簡便なシステム構成が可能である。このような個々の特徴から、MOCVD は光デバイス、MBE は電子デバイスというすみわけがなされてきた。しかしながら、現在では技術開発により、MOCVD においても、高純度なノンドープ膜が形成可能になったことと、量産性に優れることからエピメーカーなどにおいて生産は MOCVD が大多数を占めている。一方、MBE はシステムが比較的簡便でありことや、取り扱いの簡便さや、フレキシビリティの高さから依然として研究開発の分野では多く用いられている。

以下に MBE の特徴をまとめる。

1. 超高真空中 (10^{-8} Pa) での高純度結晶の成長
2. 急峻なヘテロ界面形成可能
3. 単原子層レベルの膜厚の制御が可能
4. 熱非平衡状態での成長
5. 危険な半導体ガス材料を用いず、システムがシンプル

本研究の化合物半導体ヘテロ接合デバイス構造の形成においては MBE を用いた。



出典：高周波・光半導体デバイスより転載

図 3-2 分子線エピタキシャル結晶成長装置原理図

3-1 化合物半導体結晶の物性に関する新しい考察

3-1-1 N-AlGaAs/InGaAs 選択ドーピングシングル- 及び ダブルヘテロ接合 FET 構造の結晶成長と特性評価 -

背景

化合物半導体高周波電子デバイスは GaAs を材料としたイオン注入技術によるショットキ接合によるゲートを有する MES (Metal Semiconductor Transistor) が一般に用いられてきた。AlGaAs/GaAs 接合を用いた HEMT (High Electron Mobility Transistor) の発明により、電子の走行速度の向上や、電流駆動能力の向上が図られ、高周波デバイス性能を大きく向上させ、応用分野が広がった。さらに GaAs と比較して電子の移動度及び飽和速度が大きく、ヘテロ接合を形成する AlGaAs との伝導帯のバンド不連続が大きいこと、チャネルの電子濃度を高めることが可能であり、性能向上を図ることが可能な InGaAs 混晶をチャネルに用いた Pseudomorphic (格子歪層) ヘテロ構造が提唱された¹⁻³⁾。この構造において、従来の N-AlGaAs/GaAs ヘテロ構造より、高い 2 次元電子ガス濃度と高い飽和速度を実現する可能性が示された⁴⁾。図 3-3 にその基本構造の断面図とバンド構造を示す。しかしながら基板材料である GaAs と InAs とでは約 7 % という大きな格子

不整合があり、その混晶材料である InGaAs に対しても結晶格子定数が異なるため、結晶の歪を制御し、良好なヘテロ接合を作製するための、結晶成長技術が必要となる。表 3-1 に GaAs、AlAs、InAs の移動度と格子定数と GaAs に対する格子格子不整合の割合を示す。本研究では N-AlGaAs/InGaAs 選択ドーピングシングルヘテロ構造 (SD-SH) とダブルヘテロ構造 (SD-DH) 5) について MBE により結晶成長を行い、InGaAs 量子井戸の InAs 組成、AlGaAs バリア層の Al 組成成長温度が電気的特性に及ぼす影響について検討を行った。

表 3-1 GaAs、AlAs、InAs の移動度と格子定数

材料	移動度 (cm^2/Vs)	格子定数 ()	格子不整合 (%)
GaAs	8800	5.654	-
AlAs	1000	5.662	0.14
InAs	33000	6.058	7

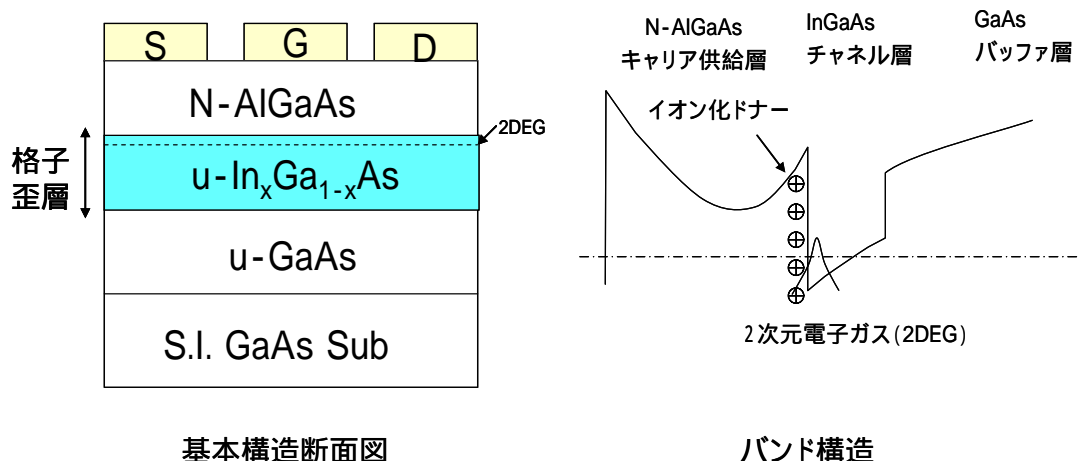


図 3-3 AlGaAs/InGaAs Pseudomorphic (格子歪層) HEMT の断面構造とそのバンド構造

実験

図 3-4 に実験に用いた SD-SH (a) 及び SD-DH (b) の代表的な断面構造を示す。InGaAs 量子井戸の InAs 組成 X_{In} は 0 ~ 0.35、InGaAs ウェル幅 L_z は 100 ~ 500 Å、AlGaAs バリア層の Al 組成 X_{Al} は 0.1 ~ 0.35 まで変化させた。構造は MBE により成長を行い、成長温度は 460 ~ 580 °C とした。キャリア供給層の N-AlGaAs への Si ドーピング量は $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ で、AlGaAs スペース層の膜厚は 20-50 nm を用いた。両構造は半絶縁性 GaAs 基板上に成長を行い、GaAs の成長レートは $1 \mu\text{m/h}$ である。電気的特性の評価はホール測定により、室温及び 77 K における電子移動度 (μ) 及びシートキャリア濃度 (N_s) で行った。

N-GaAs	100Å
N-AlGaAs	500Å
AlGaAs	20Å
In _x Ga _{1-x} As	Lz
GaAs 5000Å	
S.I.	GaAs sub.

SD-SH

N-GaAs	100Å
N-AlGaAs	500Å
AlGaAs	20Å
In _x Ga _{1-x} As	Lz
AlGaAs	50Å
N-AlGaAs	150Å
AlGaAs	2000Å
GaAs	1000Å
S.I.	GaAs sub.

SD-DH

図 3-4 シングルヘテロ (SD-SH) 及びダブルヘテロ (SD-DH)

AlGaAs/InGaAs トランジスタ構造の断面図

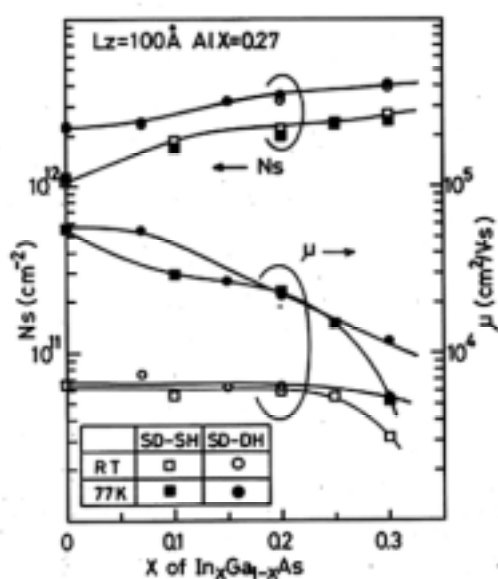


図 3-5 チャンネル In 組成と電子移動度
キャリア濃度との関係

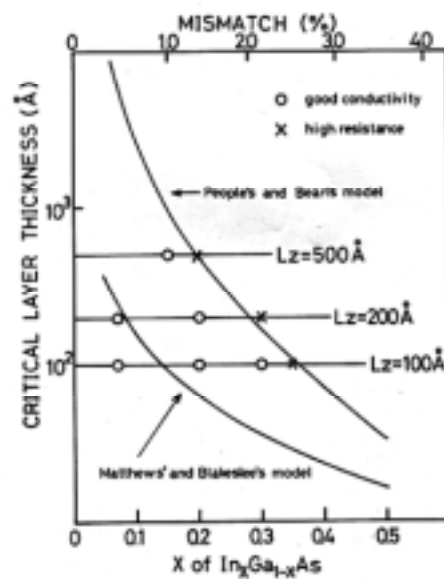


図 3-6 チャンネル In 組成と
臨界膜厚との関係

図 3-5 に SD-SH 構造及び SD-DH 構造について N_s 及び μ の InGaAs 量子井戸の InAs 組成比依存性を示す。InGaAs 量子井戸のウェル幅 L_z は 100 、AlGaAs バリア層の Al 組成は 0.27 とした。得られた最も低い室温におけるシート抵抗は X_{in} が 0.15 ~ 0.2 でそれぞれ、SD-SH で 500 / 、 $N_s=2.2 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 、SD-DH 構造で 290 / 、 $N_s=3.4 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ であった。SD-DH 構造におけるシートキャリア濃度は SD-SH 構造の約 1.5 倍である。しかしながら InAs 組成が 0.3 ~ 0.35 では電気的特性が急激に劣化した。この結果は InGaAs 量子井戸の膜厚が臨界膜厚を越えたためと考えられる。図 3-6 に SD-DH 構造の電気的特性により判断した InGaAs 量子井戸の InAs 組成比と臨界膜厚の関係を示した。また People and Bean の energy balance model 6) 及び Matthews and Blakeslee の mechanical equilibrium model 7) によって計算した臨界膜厚を実線で示した。実験結果は People and Bean による臨界膜厚と良く一致しているという結果が得られた。

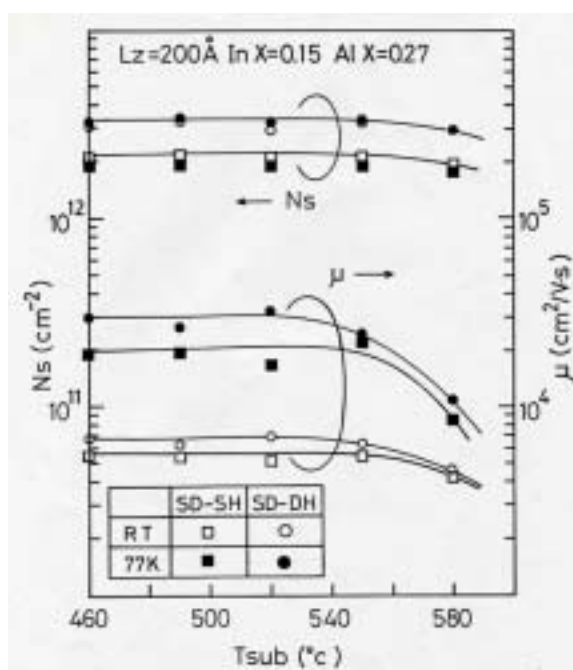


図 3-7 電子移動度とキャリア濃度の成長温度依存性

次にシートキャリア濃度および電子移動度の成長温度依存性について実験を行った。SD-SH 及び SD-DH 共に InGaAs 層の InAs 組成比 X_{in} は 0.15、 L_z は 200 、AlGaAs 層の Al 組成は 0.27 とした。図 3-7 に結果を示す。いずれの構造も成長温度が 460 から 540 の範囲で良好な電気的特性が得られた。540 を超えると急激に電子移動度が低下しており、この原因を究明

するため、フォトルミネッセンスの成長温度依存性について評価した。図 3-8 に結果を示す。520 以上ではフォトルミネッセンス強度が急激に減少し、さらに 580 で成長を行った試料についてはピークの位置が短波長側にシフトしていることがわかる。この結果は高温成長により、結晶性が劣化していることと、In 原子が成長層から再蒸発したためと考えられる。SD-DH 構造については全成長温度領域で SD-SH より、シートキャリア濃度、電子移動度ともに高い値を示している。これは SD-DH 構造が SD-SH 構造より、InGaAs 量子井戸への電子の閉じ込め効果が大いことに起因していることが推測される。

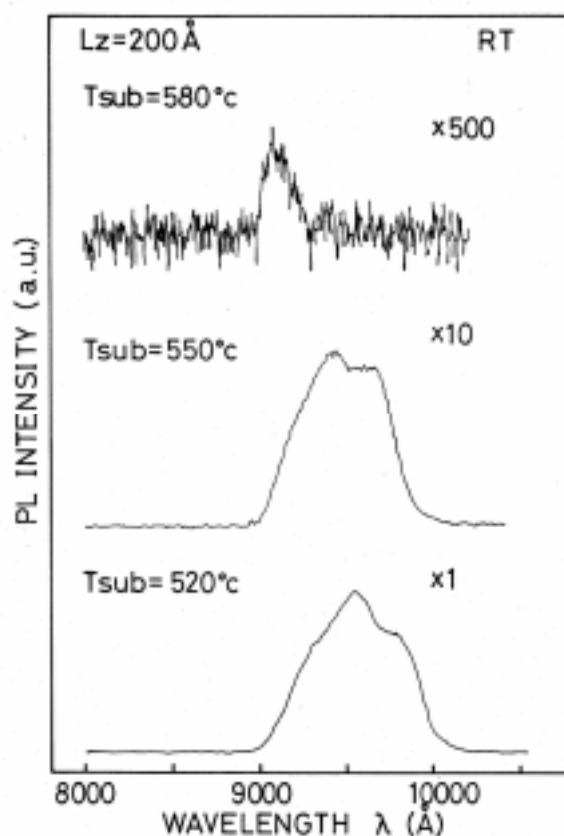


図 3-8 InGaAs 量子井戸構造のフォトルミネッセンスの成長温度依存性

実際、AlGaAs バリア層の AlAs 組成比の低い試料、すなわち InGaAs 量子井戸の深さが浅い試料については、特に SD-SH 構造の場合、その電気的特性は成長温度や AlGaAs の結晶性に大きく依存する傾向があり、概して低い電子移動度を示す。AlAs 組成の効果についてより詳細に検討を行うため、SD-SH 構造について AlGaAs バリア層の Al 組成比を 0.1 ~ 0.35 まで

変化させて、成長を行い、ホール測定により評価を行った。結果を図 3-9 に示す。AlAs 組成が 0.2 以下では μ 及び N_s の値が大きく低下しており、また値のばらつきも大きい。この現象は低 AlAs 組成により、低移動度の N-AlGaAs 層での平行コンダクションが起こっているためと考えられる。これらの結果より、AlGaAs 層での平行コンダクションを抑制し、高いシートキャリア濃度と高電子移動度特性を得るには AlAs 組成は 0.2 が適していると考えられる。

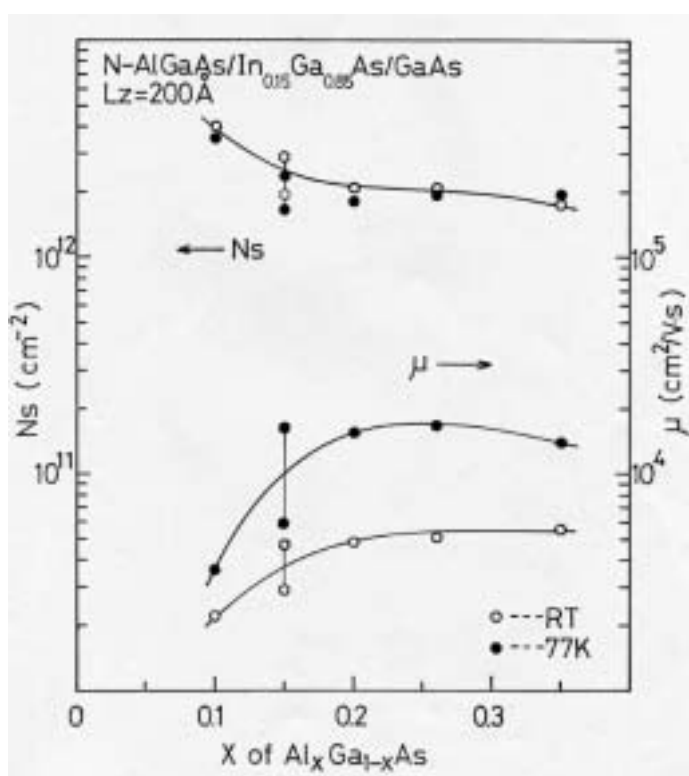


図 3-9 AlGaAs の Al 組成と電子移動度とキャリア濃度との関係

これらの結果を基に、ゲート長 $0.35 \mu\text{m}$ の新構造 InGaAs 歪層構造 SD-DH FET を作製した。図 3-10 に新構造 InGaAs 歪層 SD-DH FET 構造の断面図を示す。

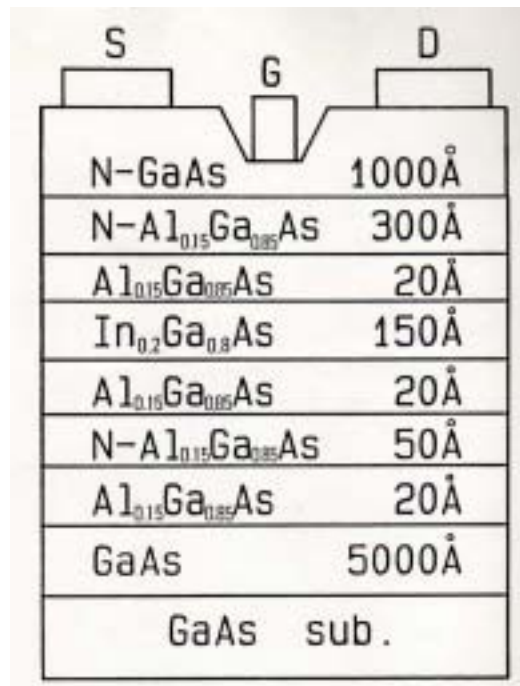


図 3-10 InGaAs 歪層 SD-DH FET 構造の断面図

図 3-11 に InGaAs 歪層 SD-DH FE のドレイン電流 I_{DS} 及び相互コンダクタンス g_m のゲート電圧 V_{gs} 依存性を示す。室温において最大相互コンダクタンス 835 mS/mm 及び K 値として 698 mA/V^2 の良好な FET 特性が得られた。またゲート幅 1 mm あたり、 600 mA/mm 以上の非常に高いドレイン電流を得られ、このデバイスが電流駆動能力に優れ、高周波パワー応用へ有望であることを示した。8-9)

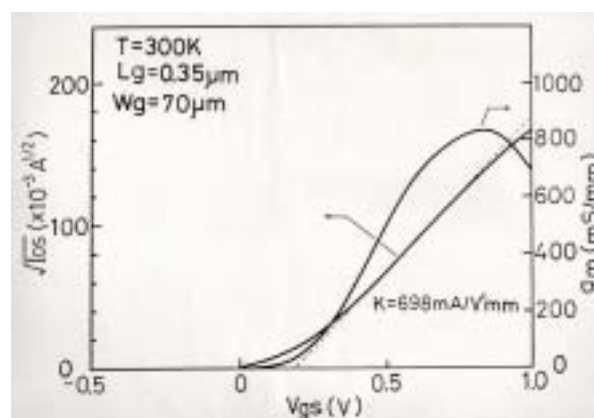


図 3-11 ドレイン電流 I_{DS} 及び相互コンダクタンス g_m のゲート電圧 V_{gs} 依存性

3-1-2 - 12GHz 帯低雑音トランジスタへの応用 -

InGaAs 歪層をチャネルに用いた Pseudomorphic HEMT (以下 P-HEMT と略す) 構造は電子の飽和速度が大きく、2 次元電子ガスの電子濃度が大きいことから、FET の微細化により、電流利得遮断周波数(f_t)が大きく、超高周波帯での雑音特性に優れることが期待される。衛星放送においては超高周波動作と低雑音性が求められることから、低雑音アンプへの応用検討を行った。高周波動作のためには電子の走行速度の高い材料系を用いること、トランジスタのゲート長を短縮することによるチャネル走行時間の短縮と寄生容量の低減、及びソース抵抗の低減が重要となる。しかしながら、従来の波長 365 nm の i 線リソグラフィではゲート長に求められるサブクォーターミクロンのレジストパターン形成は困難であった。そのためゲート部に絶縁膜 (SiN 膜) を形成し、そこに微細な開口を形成し、さらに SiN/SiO₂ 膜を堆積、エッチバックすることにより、開口幅を狭め、ゲート金属を埋め込むことにより、ゲート長 0.25 μm 以下のゲート形成が可能な多重堆積法 (10, 11) を用いた。図 3-12 に P-HEMT の断面構造を示す。図 3-13 は低雑音 P-HEMT のチップ写真であり、図 3-14 はそのパッケージ写真である。多重堆積法によるゲート形成用いることでゲート長 0.2 μm 以下、ゲート幅 160 μm の FET を試作した。またソース抵抗を低減し、雑音特性を向上させるため、ゲート電極をソース側に接近させ、ゲート・ソース電極間とゲート・ドレイン間距離を非対称としたオフセットゲート構造を用いた。図に示すように、ゲート・ソース間耐圧 BV_{gs} は 2.5V、ゲート・ドレイン耐圧 BV_{gd} は約 6V と非対称構造の効果が現れている。図 3-16 に P-HEMT の I-V 特性を示す。ショートチャネル効果のため、ドレインコンダクタンスが大きくとピンチオフ特性がやや劣化している。図 3-17 に相互コンダクタンスとドレイン電流のゲート電圧依存性を示す。最大相互コンダクタンスとして 650 mS/mm の良好な値が得られた。衛星放送で用いられている 12 GHz における雑音指数と付随利得のドレイン電流依存性を図 3-18 に示す。ドレイン電流が 16 mA の時に最小雑音指数 $NF = 0.54 \text{ dB}$ 、付随利得 11.4 dB の当時、世界最高性能の低雑音特性を実現した。(12)

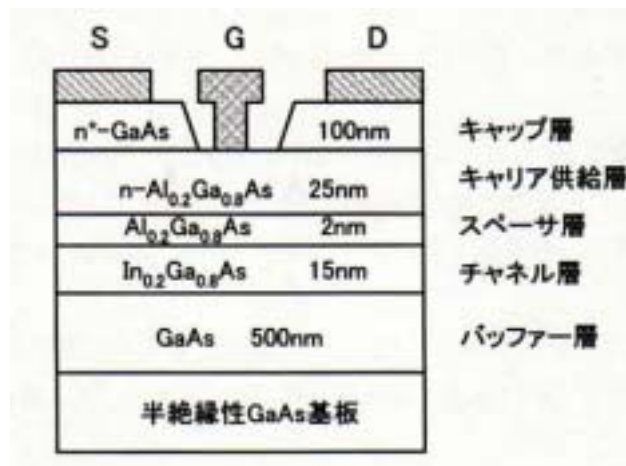


図 3-12 低雑音 P- HEMT の断面構造

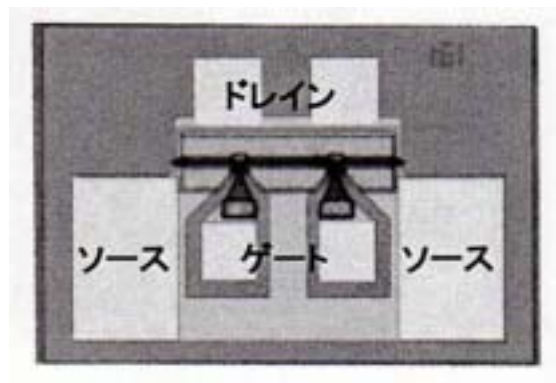


図 3-13 低雑音 P-HEMT のチップ写真 (CHIP SIZE : 0.4mmx0.5mm)



図 3-14 低雑音 P-HEMT のパッケージ写真

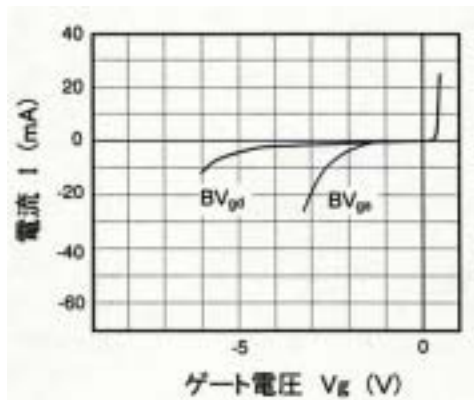


図 3-15 ゲート・ソース間耐圧 BV_{gs} 、
ゲート・ドレイン間耐圧 BV_{gd} の
ゲート電圧 V_{gs} 依存性

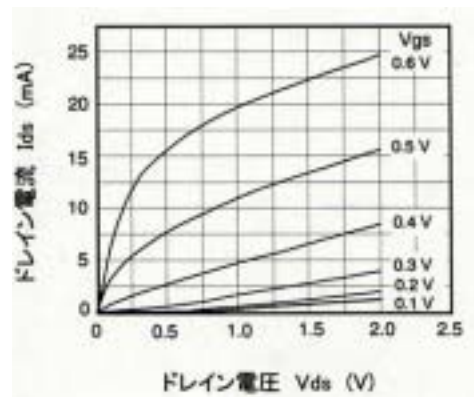


図 3-16 I-V 特性

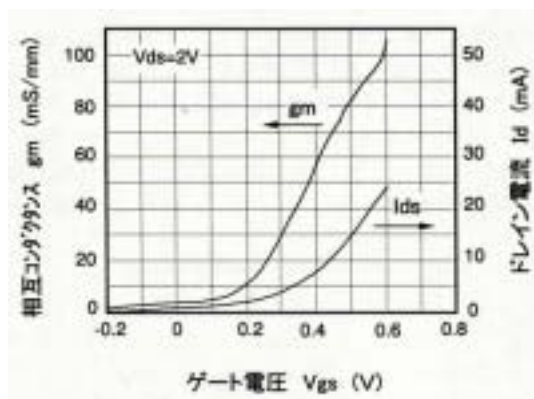


図 3-17 ドレイン電流 I_d と相互コンダクタンスのゲート電圧 V_{gs} 依存性

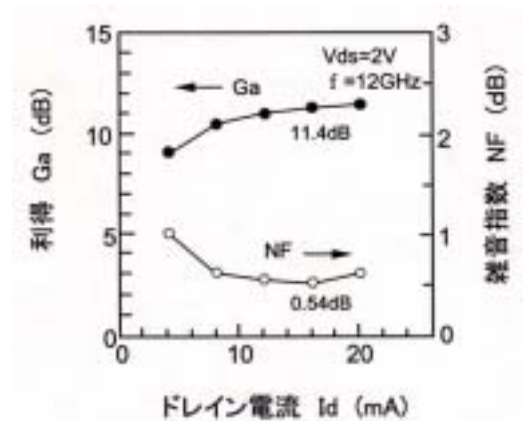


図 3-18 低雑音 P-HEMT の 12 GHz に
おける雑音指数及び付随利得の
ドレイン電流依存性特性

第3章 3-1 の参考文献

- 1) W.T. Masselink, J. Klem, T. Henderson, A. Ketterson, J.S. Gedmyinm and H. Morkoc, IEDM Tech. Digest p.755, 1985.
- 2) T. Henderson, M. I. Aksun, C. K. Peng, H. Morkoc, P.C. Chao, P. M. Smith, K. H. G. Duh and L. F. Lester, IEDM Tech. Digest p.464, 1986.
- 3) A. Okamoto, H. Toyoshima and K. Ohata, Proc. 13th Int. Symp. on GaAs and Related

- Compounds, LasvegasNV, Inst. Phys. Conf. Ser. 83, Ed. W. T. Lindley (Inst. Phys., London-Bristol) p.569, 1986.
- 4) T. S. Henderson, W. T. Masselink, W. Kopp and H. Morkoc, IEEE Electron Device Letters EDL-7 p.288, 1986.
 - 5) K. Inoue, K. Nishii, T. Matsuno and T. Onuma, IEDM Tech. Digest, p.422, 1987.
 - 6) R. People and J. C. Bean, Appl. Phys. Letters 47, p.322, 1985.
 - 7) J. W. Matthews and A. E. Blakeslee, J. Crystal Growth 27, p.118, 1974.
 - 8) K. Nishi, T. Matsuno, O. Ishikawa, H. Yagita, and K. Inoue, Extended Abstract of SSDM, S-3A-14, pp.543-546, 1988
 - 9) K. Nishi, T. Matsuno, O. Ishikawa, H. Yagita, and K. Inoue, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.27, No.11, pp.L2216-pp.2218, 1988.
 - 10) 西井勝則、反保敏治、上野山雄、小沼毅、第 45 回応用物理学会学術講演会(岡山大学) 講演予稿集、14p-J-15、p.558 1984 .
 - 11) 西井勝則、反保敏治、上野山雄、井上薫、小沼毅、第 32 回応用物理学会学術講演会(青山学院大学) 講演予稿集、31p-X-12、p.647 1985 .
 - 12) 西井勝則、池田義人、松野年伸、東千夏、石川修、井上薫、電子情報通信学会 信学技報、ECT-89-1、1988 .

3-2 新しいヘテロ接合結晶成長技術の開発

歪層及び歪緩和層 InAlAs/InGaAs HEMT 構造における 2 次元電子ガスの移動度

1 . 背景

情報通信技術の高度化に伴い、より大容量、高速の通信を行うため、使用周波数も高くなり、さらに超高速、超高周波で動作可能なデバイスが求められてきた。図 3-19 に情報通信の高度化に伴う超高速、高周波ヘテロ接合 FET に用いられる材料系の変化を示す。GaAs をチャンネル層とした最も基本的な AlGaAs/GaAs ヘテロ構造に対し、InGaAs 歪層ヘテロ FET 構造では InGaAs チャンネルの In の組成を大きくすることで電子の飽和速度の向上、および電子濃度の向上が期待できるが、同時に物理的な格子歪も大きくなり、臨界点を超えると結晶が緩和し、逆に特性が劣化する。通常 GaAs 基板上に形成した歪チャンネル層として形成可能な InGaAs 層で In 組成は 0.3 程度である。InP 基板を用いることで、InP に格子整合した 0.53 という高い In 組成を有する InGaAs 層が可能である。さらに歪系とすることで、0.7 程度まで高めることが可能となる。このような 0.53 以上の In 組成を有する InGaAs 層を用いて InAlAs/InGaAs ヘテロ構造を形成することができる。このヘテロ構造は

InGaAs と InAlAs のコンションバンド側のバンド不連続量が約 0.52eV と大きく、2 次元電子ガスの高濃度化が可能である。また InAs 組成の向上により、電子移動度が $10000\text{cm}^2/\text{Vs}$ と大きく、電子飽和速度が $3 \times 10^7 \text{cm/s}$ と大きいいため高速動作が期待される。



図 3-19 ヘテロ接合 FET に用いられる材料系

しかしながら、InP は GaAs 基板と比較して、壊れやすく、価格が高いという課題がある。この InAs 組成の InAlAs/InGaAs 系を GaAs 基板上で基板の格子定数に依存せず形成できれば、デバイス性能の向上やデバイス設計の自由度が飛躍的に高くなり、例えばレーザーの発振波長の拡張や OEIC (光電子集積回路) などへの応用が期待できる。しかしながら、GaAs と InAs の格子定数差は 7 % あり、InP に格子整合する InAs 組成比 53% の InAlAs/InGaAs 系でも約 4 % と大きい。この問題を解決する手段として、膜厚と共に一定の変化量で In 組成が増加するグレーディッドバッファ層 (以下 GBL と略す) を用いた格子緩和技術により、任意の InAs 組成の格子緩和層 InAlAs/InGaAs ヘテロ接合 FET 構造を実現した。1-3) InAlAs/InGaAs ヘテロ接合 FET 構造において格子歪層構造と格子緩和層構造について歪の観点から解析を行い、格子歪と電気的特性の違いについて解析、考察を行った。

2. MBE による結晶成長

図 3-20 に実験に用いた試料の断面構造を示す。半絶縁性 GaAs 基板上に InAs 組成を基板側で 0 (GaAs) から表面側で所望の値となるように膜厚に対して直線的に増加させた $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 、または $\text{In}_y(\text{Ga}_z\text{Al}_{1-z})_{1-y}\text{As}$ GBL を成長した後互いに格子整合する InAlAs バッファ層 2000 、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ チャネル層 1000 、InAlAs スペース層 30 、N-InAlAs キャリア供給層 300 からなる HEMT 構造を順次成長した。この HEMT 構造について電子移動度を結晶性の評価基準として InGaAs GBL の成長温度と InAs 組成変化率などの最適化を図った。

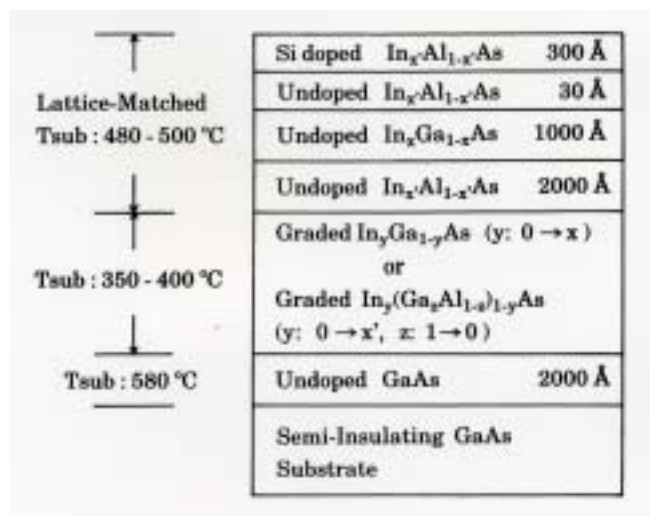


図 3-20 格子歪緩和層ヘテロ接合トランジスタ構造

(1) InAs 組成変化率依存性

図 3-21 に InGaAs GBL の InAs 組成変化率に対する電子移動度の依存性を示した。変化率は InAs を 1% 増加させるのに用いた膜厚 $1/g$ () で表した。InGaAs の InAs 組成 x は 0.53 で成長温度は 420 と固定した。 $1/g=0$ については 9000 の InGaAs を直接成長した。この結果より、高移動度を得るためには GBL の膜厚を 1% 当たり 200 以上、即ち InAs 組成変化率を 50%/μm 以下とする必要があることがわかった。

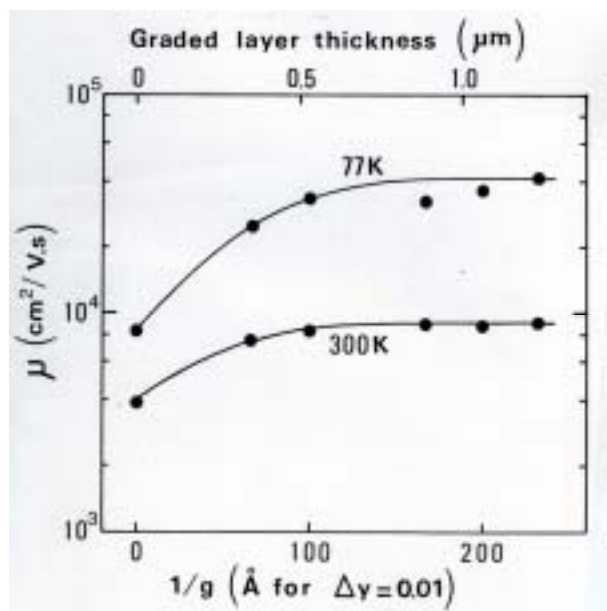


図 3-21 InGaAs GBL の InAs 組成変化率に対する電子移動度の依存性

(2) 成長温度依存性

図 3-22 に成長温度依存性に対する電子移動度の依存性を示す。GBL の膜厚は 9000 Å、 $x = 0.53$ とした。この結果より、成長温度を 400 °C 前後とすることにより、高電子移動度が得られた。

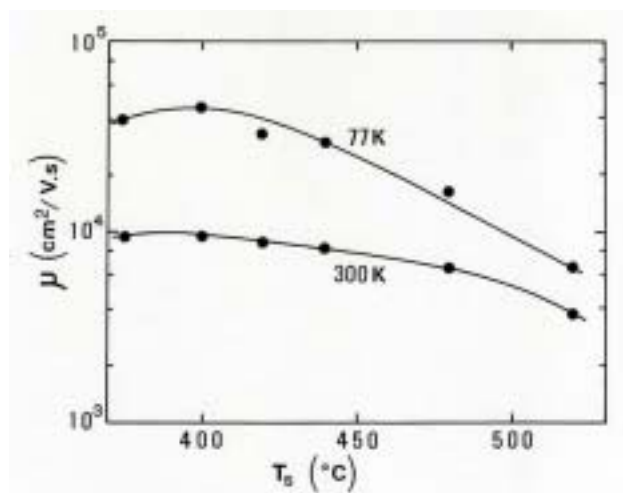


図 3-22 成長温度依存性に対する電子移動度の依存性

(3) 表面モホロジー

図 3-23 はバッファ層の成長条件を変えて成長した試料の表面モホロジーを比較したものである。InGaAs バッファの膜厚は全て 9000 Å とした。(a)は 420 °C で直接成長を行なったもの、(b)、(c)は GBL とした試料で (b)は 420 °C で直接成長を行なったもの、(c)は 520 °C した結果である。(a)は荒れた表面状態を示しており、(c)は高温成長による 3 次元成長と思われるパターンが現れており、肉眼でも白濁した表面が観察された。(b)は<110>方向に平行、及び直交する方向に線状のパターン（クロスハッチパターン）が現れており、表面もミラーライクであり、この表面状態と高電子移動度が対応していることがわかった。

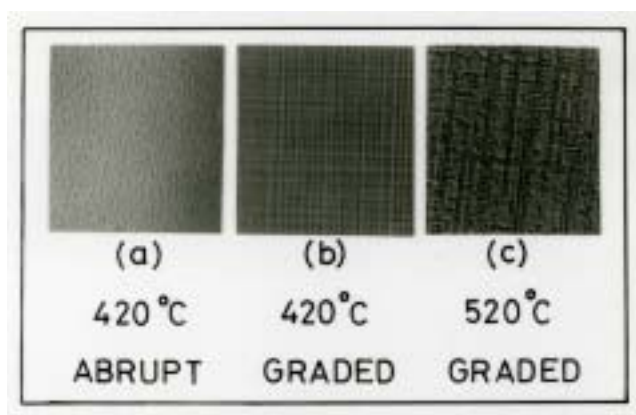


図 3-23 成長温度と表面モホロジー

(4) 断面 TEM 像

図 3-24 に試料の断面 TEM 像を示す。GBL 内には格子不整合に起因する欠陥が多数見られるが、これらの欠陥はほぼ完全に GBL 内に閉じ込められており、InGaAs チャンネル層内には貫通転位はほとんど見られなかった。以上の結果より、高電子移動度を得るには InGaAs GBL の InAs 組成変化率を $50\%/ \mu\text{m}$ 以下とし、400 前後の低温成長が重要であることを明らかにした。

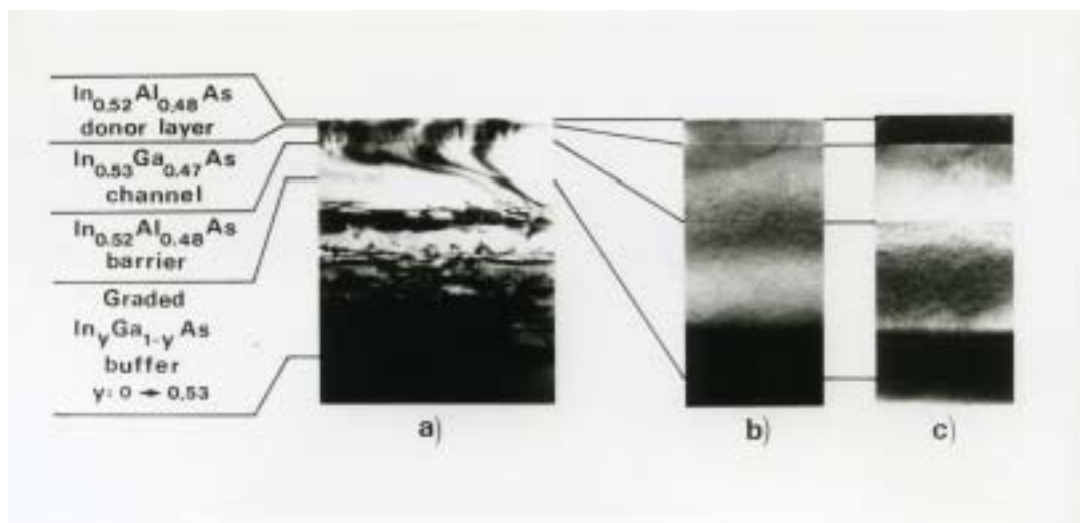


図 3-24 格子歪緩和層ヘテロ接合トランジスタ構造の断面 TEM 像

3 . 電気的特性の InAs 組成依存性

2 . で得られた GBL の成長条件を用いて、InAs 組成を 0.2 から 1.0 まで変化させて図 3-20 に示す HEMT 構造を成長した。また同時に InP 基板上にも InAlAs GBL を用いて同様の HEMT 構造を成長し、比較した。成長温度についてはノンドープ GaAs は 580 で成長を開始し、成長中に降温し、350 ~ 400 で GBL を成長した。HEMT 構造は結晶性を高めるため、GBL 成長後に成長を中断し、InP に格子整合する HEMT 構造で通常用いられる 480 ~ 500 まで昇温し、HEMT 構造を成長した。図 3-25 に InAs 組成に対する電子移動度と電子濃度の関係を示す。図中で PM1、PM2 で示した点は InAs 組成が 1.0 に近づくと InGaAs も InAlAs もともに InAs に近づき、2 次元電子ガスの閉じ込めに十分なバンド不連続の値が得られなくなるため、InAlAs の AlAs 組成を大きくした InAlAs 層を歪スペーサー層、及びキャリア供給層に用いたものである。InAs 組成 x' はそれぞれ PM では $x' = 0.7$ 、PM2 では $x' = 0.8$ とした。InAs 組成の増加とともに電子移動度 μ は室温では単調に増加しており、77K では $x=0.3$ 付近で極小となるような傾向が見られた。InAs 組成が 0.53 ではシートキャリア濃度 $N_s = 1 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ で $\mu = 10500 \text{cm}^2/\text{Vs}$ (300K)、 $51000 \text{cm}^2/\text{Vs}$ (77K) と InP 基板に格子整合した構造

とほぼ同等の高電子移動度が GaAs 上に形成した InGaAs/InAlAs HEMT 構造で得られた。さらに $x=0.8$ では $118000\text{cm}^2/\text{Vs}$ (77K)、また $x=1.0$ (InAs) では 7% という大きな格子不整合にもかかわらず、約 $20000\text{cm}^2/\text{Vs}$ (300K) という高移動度が得られた。

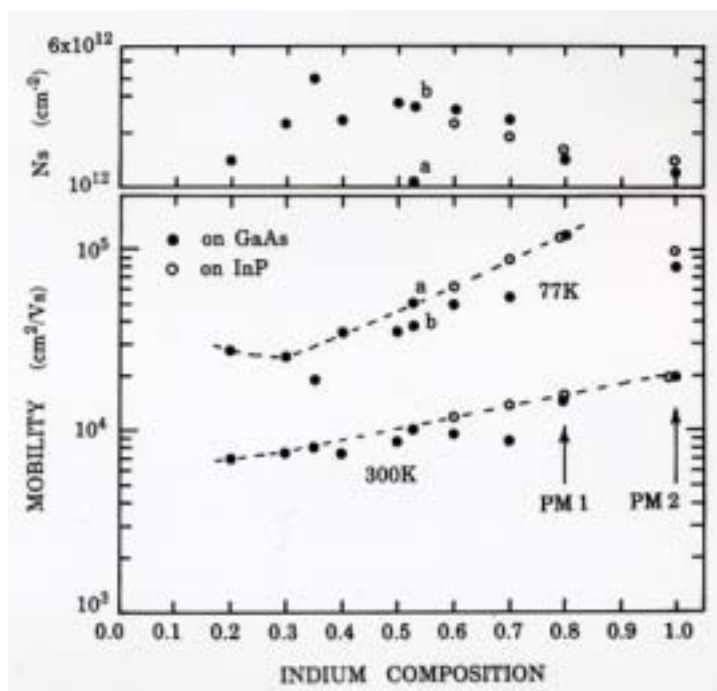


図 3-25 格子歪緩和層ヘテロ接合トランジスタ構造の
チャンネル In 組成と電子移動度とキャリア濃度との関係

次に 77K において各散乱因子を考慮して、電子移動度の計算を行ない、実験結果との比較を行なった結果を図 3-26 に示す。図中の AL はアロイ散乱、II はイオン化不純物散乱、P0 は有局性光学フォノン散乱、DP は音響フォノン変形ポテンシャル散乱、PZ は音響フォノンピエゾ散乱による電子移動度を各々表している。77K においてはアロイ散乱が支配的であり、計算結果と実験結果との間で良好な一致が見られた。

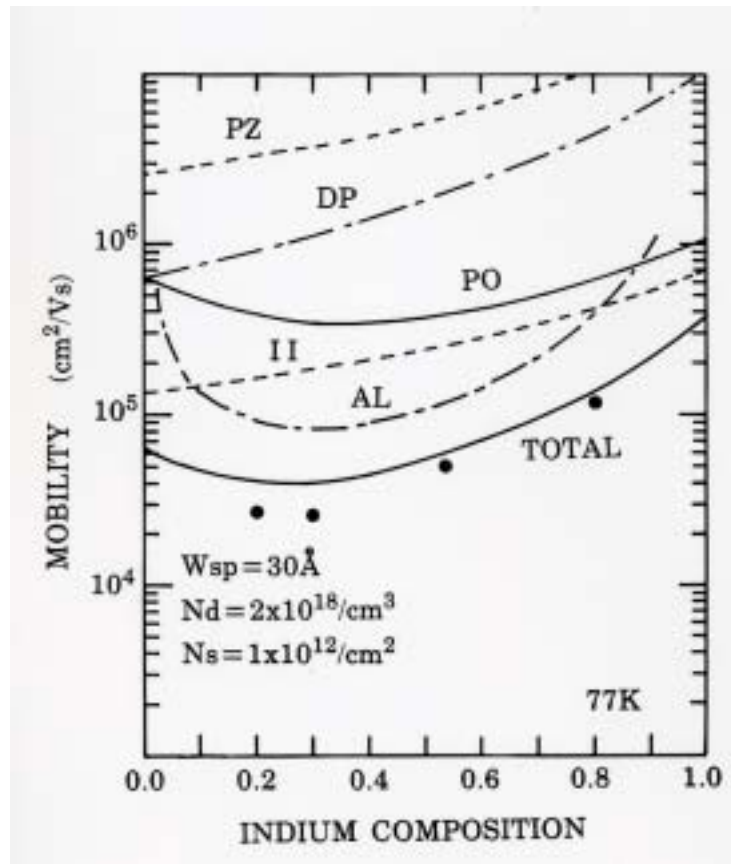


図 3-26 格子歪緩和層ヘテロ接合トランジスタ構造の電子移動度の計算

4．残留キャリアの低減

HEMT 構造の N-InAlAs キャリア供給層の Si ドーピング量を変化させてホール測定を行なった結果、Si ドーピング量を減少させているにもかかわらず、シートキャリア濃度の減少は緩やかであり、全くドーピングを行なわない状態でも $1 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ の高い残留キャリア濃度を示した。この現象は FET を作製する際にリーク電流や素子分離不良等の問題となる。この原因についてバンドギャップの小さい InGaAs をバッファに用いたためと考えられ、さらにバンドギャップの大きな InGaAlAs を GBL として用い、同様に Si ドーピング量依存性について調べた。図 3-27 に Si ドーピング量に対応する Si の温度とシートキャリア濃度の関係を示す。

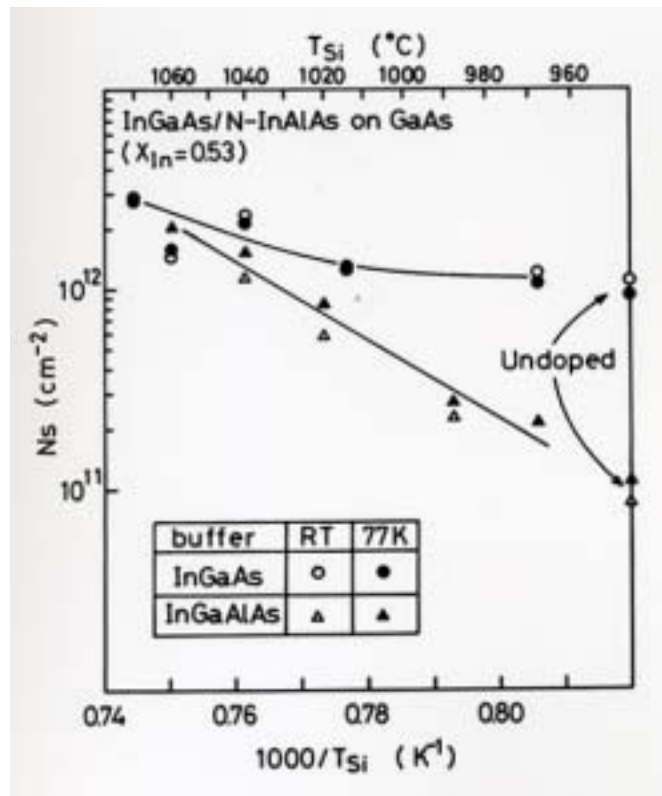
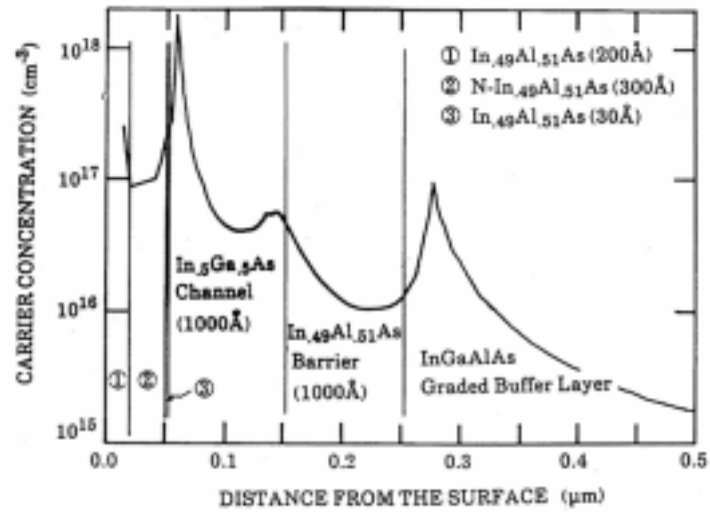


図 3-27 Si ドーピング量に対応する Si の温度とシートキャリア濃度の関係

InGaAlAs を GBL に用いた場合、Si ドーピング量の減少とともに指数関数的に減少し、ノンドープで $8.6 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ と InGaAs GBL の場合と比較し、約一桁低減された。次に InGaAs GBL と InGaAlAs GBL における HEMT 構造内のキャリア分布の違いを調べるため、n 型 GaAs 基板上に InAs 組成 0.5 の HEMT 構造を成長し、C-V 法により測定した。

図 3-28 に各々の GBL を用いた場合のキャリアプロファイルを示す。InGaAs GBL の場合はチャネルの 2 次元電子ガスの他に GBL と InAlAs バッファ界面に 2 次元的にピーク値で $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ の高濃度のキャリアが存在している。それに対して InGaAlAs GBL を用いた場合には界面からやや GBL 内部にピークが見られるが、InGaAs GBL の場合と比較して約一桁、残留キャリアが低減されている。これらのことにより、GBL にバンドギャップの大きな InGaAlAs を用いることは残留キャリアの低減に有効であることがわかった。

(a) InGaAlAs グレーティッドバッファ層



(b) InGaAs グレーティッドバッファ層

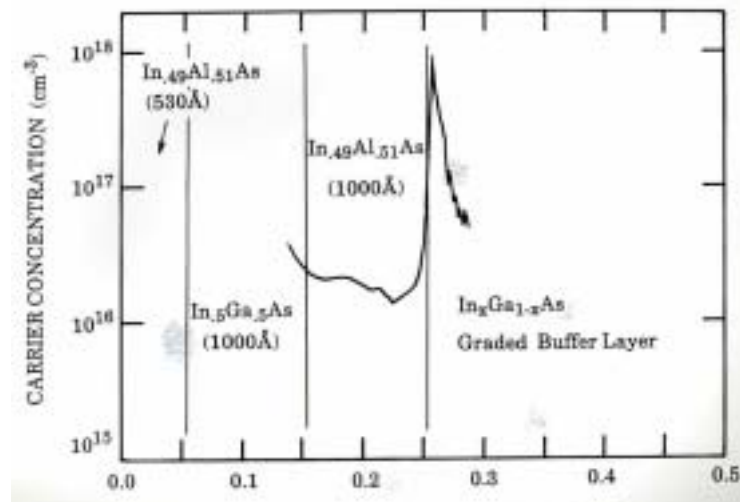


図 3-28 に InGaAlAs GBL(a) 及び InGaAs GBL(b)を用いた場合の
格子歪緩和層ヘテロ接合トランジスタ構造におけるキャリアプロファイル

5 . FET の作製

成長したエピ基板を用いて図 3-29 に示す FET を作製した。チャネル層の InAs 組成は 0.5 とし、GBL には GaAs から $\text{In}_{0.49}\text{Al}_{0.51}\text{As}$ まで変化する厚さ $1\mu\text{m}$ の InGaAlAs を用いた。表面の n-InGaAs 層は低抵抗のオーミックコンタクトを得るために Si を高濃度にドーピングしたキャップ層で、ドーピング量は $5\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ である。キャップ層とキャリア供給層の間の InAlAs 層はゲートのショットキー障壁を高めるためのバリア層で、ゲート電極はキャップ層を除去した後にこのバリア層上に形成するリセス構造とした。ゲート電極には Ti/Pt/Au、オーミック電極には通常の GaAs 系でよく用いられる AuGe/Ni/Au に換えて Ge と Au を単独で形成する Ge/Au/Ni/Ti/Au を使い、400 で 5 分間シンターすることにより、良好なオーミックコンタクトの形成が可能となった。

図 3-30 にゲート長 $0.5\mu\text{m}$ 、ゲート幅 $80\mu\text{m}$ の FET の DC 特性を示す。

(a) はショットキー特性及び素子分離特性を示したもので、素子間のリーク電流は $100\mu\text{m}$ 離れた FET 巻のオーミック電極に 10V 印加した時にも $1\mu\text{A}$ と小さく、ショットキーの逆方向の耐圧も -2.5V で $1\mu\text{A}$ 以下と良好であった。(b) はゲート電圧を 0 から -1.2V まで変化させたときの I-V 特性で、 410mS/mm の高 gm が得られた。

S		D
n-In _{0.5} Ga _{0.5} As	G	100Å
In _{0.49} Al _{0.51} As		100Å
N-In _{0.49} Al _{0.51} As		100Å
In _{0.49} Al _{0.51} As		30Å
In _{0.5} Ga _{0.5} As		800Å
In _{0.49} Al _{0.51} As		1000Å
Graded In _y (Ga _z Al _{1-z}) _{1-y} As (y: 0 → 0.49, z: 1 → 0)		
1μm		
GaAs		
2000Å		
Semi-Insulating GaAs Substrate		

Nd = $5\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$
Nd = $5\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$

図 3-29 格子歪緩和層ヘテロ接合トランジスタの断面構造

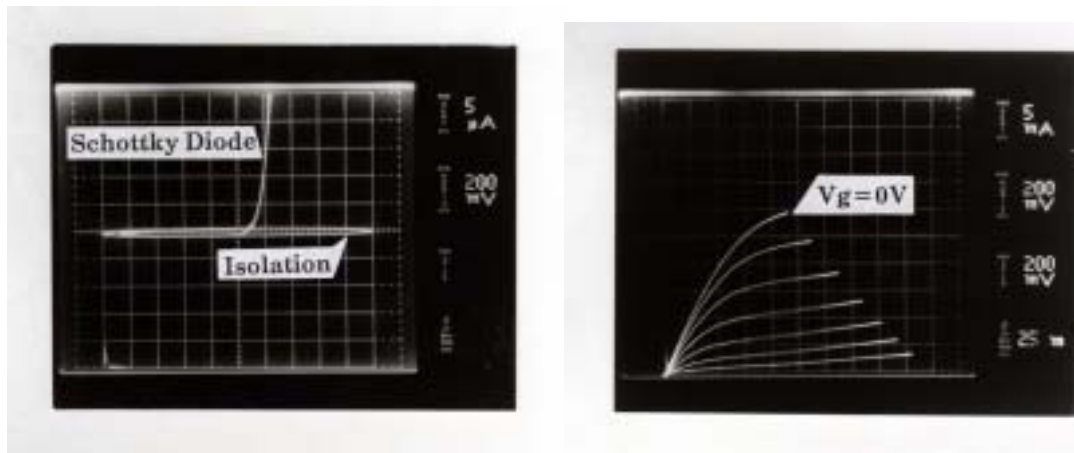


図 3-30 格子歪緩和層ヘテロ接合トランジスタ構造

低温成長 GBL を用い、成長条件を最適化することにより、室温において $10000\text{cm}^2/\text{Vs}$ 以上の InGaAs/InAlAs HEMT 構造を実現した。この技術を用いて従来の歪層 HEMT 構造 (PM 構造) 及び格子歪緩和層 HEMT 構造についてその電子移動度について比較を行なった。

実験

図 3-31(a)及び(b)に実験に用いた歪層 HEMT 構造 (PM 構造) 及び格子歪緩和層 HEMT 構造の断面構造を示す。両構造は (100) の半絶縁性の InP 基板上に MBE 法により結晶成長を行なった。格子歪緩和 HEMT 構造においては InP に格子整合する In 組成が 0.52 の膜厚 d_1 の InAlAs バッファを形成後、InAlAs GBL を成長度 350 ~ 400 で成長した。InAlAs GBL の成長レートは膜厚 d_2 に対する In 組成 y 変化率が $0.5/\mu\text{m}$ 以下となるような条件とし、また $d_1 + d_2$ は $0.8\mu\text{m}$ とした。歪層 HEMT 構造については最初から 480 ~ 500 の一定の温度で成長を行なったのに対し、InAlAs GBL を成長後に成長を中断し、成長温度を 480 ~ 500 へと昇温し、InAlAs GBL 上に 2000 の InAlAs バッファ層を形成した。

これらの構造についてチャネルの InGaAs 層の InAs 組成 X_{In} を 0.53 から 0.8 まで変化させて成長を行なった。チャネル層の膜厚は歪層構造では 300 、歪緩和構造では 1000 とした。ここで Force Balance モデルにより InGaAs の臨界膜厚を見積もると、 $X_{\text{In}} = 0.65$ で 300 となり、本実験における歪層構造 X_{In} が 0.65 以下の範囲においては歪に起因する電子移動度の劣化は殆どないと考えられる。30 の InAlAs スペース層、300 の $2.5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ に Si ドープした InAlAs 層を形成した。歪緩和層構造については GBL 上の各層は $X_{\text{In}} = 0.8$ を除いて、相互に格子整合した構成となっている。例えば InAlAs の InAs 組成 y は $X_{\text{In}} = 0.53$ に対して $y = 0.52$ 、 $X_{\text{In}} = 0.65$ に対して $y = 0.64$ である。 $X_{\text{In}} = 0.8$ についてはチャネルへの電子の閉じ込め効果が十分得られるように、スペース層及びキャリア供給層の格子整合する組成より僅かに小さい $y = 0.7$ を選択した。

$\text{N-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	300Å
$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	30Å
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As channel}$	300Å
$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As Buffer}$	2000Å
S.I. InP Sub.	

(a) 歪層HEMT構造

$\text{N-In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$	300Å
$\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$	30Å
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As channel}$	1000Å
$\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As Buffer}$	2000Å
$\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As GBL}$ ($y: 0.52 - y$)	d_2 Å
$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As Buffer}$	d_1 Å
S.I. InP Sub.	

・ $d_1 + d_2 = 0.8 \mu\text{m}$
 ・ 組成変化率
 $(y - 0.52) / d_2 < 0.5 \text{ (}/\mu\text{m)}$

(b) 格子歪緩和HEMT構造

- ・ $d_1 + d_2 = 0.8 \mu\text{m}$
- ・ InAlAs グレーディッドバッファ層の組成変化量 $(y - 0.52) / d_2 < 0.5 \text{ (}/\mu\text{m)}$

図 3-31 (a) 歪層 HEMT (PM) と (b) 格子緩和層 HEMT (SF) の断面構造図

計算

歪層及び歪緩和層 HEMT 構造について極性光学フォノン散乱を考慮した 2 サブバンドモデルを用いて電子移動度計算を行なった。自己無撞着なサブバンドの波動関数と温度依存のスクリーニングパラメータを用いて結合ボルツマン方程式を数値解法的に解いた。AlGaAs/InGaAs 歪層 HEMT 構造において電子の有効質量が InAs 組成に殆ど影響しないことが、示されていることから、コンダクションバンドの非放物線性と歪が電子の有効質量に与える影響は重要であると考えられる。そこで歪層 InGaAs の電子の有効質量 $m_c(E)$ を 1 次の $k \cdot p$ 理論を用いて計算を行なった。ここでコンダクションバンド端からのエネルギーの関数である $m_c(E)$ は以下の式で近似できることが示されている。

$$m_c(\Delta E) = \frac{E_g + E_H - E_U + 2\Delta E}{E_g}$$

$$E_H = 2a \left[\frac{C_{11} - C_{12}}{C_{11}} \right] \varepsilon_{//}, \quad E_U = -b \left[\frac{C_{11} + 2C_{12}}{C_{11}} \right] \varepsilon_{//}$$

$m_c(\Delta E)$: electron effective mass
 E_g : energy gap
 a, b : hydrostatic and shear deformation potentials
 C_{11}, C_{12} : elastic constant
 $\varepsilon_{//}$: in-plane strain
 ΔE : energy from conduction-band edge

Suemune I., 1991 J. quantum Electron., VOL. 27 pp 1149.

計算により求めたバルク及び歪層 InGaAs の電子の有効質量の InAs 組成 X_{In} 依存性を図 3-32 に示す。バルク InGaAs の電子の有効質量が InAs 組成の増加とともに単調に減少するのに対して、歪層 InGaAs では組成によらずほぼ一定であるという結果が得られた。この結果より、電子移動度の計算において、歪層構造については InAs によらず有効質量の値として $0.044m_0$ と $E = 0$ をパラメータとして用いた。

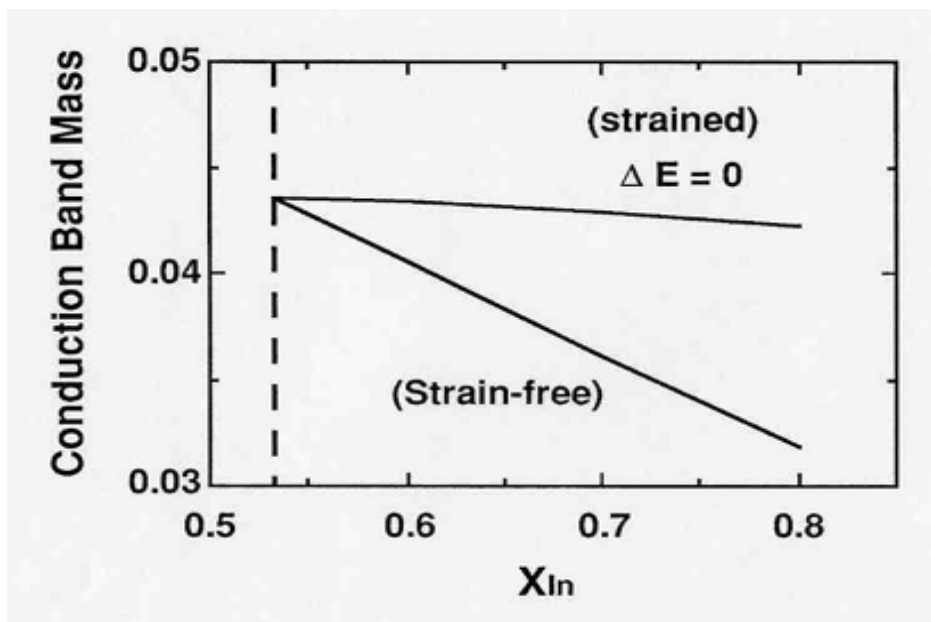


図 3-32 チャンネルの In 組成と(a)歪層 HEMT (PM) と (b) 格子緩和層 HEMT(SF)の伝導帯の電子の有効質量 (計算)

結果と考察

図 3-33 に 300K 及び 77K での電子移動度 (μ) とシートキャリア濃度 (N_s) の測定結果を示す。歪緩和層構造における電子移動度は InAs 組成の増加とともに単調に減少する傾向が見られ、 $X_{In} = 0.8$ で $118000\text{cm}^2/\text{Vs}$ (77K) という非常に高い移動度が得られた。一方、歪層構造においては、77K における最高の移動度でも $X_{In} = 0.65$ で $51400\text{cm}^2/\text{Vs}$ と低く、歪緩和層構造と比較して全ての InAs 組成において低く、InAs 組成の増加に対する移動度の増加も非常に小さかった。シートキャリア濃度については歪層構造では InAs 組成の増加に対してコンダクションバンドにおけるバンド不連続の値が大きくなるため増加する傾向が見られた。歪緩和層構造では逆に InAs 組成の増加とともに減少する傾向となった。

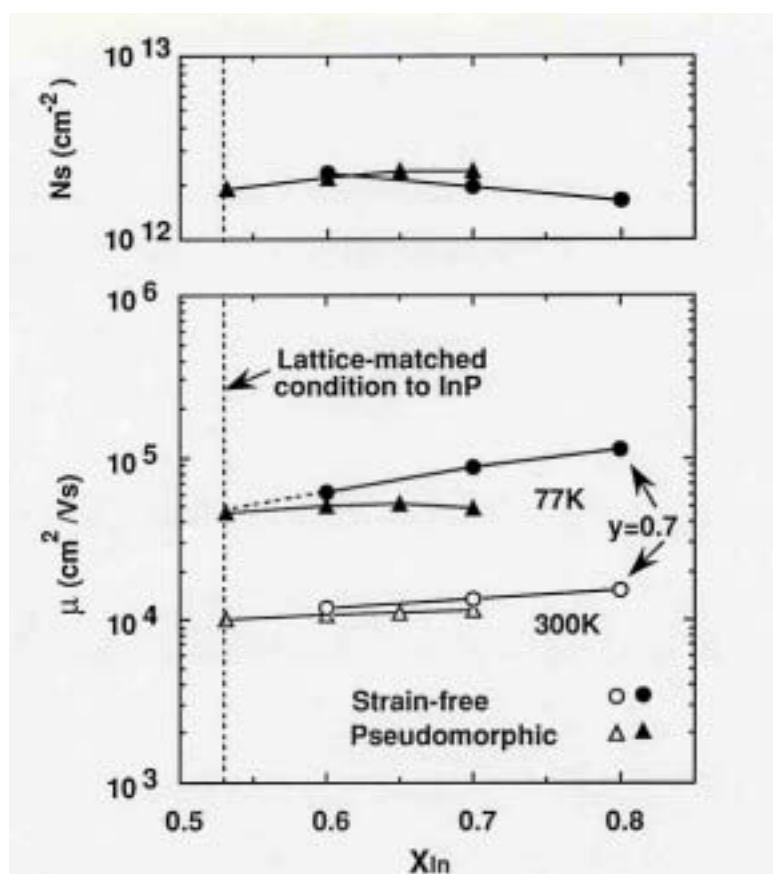


図 3-33 (a) 歪層 HEMT (PM) と (b) 格子緩和 HEMT(SF) のチャンネル InAs 組成と電子移動度とキャリア濃度との関係 (実験値)

図 3-34 に 77K における電子移動度とシートキャリア濃度の InAs 組成比依存性の計算結果を示す。歪緩和層構造は InGaAs チャネル層厚が 1000 と厚いため、波動関数の空間的重なりが小さいため、電子移動度が大きいことが考えられる。そのためチャネル層厚を 300 と

した構造についても計算を行った。この結果より、歪層構造においては電子の有効質量を一定として計算した結果が、さらに歪緩和層構造についてはバルクの有効質量を用いて計算した結果がそれぞれ実験値と良好な一致を示した。この結果は GBL を用いて成長した歪緩和層構造においてはほぼ欠陥が無く、残留している歪も無視できるくらい小さい事を示唆している。チャンネル層膜厚が 300 の歪緩和層構造については、1000 と比較すると電子移動度が約 20%低い。しかしながら、同じ膜厚の歪層構造よりは移動度は大きく、その差は InAs 組成比が大きくなるほど拡大する傾向が見られた。シートキャリア濃度 (N_s) については InAs 組成の増加とともに、歪構造ではわずかに増加するのに対して、歪緩和層構造では逆に減少する傾向が見られた。この計算結果は実験におけるシートキャリア濃度の変化とよく一致していた。

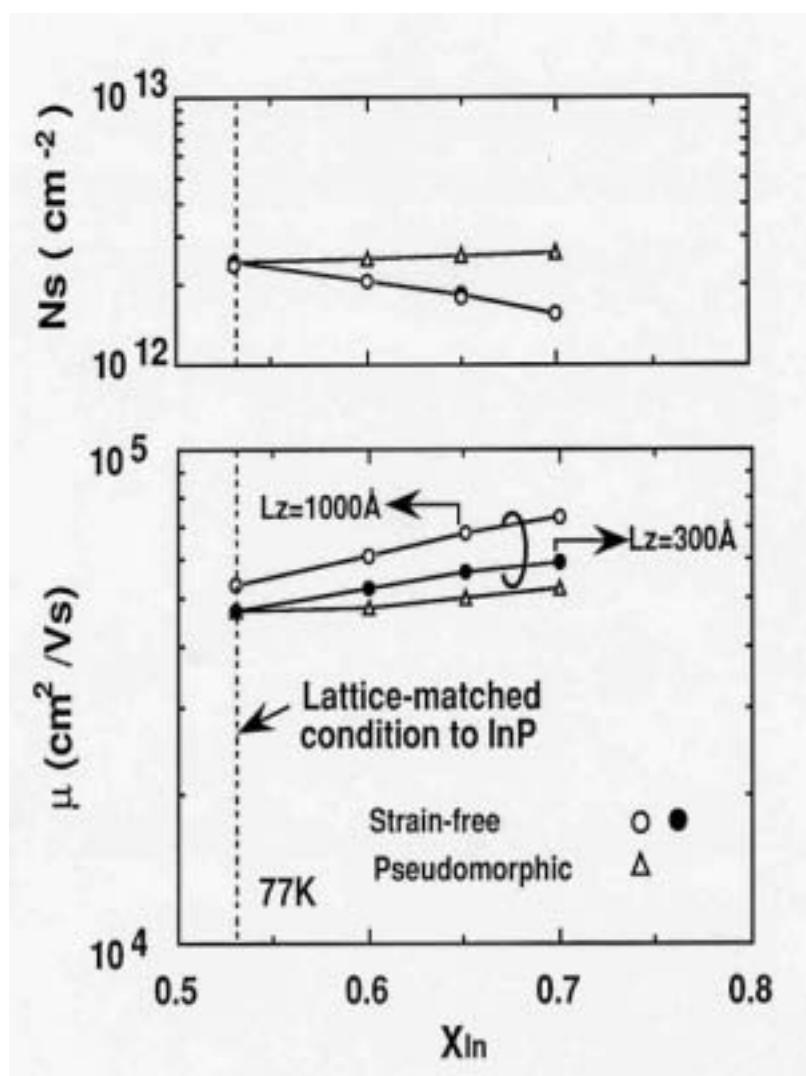


図 3-34 77K における電子移動度とシートキャリア濃度の InAs 組成比依存性の計算結果

さらに詳細に歪層構造における電子の有効質量が電子移動度及びシートキャリア濃度へ与える影響を検討するため、バルクの有効質量を用いて計算を行った。

図 3-35 にその結果を示す。バルクの有効質量を用いた電子移動度は一定の有効質量を使った結果より高く、InAs 組成比依存性も大きいことがわかった。さらバルクの有効質量を用いた場合、シートキャリア濃度は InAs 組成の増加とともに減少しており、これは実際の歪層構造における傾向とは一致してない。これは歪層構造においては有効質量が一定であるという仮定を支持する一つの結果といえる。

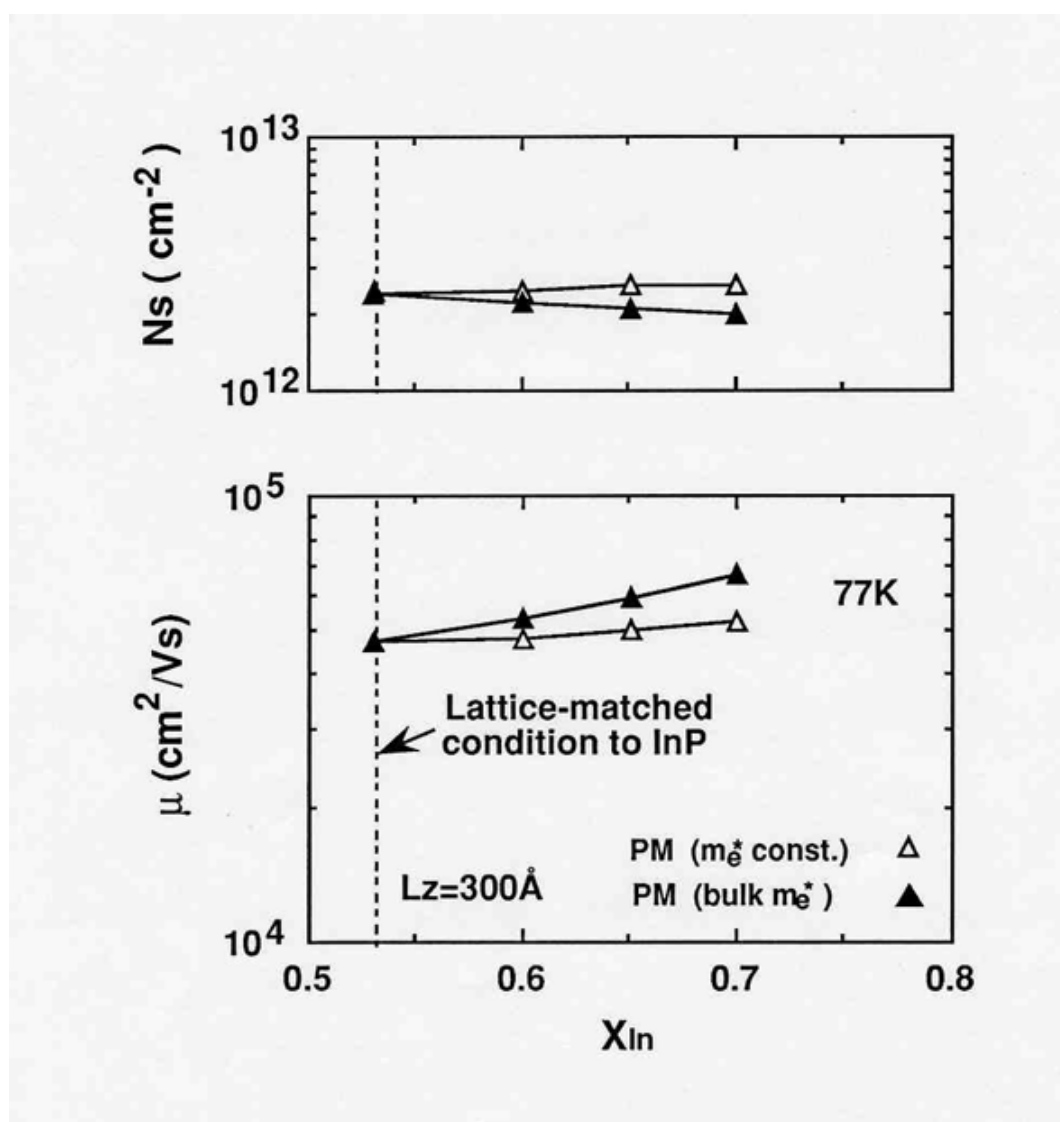


図 3-35 伝導帯の電子の有効質量をパラメータとした HEMT のチャンネル InAs 組成と電子移動度とキャリア濃度との関係 (計算値)

第3章 3-2 の参考文献

- 1) J. C. Harmand, K. Inoue, T. Matsuno, 1989 Japan J. Appl. Phys. **28** 1101
- 2) K. Inoue, J. C. Harmand, T. Matsuno, 1991 J. Crystal Growth **111** 313
- 3) K. Inoue, T. Matsuno, 1990 Proc. Int. Conf. On GaAs and Related Compounds pp345-350
- 4) C. T. Liu, S. Y. Lin, D. C. Tui, Lee H and Ackley D, 1988 Appl. Phys. Lett. **53** 2510
- 5) J. W. Matthews and A. E. Blaleslee, 1974 J. Crystal Growth **27** 118
- 6) I. Suemune, 1991 IEEE J. Quantum Electron., VOL. 27 pp1149-1159

3-3 SiGe ヘテロ接合の新しい応用による高耐圧化に関する研究

コレクタ選択イオン注入 SiGe HBT を組み合わせたパワーアンプ

背景

近年、シリコン系デバイスの技術の向上により、高周波性能の向上が著しく、Patton らによる SiGe のトランジスタの実現^{1,2)}で、化合物半導体との機能及び性能的にオーバーラップする領域が拡大した。小信号への応用分野については集積化が可能であるというメリットが大きく、携帯電話や無線 LAN の無線部への実用化が進んでいる。しかしながら、高周波におけるパワー応用を考えた場合、化合物半導体と比較して、一部でしか研究開発がなされていない。その一つの要因として Si/SiGe の材料に起因する高周波性能と耐圧とのトレードオフにより、必ずしも高周波パワーへの応用が最適とは考えられないという点が挙げられる。しかしながら、SiGe/Si で実現できれば、制御回路との集積化による高機能化や大口径のシリコンプロセスによる低コスト化等、メリットは大きく、近年、高周波パワーアンプへの応用が検討されている³⁻⁶⁾。そこで本研究では化合物半導体と同様に歪層を用いたヘテロ構造を用いるという点で、SiGe 歪構造を用いたヘテロバイポーラトランジスタ構造において、コレクタ構造に着目し、その高周波パワー応用について可能性を検証した。HBT のコレクタ層の不純物濃度と膜厚をかえることにより、耐圧を向上させ、携帯電話で用いられるマイクロ波帯での高出力特性についてのポテンシャルを評価した。RF パワーアンプでは、多段アンプ構成が一般的であるが、前段側が高 Gain に、後段側に高飽和パワーとなる構成によりトータルのパフォーマンス向上が期待できる。しかし、設計的にはそのようなパワーアンプを構成する事は可能であるが、このような全く異なるタイプのトランジスタを同一チップ上に構成することは必ずしも技術的に容易ではない。多段構成の増幅器について、前段と後段の増幅器にコレクタ構造を変えた耐圧の異なるトランジスタを用いることで、耐圧と高周波特性を向上させることが可能であり、マイクロ波領域での高出力デバイスとしての可能性を示した。今回、我々は、選択コレクタイオン注入が SiGe

HBT の RF 特性に与える影響について注目し、検討を行い、同一ウェハ上に選択コレクタイオン注入(SIC)を行う SiGe HBT と、行わない SiGe HBT を組み合わせた 2 段アンプを検討することにより実現し、良好な特性が得られることを確認した。

1. デバイス構造と作製プロセス

SiGe HBT パワーアンプは、SiGe Bi-CMOS プロセス技術を元にパワー用に変更を行い、作製した。選択コレクタイオン注入 NPN 型の SiGe HBT の断面構造および HBT のキャリアプロファイルと選択コレクタイオン注入のプロファイルを図 3-36 に示す。コレクタ層のシリコンエピ層の抵抗率は $1 \cdot \text{cm}$ である。SiGe ベース層は Ge 組成が 0% から最大 15% まで段階的に変化する傾斜組成ベース構造を用いた。デバイス分離にはシャロートレンチとディープトレンチを組み合わせて使用している。SiGe パワーHBT の断面 SEM 像を図 3-37 に示す。エミッタ幅は $0.65 \mu\text{m}$ である。

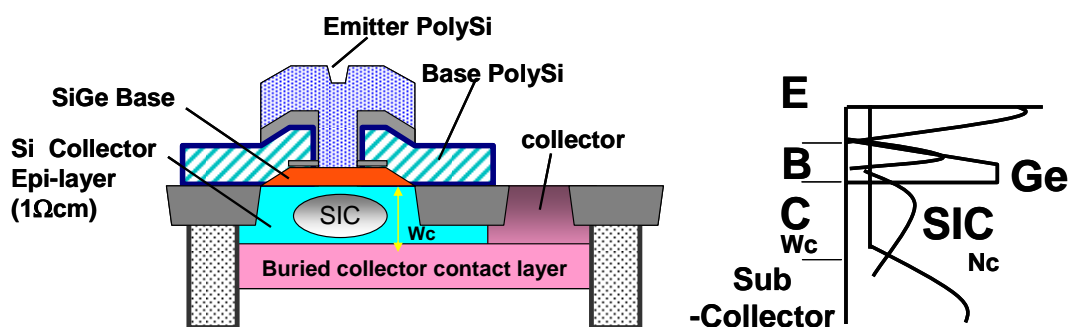


図 3-36 SiGe ヘテロバイポーラトランジスタの断面構造及びキャリアプロファイル

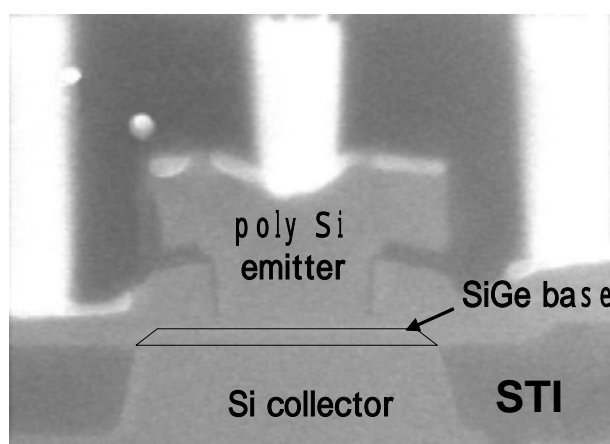


図 3-37 SiGe パワーHBT の断面 SEM 像

実験

単体の SiGe HBT についてコレクタ層厚の膜厚を $0.55\mu\text{m}$ と $0.75\mu\text{m}$ と 2 種類について SIC の有無とその DC 特性、小信号高周波特性及びパワー特性について評価を行った。SIC 構造においてコレクタへのドーピング濃度は $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ とした。

DC 特性

図 3-38 にコレクタ膜厚が $0.75\mu\text{m}$ の試料について、SIC 無 (a) と SIC 有 (b) の場合の I-V 特性を示す。コレクタ・エミッタ間ブレイクダウン電圧 BV_{ceo} はそれぞれ、SIC 無しで 8.9V 、SIC 有で 5.3V であった。 $0.55\mu\text{m}$ の試料については SIC 無しで 6.7V 、SIC 有で約 3V と SIC 有については低い値を示した。

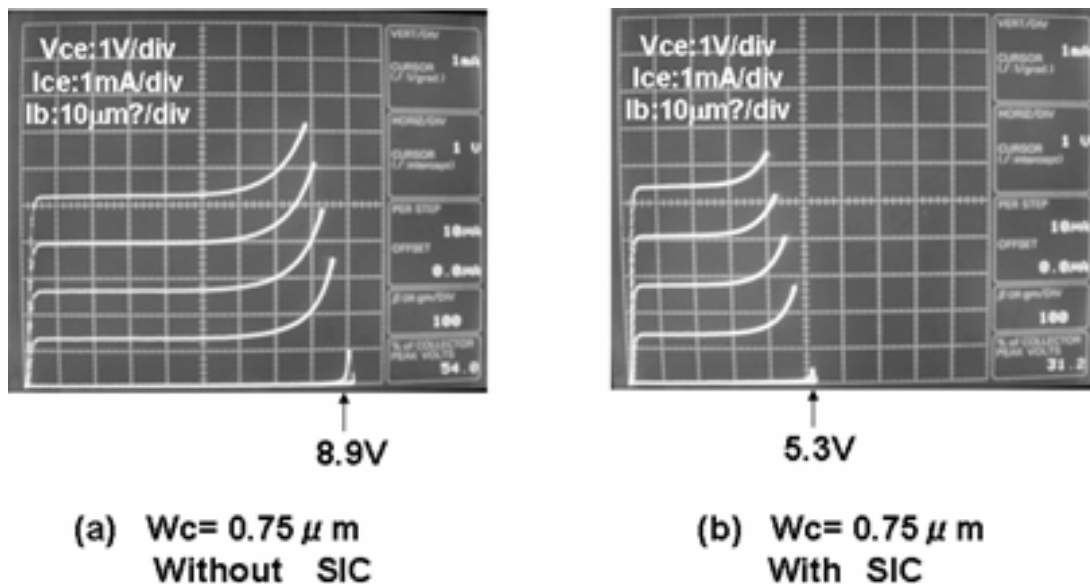


図 3-38 SIC 無 (a) 及び SIC (有) の SiGe HBT の I-V 特性

小信号高周波特性

S パラメータによる高周波小信号特性の評価を行った。図 3-39 にコレクタ膜厚が $0.75\mu\text{m}$ の試料について電流利得遮断周波数 f_{t} のコレクタ電流密度依存性を示す。高電流領域においてはエミッタより注入された電子が、コレクタの空乏層を支えるドナー濃度より高くなった場合、空乏層の電界を打ち消すため、見かけ上ベース領域がコレクタ側に広がり、 f_{t} が低下するカーク効果が見られている。SIC 有ではコレクタに濃度勾配を形成することで、カーク効果が抑制され、 f_{t} が向上している。図 3-40 に最大発振周波数 f_{max} のコレクタ電流密度依存性を示す。 f_{max} についても SIC 無と SIC 有で同様の傾向が見られた。

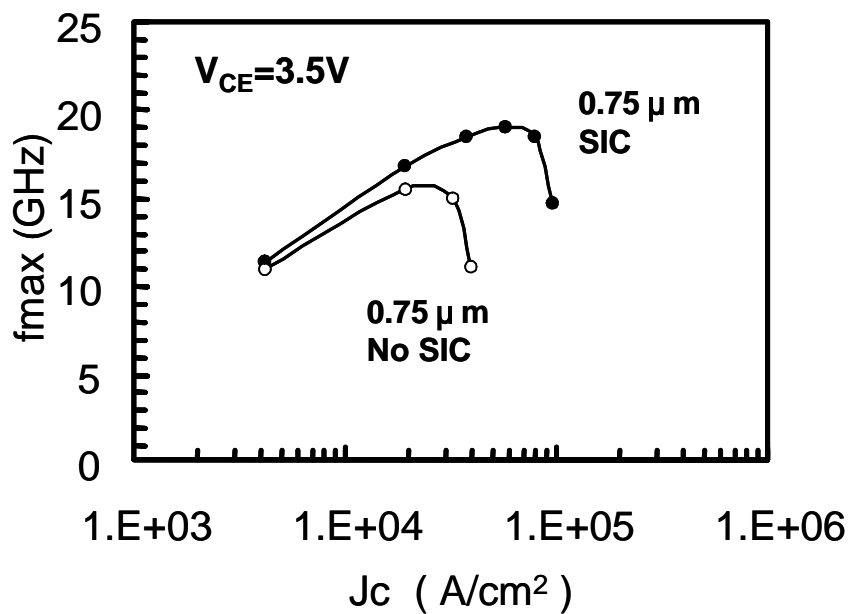


図 3-39 SICの有無による電流利得遮断周波数 f_t のコレクタ電流密度依存性

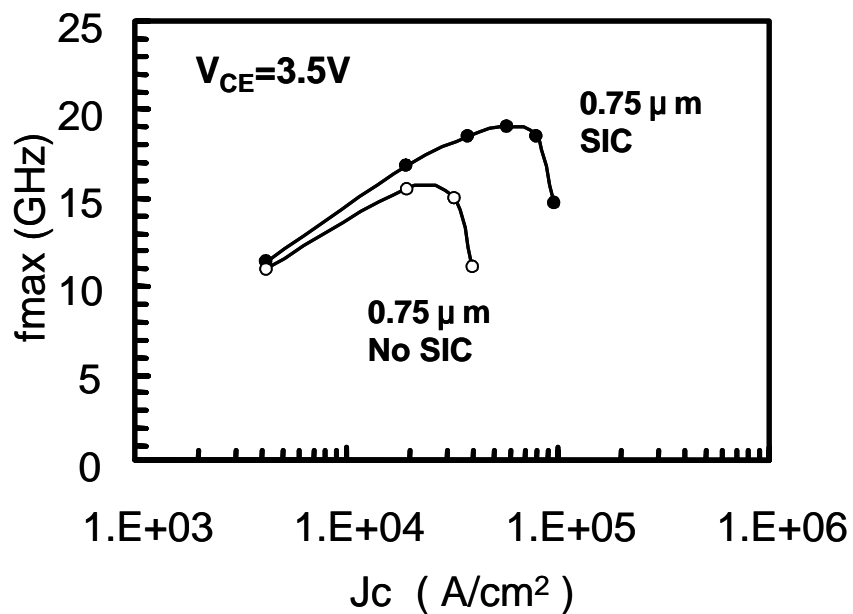


図 3-40 SICの有無による最大発振周波数 f_{max} のコレクタ電流密度依存性

表 3- 1 に SIC の有無、コレクタ膜厚と DC 及び高周波小信号特性についてまとめた。
 0.75 μm の厚いコレクタ層を有する試料でも SIC を用いることで $BV_{CE0}=5.3\text{V}$ で $f_t=18.5\text{GHz}$ 、
 $f_{max}=19\text{GHz}$ 特性が得られる可能性を示した。

表 3 - 1 SIC の有無、コレクタ膜厚と各特性

Collector layer thickness (μm)	THIN 0.55	THICK 0.75	THICK 0.75
Collector doping	Without SIC	SIC	Without SIC
P1dB (dBm)	23.3	24.1	20.4
Gain (dB)	13.9	14	13.9
PAE (%)	26.3	27.6	21.3
ACPR1 (dBc)	-58.3	-58	-48
ACPR2 (dBc)	-59.5	-59	-58

高周波パワー特性

携帯電話の W-CDMA で用いられる 1.95GHz でロードプル測定によりパワー特性の評価を行った。相互変調歪特性を評価するため、W-CDMA 変調波を用いた。

評価を行った HBT のエミッタサイズは単位エミッタ幅 $0.65\mu\text{m}$ 、エミッタ長 $20\mu\text{m}$ の 20 本で総面積は $520\mu\text{m}^2$ である。ロードプル測定において出力パワーは W-CDMA 携帯電話で用いられる 2 段構成のパワーアンプにおける 1 段目の出力に相当する 16 dBm に固定した。

パワー測定において、隣接チャンネル漏洩電力比 (ACPR) は出力インピーダンスにより最適化を図った。図 3-41 にコレクタ膜厚 $0.75\mu\text{m}$ で SIC 有の場合についてそれぞれ V_{ce} が 3.5V の場合の入力電力 P_{in} に対する出力電力 P_{out} 、電力付加効率 PAE、隣接チャンネル漏洩電力比 (ACPR) を示した。表 2 に SIC の有無、コレクタ膜厚と高周波パワー特性の結果についてまとめた。SIC 有の試料は SIC 無と比較すると、 B_{VCE0} は 5.3V と低い、1dB ゲイン抑圧パワーや PAE、ACPR はいずれも SIC 無しより良好な結果が得られた。また同様の測定を $V_{ce}=2.7V$ についても行った。図 3-42 にその結果を示す。SIC ありの場合は出力パワー 16dBm 時の 5MHz 離調での隣接漏洩電力比 ACPR 1 の値は $V_{ce}=3.5V$ で -58dBc に対して、 $V_{ce}=2.7V$ では -48dBc と劣化するが、SIC 無しの場合の $V_{ce}=2.7V$ では -39dBc と大きく劣化し、コレクタ電圧依存性が大きいと考えられる。一方、SIC 無しはエミッタ面積が大きな HBT では得られた最大パワーが 30dBm と大きく、飽和パワー特性については有効である事を示唆している。

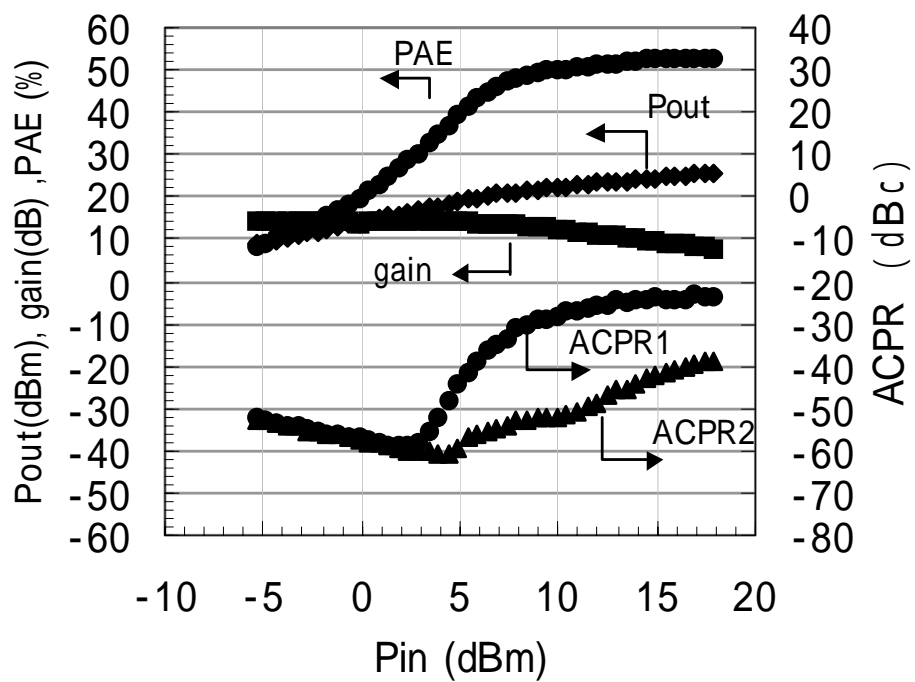


図 3-41 高周波パワー特性 (コレクタ膜厚 0.75 μm で SIC 有 : $V_{ce}=3.5\text{V}$)

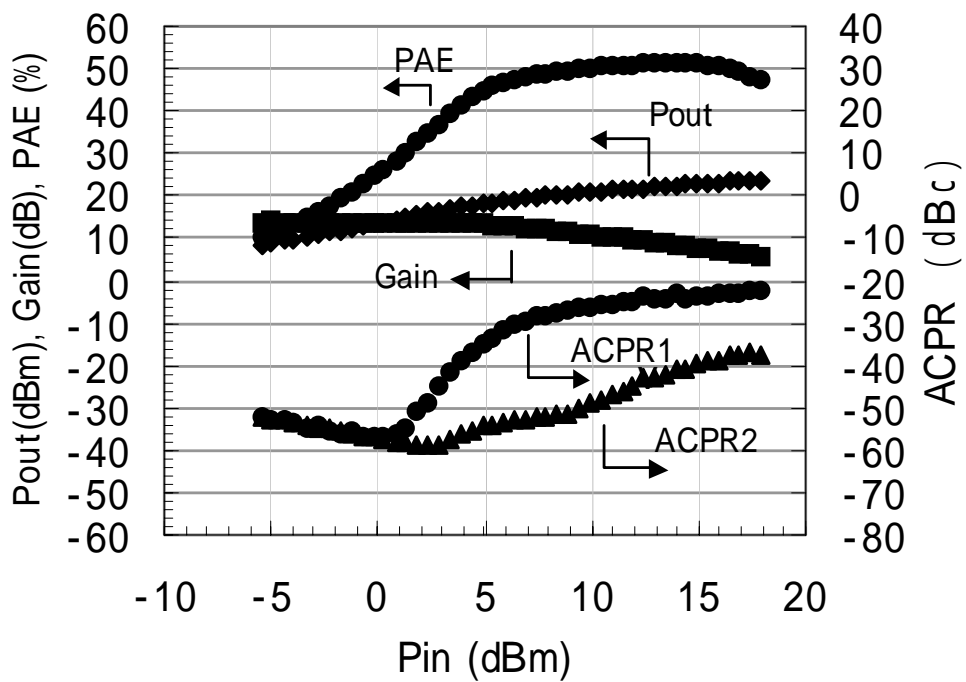


図 3-42 高周波パワー特性 (コレクタ膜厚 0.75 μm で SIC 有 : $V_{ce}=2.7\text{V}$)

表 3 - 1 SIC の有無、コレクタ膜厚と各特性

Collector layer thickness (μm)	THIN 0.55	THICK 0.75	THICK 0.75
Collector doping	Without SIC	SIC	Without SIC
P1dB (dBm)	23.3	24.1	20.4
Gain (dB)	13.9	14	13.9
PAE (%)	26.3	27.6	21.3
ACPR1 (dBc)	-58.3	-58	-48
ACPR2 (dBc)	-59.5	-59	-58

これらの結果よりコレクタ構造の異なる構造について高周波パワー特性の検討を行い、SIC を用いることで、コレクタ層の厚い構造で薄い構造において SIC 無しにより耐圧を向上させた場合と同等の高周波特性が得られる可能性を示した。

さらにコレクタ層の厚い構造で SIC を無くすことで耐圧を大きく向上させることが可能であり、高出力動作の可能性を示した。同一のコレクタ膜厚で SIC の有無により、高周波パワー特性を制御できることから多段アンプへの応用が有望であると考ええる。

2 段構成パワーアンプへの応用

前段、後段に選択コレクタイオン注入の有無を組み合わせた SiGe HBT から構成されるパワーアンプの検討を行った。高 Gain を達成するために、前段側には選択コレクタイオン注入を採用しており、一方、後段側は高耐圧を達成するために、選択コレクタイオン注入を用いない構造とした。

HBT の構造

コレクタ層厚は $0.55\mu\text{m}$ のものを用い、コレクタ層のシリコンエピ層の抵抗率は $1\Omega\cdot\text{cm}$ である。SiGe ベース層は Ge 組成が 0% から最大 15% まで段階的に変化する傾斜組成ベース構造を用いた。エミッタ幅は $0.65\mu\text{m}$ である。

DC 特性

選択コレクタイオン注入が DC 特性に与える影響について検討を行った。コレクタへの注入量は、0 から $1.2\times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ まで変化させた。図 3-43 にコレクタ絶縁破壊電圧(BV_{ceo})のドーズ量依存性を示す。コレクタへの注入量の増加とともにコレクタ絶縁破壊電圧が単調に減少している事がわかる。図 3-44 にコレクタイオン注入 SIC を行ったもの(a)と、行わなかったもの(b)の電流-電圧特性を示す。コレクタ破壊電圧は SIC を行ったもの、行わなかったものそれぞれに対して、3.7V、6.7V であった。また、電流利得 h_{FE} はそれぞれ、110、100 であった。

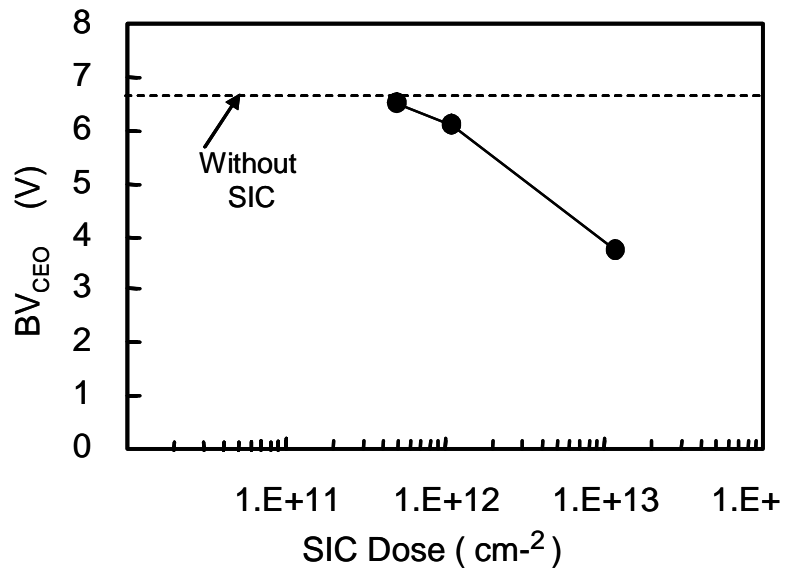
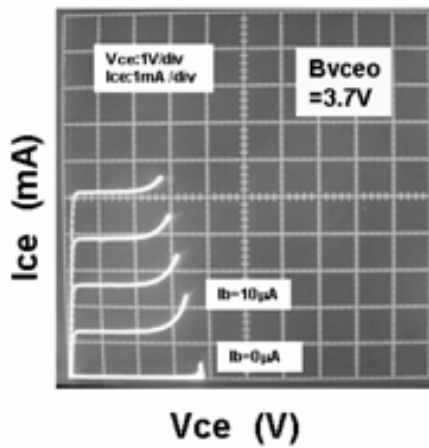
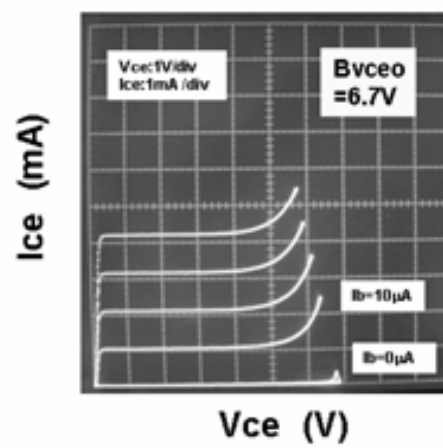


図 3-43 コレクタ-エミッタ絶縁破壊耐圧 BV_{CEO} の SIC 濃度依存性

(a) With SIC



(b) Without SIC



0.65 μm x 20 μm x2 x 20 (520 μm^2)

図 3-44 SIC 無 (a) 及び SIC(有)の SiGe HBT の I-V 特性

また、コレクタ-エミッタ飽和電圧($V_{ce_{sat}}$)についても測定を行った。図 3-45 に $V_{ce_{sat}}$ の SIC 注入量依存性を示す。SIC ありの $1.2 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ である試料では、 $V_{ce_{sat}}$ が 140mV 以下であり、SIC なし構造の試料に比べると 30mV 程度低くなっていることがわかる。

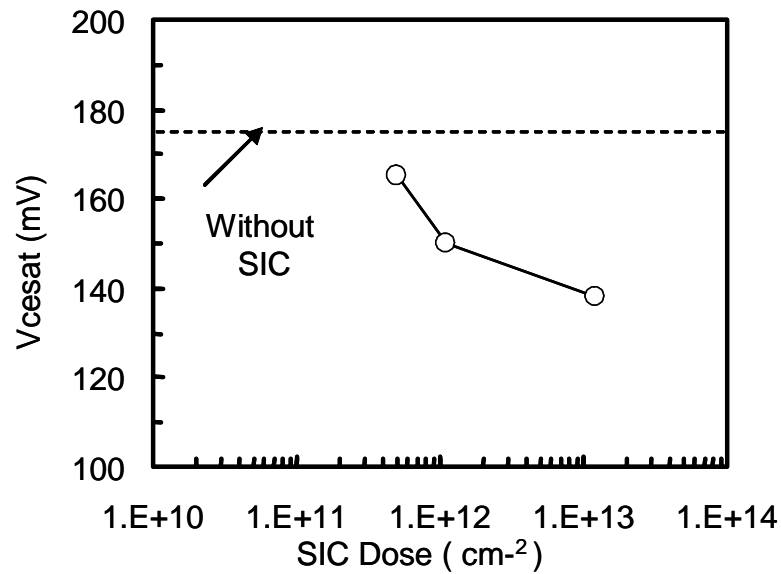


図 3-45 SIC の有無によるコレクタ-エミッタ飽和電圧($V_{ce_{sat}}$)の SIC 濃度依存性

高周波小信号特性

RF 特性への SIC の効果については、S-parameter 測定を行うことにより検討を行った。遮断周波数(f_T)の SIC ドーズ量依存性を調べた。図 3-46 に遮断周波数 f_T の SIC ドーズ量依存性を示す。その結果、注入量が $1.2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ である SIC 有りの試料で、 f_T は 22GHz、SIC 無しの試料の f_T は 14GHz であった。このように、SIC によって、カーク効果が効果的に抑制され、 f_T が向上している事がわかる。

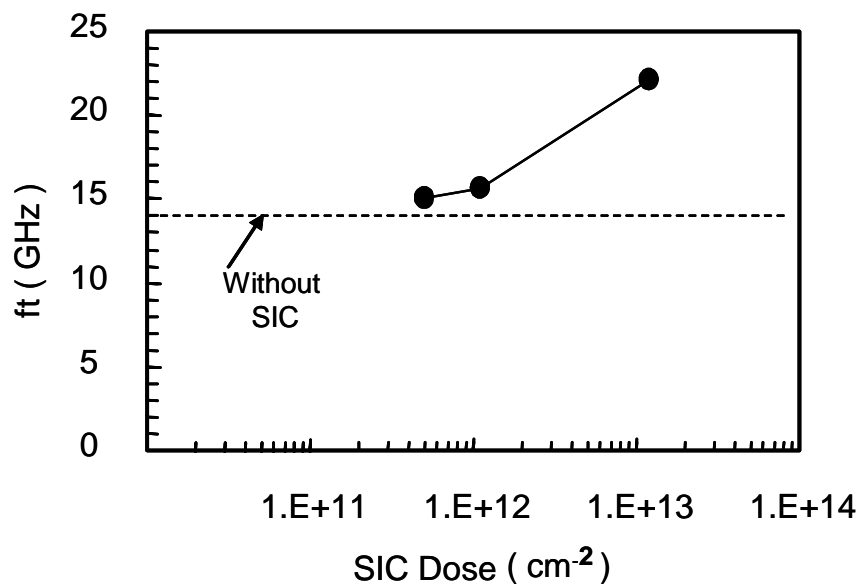


図 3-46 遮断周波数 f_T の SIC ドーズ量依存性

高周波パワー特性

単体 HBT でパワー特性に対する SIC 有り無しの違いを比較するために、ロードプル測定を行った。Pout が 20dBm 程度となるような中電力領域における SIC の有無による gain の入力パワー依存性を図 3-47 に示す。SIC 有の試料は、SIC 無の試料に比べて Gain が向上していることがわかる。また、Pout が 27dBm 程度になるような大電力領域でのパワー特性を図 3-48 に示す。SIC 有り構造の試料では、Pout が 26dBm あたりにかかったところで、急激な減少傾向が見られる。一方、SIC 無し構造では、出力電力に減少傾向は見られない。また、コレクタ電圧依存の出力飽和電力(Psat)も測定した。

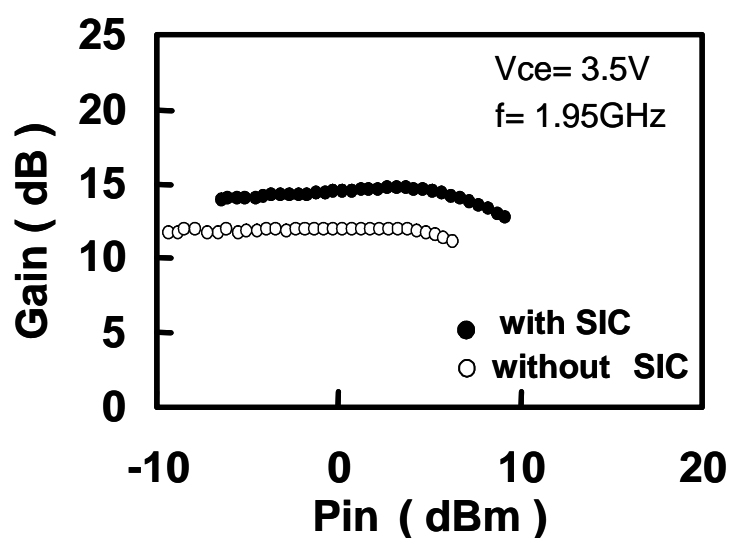


図 3-47 SIC の有無による gain の入力パワー依存性

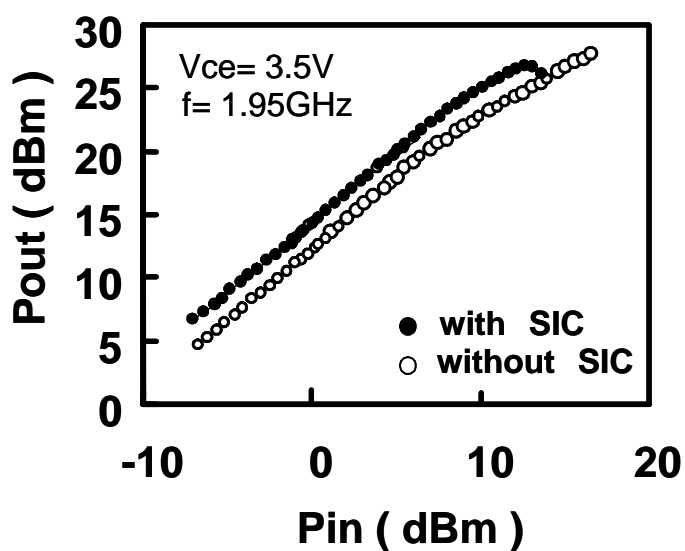


図 3-48 SIC の有無によるパワーの入出力特性

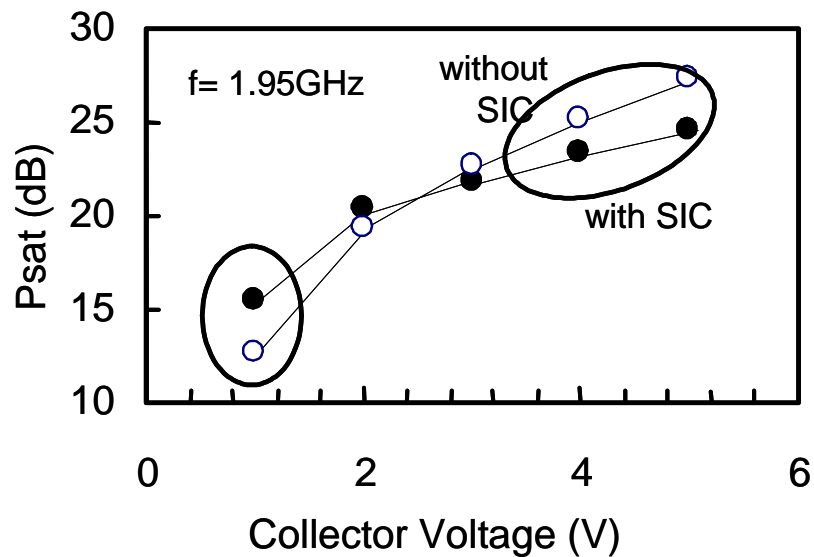


図 3 - 49 に飽和出力電力 Psat 特性のコレクタ電圧依存性

図 3 - 49 に飽和出力電力 Psat 特性のコレクタ電圧依存性を SIC 有、無についてそれぞれ示した。この図より、高コレクタ電圧領域では、高耐圧を持つ SIC を行わない HBT は、より高い飽和電力特性を有するがわかる。反対に、低コレクタ電圧領域では、その領域で $V_{ce_{sat}}$ がより低い SIC 有り構造の方が、高い飽和電力を示している。上記の結果より、図 3-50 に示すように、前段に SIC 有の構造を、後段に SIC 無の構造を採用する事で、優れたパワー特性を有する多段パワーアンプを作製するのに適している事が分かる。

2 段パワーアンプ

最後に、2 段アンプの作製を行った。作製した 2 段アンプのチップ図を図 3-51 に示す。パワーアンプのチップサイズは 1.74mm x 0.88mm である。前段、後段 HBT のエミッタサイズは、それぞれ $520 \mu m^2$ 、 $3120 \mu m^2$ である。前段 HBT は $1.2 \times 10^{13} cm^{-2}$ の注入量を持つ SIC 構造を有しており、後段 HBT には SIC 無し構造を採用している。パワーアンプのパワー特性は V_{ce} を 3.5V、1.95GHz で測定を行った。チップは、プリント基板にマウントして評価を行った。また、マッチング回路は、外部素子を用いて構成している。図 3-52 にパワーアンプの Pin-Pout 特性を示す。結果、Pout 26dBm において、効率が 31%、Gain が 28dB を達成した。また、W-CDMA 変調波による評価で 5MHz 離調隣接チャネル漏洩電力比 (ACPR) は、-38dBc であった。

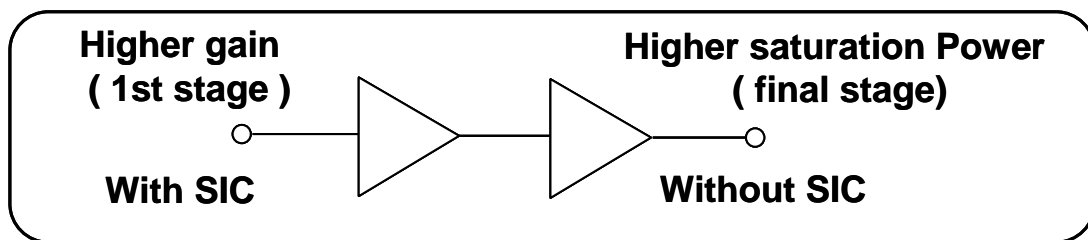


図 3-50 2 段アンプの構成ブロック図

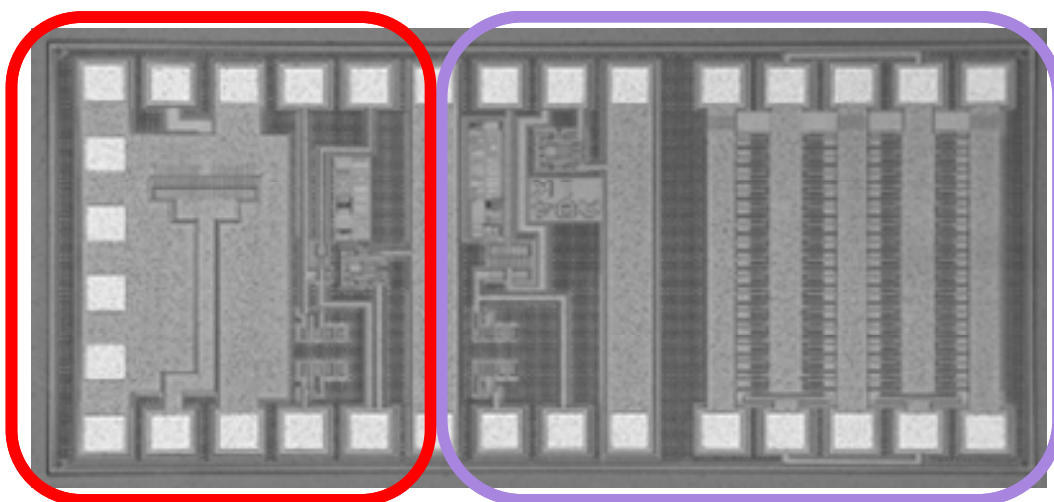


図 3-51 SIC の有無構造を用いた2段アンプのチップ写真

表 3-2 2 段アンプ前後段のセルサイズ

Emitter Size of HBT

Unit Cell : $0.65\mu\text{m} \times 20\mu\text{m} \times 2$

1st stage (with SIC)	20cell ($520\mu\text{m}^2$)
2nd stage (without SIC)	120 cell ($3120\mu\text{m}^2$)

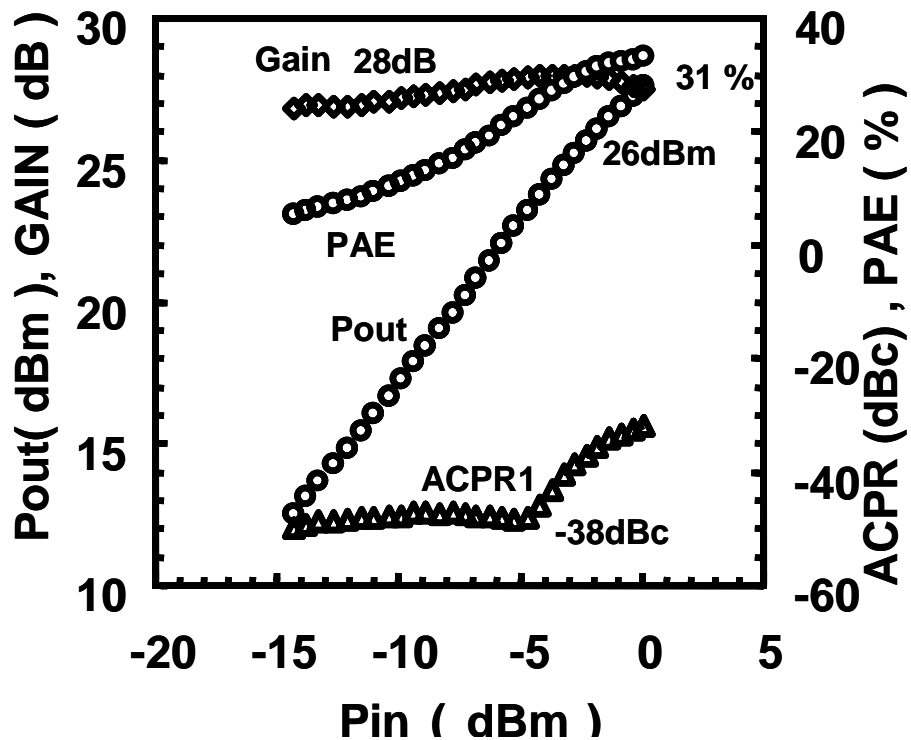


図 3-52 2 段アンプの高周波パワー特性

2. まとめ

多段構成を持つ SiGe HBT パワーアンプにおいて、高 Gain を達成するために、選択コレクタイオン注入(SIC)を行った構造を有する HBT を前段 HBT に、高耐圧を達成するために、SIC 無し構造の HBT を後段 HBT に採用した構造により RF 特性の向上が可能である事を示した。その結果、1.95GHz、Pout 26dBm で、効率が 31%、Gain が 28dB を達成した。また W-CDMA 変調波による評価では ACPR-38dBc 以下であった。SiGe HBT を用いたパワーアンプにおいても GaAs 系のパワーアンプに近い特性が得られ、マイクロ波帯におけるパワーデバイスとして有望である事を示した。

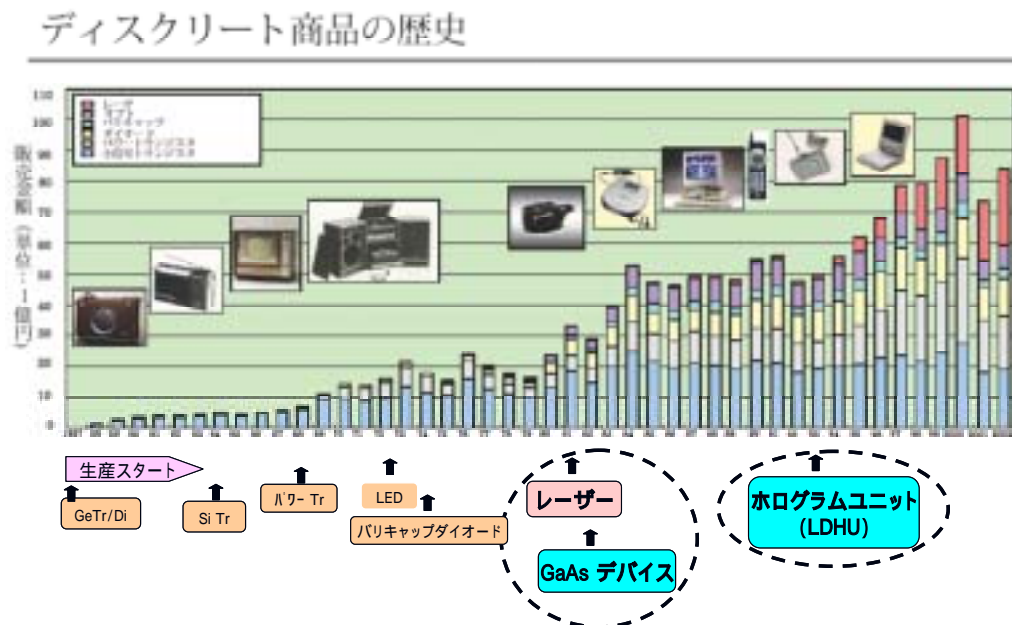
第 3 章 3-3 の参考文献

- 1) G. L. Patton, S. S. Iyer, S. L. Delages, S. Tiwari and J. M. C. Stork:
“Silicon-germanium-base heterojunction bipolar transistor by molecular beam epitaxy”, IEEE Electron Device Lett., EDL-9 (1988) p.165

- 2) G. L. Patton, et al: "75-GHz f_T Silicon-germanium-base heterojunction bipolar transistors", IEEE Electron Device Lett., EDL-11, No.4 (1990) p.13
- 3) A Schuppen, S. Gerlach, H. Dietrich, D. Wandrei, U. Seiler, and U. Konig, "1-W SiGe POWER HBT's for Mobile Communication," *IEEE MICROWAVE AND GUIDED WAVE LETTERS*, vol.6, No. 9, pp. 341-343, September 1996.
- 4) Xiangdong Zhang, Chone Saycocie, Scott Munro, Gregory Henderson, "A SiGe HBT POWER AMPLIFIER WITH 40% PAE FOR PCS CDMA APPLICATIONS," *2000 IEEE MTT-Sint. Microwave Symp. Dig.* vol. 1, pp. 857-860, June 2000.
- 5) Pei-DerTseng, Liyang Zhang, Guang-Bo Gao, Senior Member, IEEE, and M. Frank Chang, Fellow, IEEE "A 3-V Monolithic SiGe HBT Power Amplifier for Dual-Mode (CDMA/AMPS) Cellular Handset Applications," *IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS*. vol35, No. 9, pp. 1338-1344, September 2000.
- 6) Joachim N., Jean-Olivier Plouchart, Keith A. Jenins, Charles S. Webster, and Mehmet Soyuer, "SiGe HBT Power HBT's for Low-Voltage, High-Performance RF Applications" *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*. Vol19, No. 4, pp. 103-105, April 1998.

第4章 松下における化合物半導体の開発と事業創出

松下電器における化合物半導体事業をモデルに、化合物半導体の開発初期段階から、事業化、今日の発展に至るまでのビジネス戦略や過程やビジネスモデルをいくつかの事例で検証した。松下において化合物半導体の研究開発は 1960 年頃に始まり、結晶成長技術、デバイス開発が行われてきた。図 4-1 に松下電器におけるディスクリート製品（化合物半導体を含む）の歴史を示す。各デバイスとその応用商品製品化時期と売り上げの関係を示している。レーザーや GaAs デバイス、ホログラムユニットなどの化合物半導体デバイスの製品化と共に事業が大きく伸びていることがわかる。しかしながら、化合物半導体デバイスの黎明期においては技術の成熟度が低く、アプリケーションに応用できる段階には至ってなかった。化合物半導体の最大の特徴である光という特性から半導体レーザーが実用できれば、用途は明確にあった。しかしながら室温での連続発振、信頼性を実用レベルまで高めるのには長い時間を必要とした。一方、電子デバイスとしては高周波の性能は期待されるものの、レーザーとは逆に、シリコンより高価でまだ明確にメリットの出る、化合物半導体でなくてはならないという応用分野の目処がなかった。そのような状況から始まって、技術のデスバレイに陥ることなく、生き残り、事業として発展を成し遂げ、情報通信、マルチメディア社会を支える産業にまで発展してきた過程について考察する。



松下電器ホームページより転載

図 4-1 松下電器におけるディスクリート製品（化合物半導体を含む）の歴史

4-1 UHF/SHF テレビジョン受像機用 MMIC の開発と事業創出 (1980-1989 年)

他社は化合物半導体トランジスタで予想される超高周波性能でのポテンシャルから、将来、サービスが予定されている SHF 帯 (2-30GHz) の衛星放送用の低雑音受信アンプへの応用を目指したデバイス開発を行っていた。しかし、高周波化のための超微細加工技術も必要であり、サービスが開始され、事業として立ち上がるまでの期間、利益を生み出せない。そこで、他社が目をつけず、その時点での微細加工技術で歪特性の点で性能的にメリットの出る UHF 帯のテレビチューナへの応用、事業化を行った。その後、衛星放送用デバイスの開発も並行して行い、1989 年には衛星放送受信アンテナ用 12GHz 帯受信 HFET (Hetero-structureFET) の商品化へと結びつけた。ニッチな市場であってもビジネスにいち早く展開し、継続しつつ、将来の大きな市場を目指し、技術の向上を図っていった。

4-2 携帯電話送受信用 MMIC (1991-2004 年)

NTT の主導により、電機メーカーに携帯電話用セットの委託開発がスタートした。開発段階からセット、部品、企画、研究所、製造、マーケティングの関連各部門が集結、全社プロジェクト体制のもと垂直的立ち上げを果たした。電池の技術、化合物半導体の低消費電力、高周波性能及び設計技術等により低消費電力を実現し、携帯電話の普及にも牽引され、化合物半導体事業が大きく伸びる契機となった。従来の移動体としての電話機はサイズが大きく、重量も重いため、携帯電話を普及させるには、技術的な面ではセットのサイズを小型化、連続使用可能時間を長くすることが、至上課題であった。電池の改善と共に化合物半導体として以降に述べるように、端末の小型を図るため抵抗、コンデンサやインダクタを集積化した MMIC やセラミック基板に実装した超小型モジュールを開発し、容積 140cm³、重量 220g の当時、最小の端末ムーバ P の実現に寄与した。セットの小型化と低消費電力性という、そのアプリケーションで最も求められるものを実現し、他社の性能を上回ることによって競争の少ない段階で市場を確保し、利益を出すことが出来た。またインフラがデバイス開発に大きく影響した事例の一つでもある。

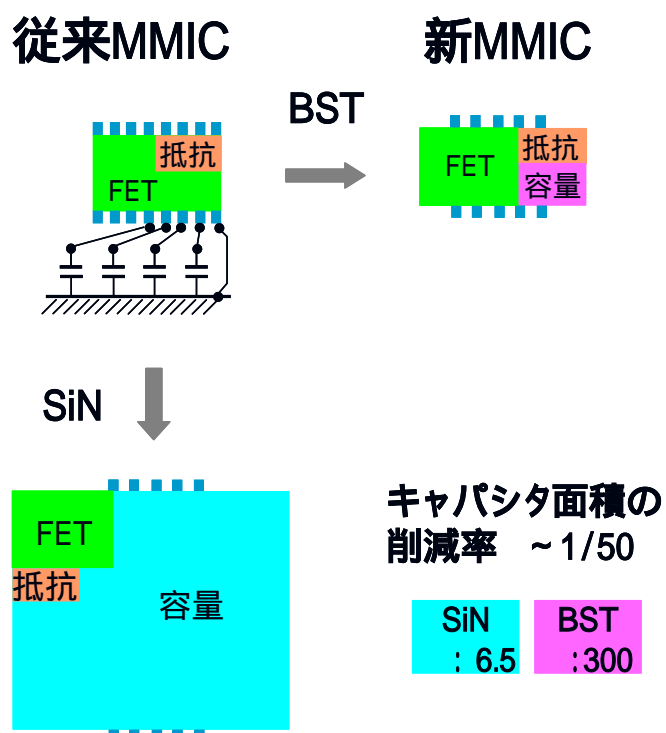
化合物半導体 MMIC

高周波で用いられる化合物半導体は設計上要求されるトランジスタの集積度はシリコン LSI と比較して著しく低い。実際の高周波回路として動作させるにはインダクタ L (コイル) やキャパシタ C (コンデンサ) R (抵抗) といった外付け部品があり、これらが大きな面積を占有し、チップの小型化の障害となっていた。一方でシリコンでは基板自体の絶縁性が低く、LCR などの受動素子をチップ上に形成すると大きな高周波信号に対してロスが生じる。それに対して、化合物半導体の高周波デバイスに用いられる GaAs では半絶縁性基板の作製が可能であり、ロスが少ないというメリットがある。この特徴を活かし、受動素子

をトランジスタ基板に集積化した MMIC (Microwave Monolithic IC) の開発を行ってきた。MMIC の技術により高周波デバイスの小型化の実現にされ、携帯電話の小型化、薄型化の要求に大きく寄与してきた。

強誘電体内臓携帯電話用 MMIC

MMIC の場合、外付けのチップ部品方式と比較して、小型化のメリットは大きい。化合物半導体トランジスタが、高コストな GaAs 基板またはさらにエピタキシャル基板上に面積の大きな受動素子を形成する必要があるため、コスト的に不利である。キャパシタの容量は電極面積と電極間材料の比誘電率に比例し、電極間面積に反比例する。従って比誘電率の大きな材料を相電極間材料に用いることが出来れば、同一の容量を実現するのに電極面積を大幅に小型化が可能となる。

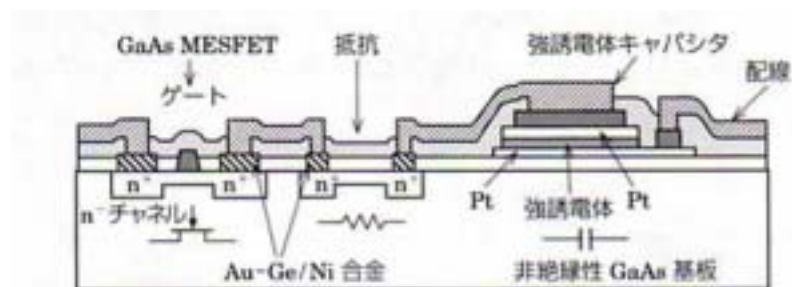


出典：「高周波・光半導体デバイス」 電子情報通信学会 (1999)

図 4-2 従来の MMIC と強誘電体をキャパシタに用いた新しい MMIC の比較

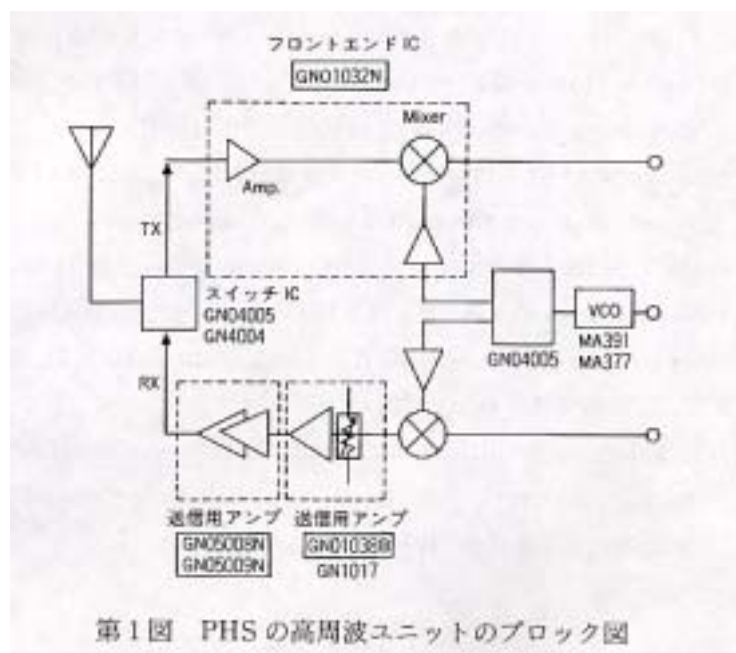
そこで松下では単位面積あたりの比誘電率： が通常のオンチップ容量の層間膜で用いられるシリコン窒化膜 (Si_3N_4) ≈ 6.5 と比較して大きな強誘電体材料の BST ($\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$) ≈ 300 に着目し、成膜技術の開発と BST を化合物半導体 MMIC に応用技術を開発した。図 4-2 に従来の MMIC と強誘電体をキャパシタに用いた新しい MMIC の比較を示す。成膜温度や形成プロセスの違いや半導体への汚染の問題から、困難と思われる 2 つの課題

をクリアし、これにより、従来のオンチップのキャパシタ面積を約 1/50 にまで低減し、MMIC の小型化を著しく発展させた。また BST は比誘電率は大きいものの 2GHz 以上の周波数での比誘電率の低下や、組成の制御性の高めるため成膜後に高温での熱処理が必要であり、ヘテロ接合エピタキシャル基板を用いた GaAs MMIC への応用が困難であった。BST より比誘電率は 100~200 と小さいものの、60GHz まで使用可能で形成時の温度が低い STO (SrTiO₃) をもちいた MMIC の開発を行ない、これを実現した。図 4-3 に 強誘電体キャパシタ内蔵 GaAs MMIC の断面構造を示す。これらの例は既存の材料や技術の中で小型化を行うためのソリューションを求めるのではなく、従来の化合物半導体で用いられる材料の範疇にはない、大きく異なる新材料を見出し、技術的な困難性をブレークスルーし、既存の MMIC と組み合わせ付加価値を大きく向上させた事例である。



出典：「高周波・光半導体デバイス」 電子情報通信学会 (1999)

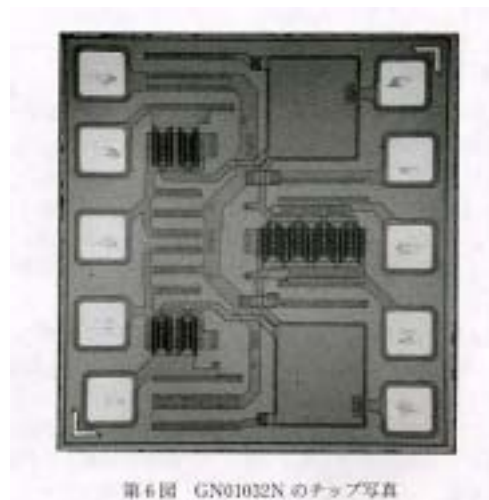
図 4-3 強誘電体キャパシタ内蔵 GaAs MMIC の断面構造



第1図 PHSの高周波ユニットのブロック図

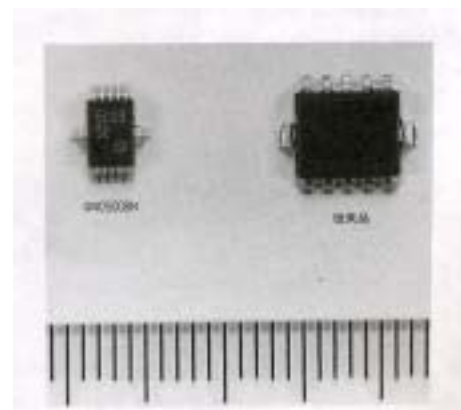
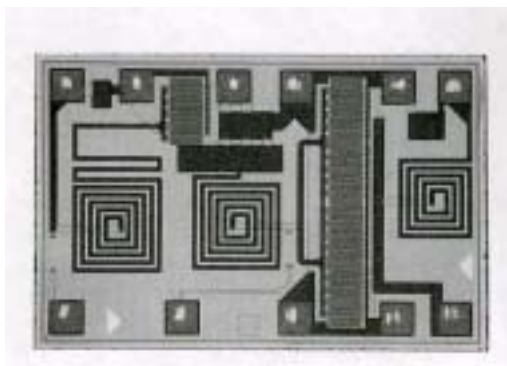
出典:Ntional TECHNICAL REPORT 1996 FEBRARY

図 4-4 PHS の高周波部のブロック図



出典:Ntational TECHNICAL REPORT 1996 FEBRARY

図 4-5 PHS 用フロントエンド MMIC (GN 01032N)



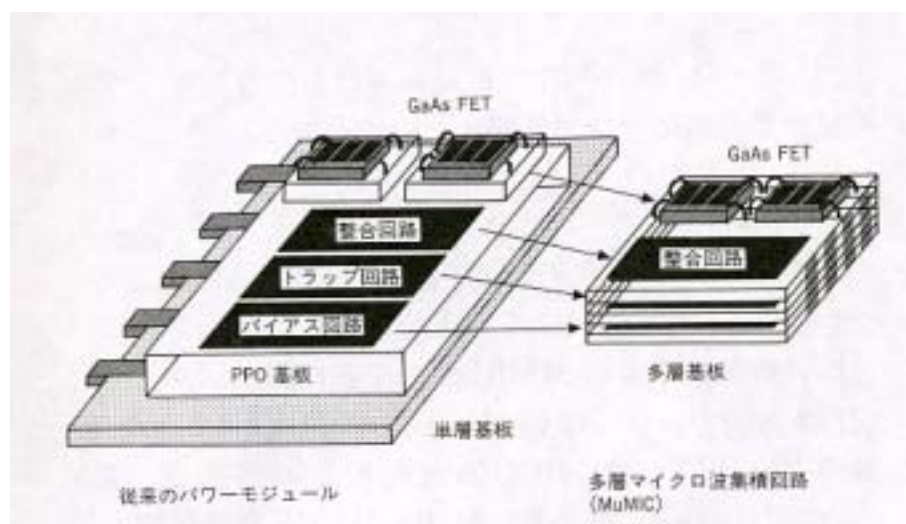
出典:Ntational TECHNICAL REPORT 1996 FEBRARY

図 4-6 PHS 用送信アンプ MMIC (GN 05008N) と従来品とのサイズ比較

MuMIC (Multilayer Microwave IC)

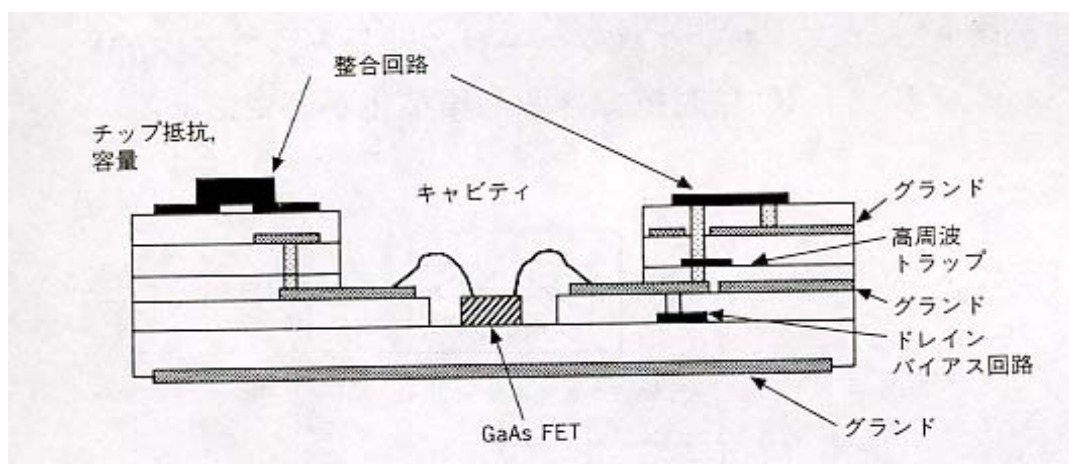
携帯電話の高周波電力増幅部は化合物半導体トランジスタからなるパワーアンプ (PA) と整合回路、トラップ回路やバイアス回路が必要であり、これらを従来は平面的に一枚の回路基板上に配置しており、大きな面積を占めていた。これを多層基板に 3 次元的に集積

することによりチップの面積を大幅に低減させた。これまでの流れを見ると小型化・集積化（半絶縁性基板 ロスが少ない）に大きな付加価値を見出し、受動素子の集積化により MMIC から究極的な 2 次元的なシュリンクを実現した独自の強誘電体 MMIC さらに周辺回路の 3 次元的な集積による MuMIC という技術的なイノベーションを生み出してきた。



出典:Ntational TECHNICAL REPORT 1996 FEBRARY

図 4-7 MuMIC のコンセプト



出典:Ntational TECHNICAL REPORT 1996 FEBRARY

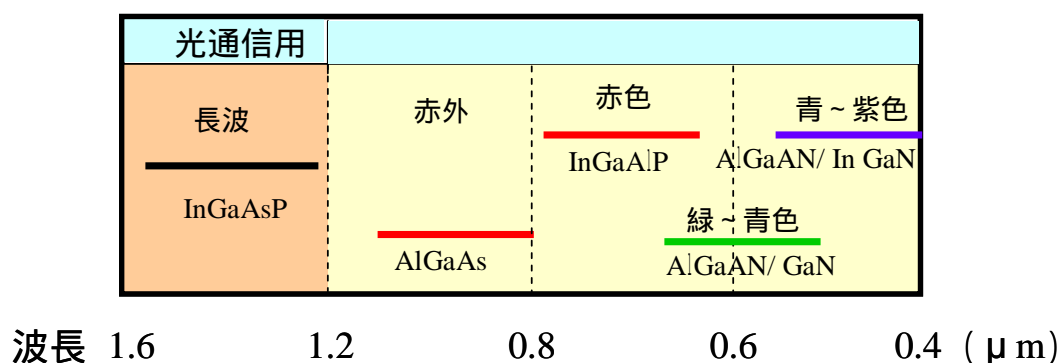
図 4-8 MuMIC の断面構造

レーザードライバの事例（～1985 年）

光通信においては電気信号を半導体レーザーを変調することで、光信号に変換している。高速大容量通信を実現するため、高速化に適した半導体レーザーや LED が開発されていたが、これらの素子を駆動するための回路は個別半導体部品で回路基板上に実装されていた。そのため、高速動作には高速限界があり、速度は数百 Mbps 程度であった。特に画像伝送を行うには伝送速度の向上を図り、超高速の光通信に対応するため、化合物半導体を用いた駆動用 IC の開発をに着手した。その結果、2Gbps の伝送レートが可能なレーザードライバを世界に先駆けて実現した。この事例は光の分野における課題を、電子デバイスの分野の高速性が期待される GaAs FET に着目し、解決手段として選択したものであり、GaAs FET にとっても新規市場の開拓を実現したものである。

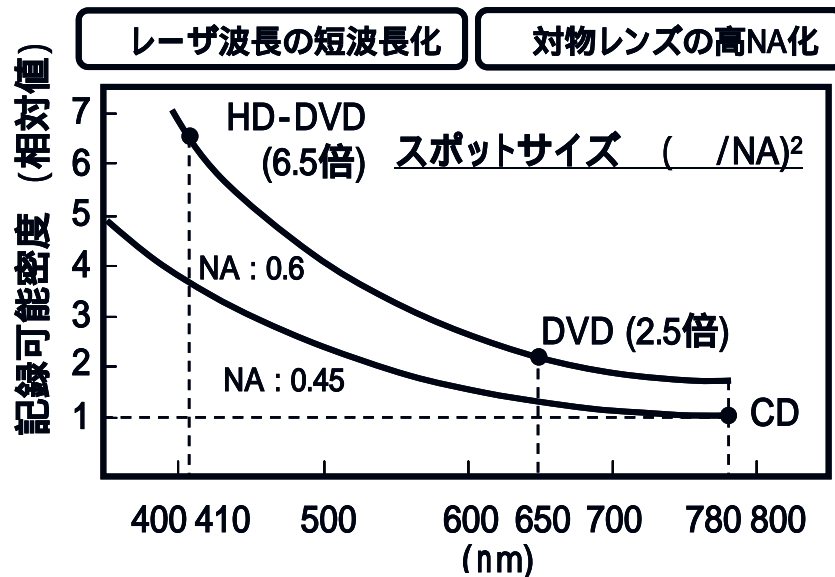
4-3 半導体レーザーと光ピックアップ用モジュールの開発と事業創出（1970-1995 年）

半導体レーザーの開発において業界他社は光通信用の長波長レーザー（波長 1.2～1.6 μm 帯）の開発に注力していたが、松下においては将来、必要となる光記録用の短波長かつ書き込み、消去にも対応するための高出力レーザーの開発を選択し、注力した。図 4-9 にレーザーの発光波長と材料系について示す。図 4-10 の光記録におけるレーザーの波長と記録密度の関係のように、記録密度を大容量化するにはレーザー波長の短波長化と対物レンズの高 NA 化が重要となる。松下電器においては高付加価値のモジュールの開発を目指して、光学についてオリンパス社、ヘテロエピに関して三菱化学と戦略的にアライアンスを結び、超小型のピックアップモジュールに挑戦した。その過程については、田路則子が著書「アーキテクチャル・イノベーション」の中で複合企業間での再編成組織によるアーキテクチャル・イノベーションという視点と、イノベーション成功の内部要因の分析により明らかにしている 5)。



出典：「高周波・光半導体デバイス」 電子情報通信学会（1999）

図 4-9 レーザーの発光波長と材料系



出典：「高周波・光半導体デバイス」 電子情報通信学会 (1999)

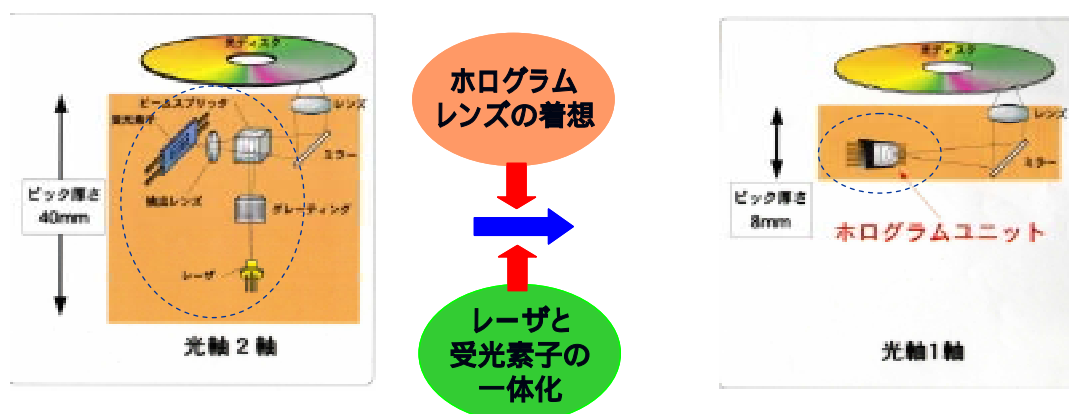
図 4-10 光記録におけるレーザーの波長 と記録密度の関係

レーザーダイオードホログラムユニット (LDHU) の事例

化合物半導体と光学部品の 3 次元的集積化 (モジュール化)

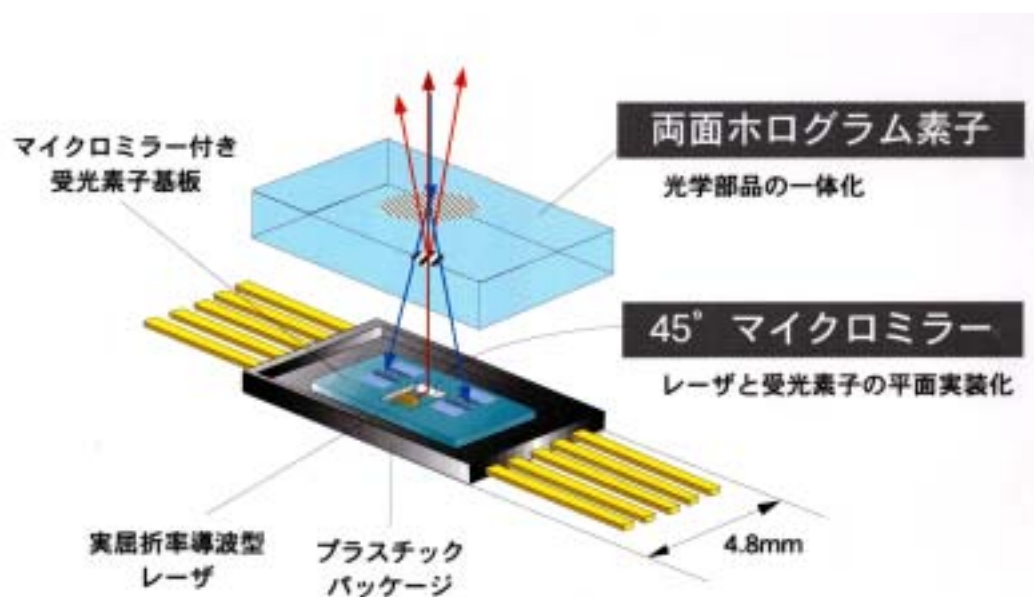
光ディスクの読み出しや書き込みには半導体レーザーが用いられている。小型化、集積化に最大の付加価値を見出し、開発に挑戦した。従来の構造では、レーザーと受光素子が独立しており、光ディスクへ出入りする光を分岐させるためにビームスプリッタと呼ばれる光学素子やそれに付随して、レンズやグレーティング (回折格子) が必要であり、モジュールの厚みが 40mm にもなり、CD の小型化は困難であった。この課題を以下の 2 つのアイデアとその結合により、LDHU という形でイノベーションを実現した。1 つ目は反射レンズの機能をもたせるというアイデアに対し、具体的なアイデアを創出し、シリコン基板に溝を形成し、その中にレーザーと受光素子を実装し、V 溝の形成によりシリコンミラーを形成するということと、2 つ目は両面からの光を分岐可能なホログラム受光素子を持ちいてレーザーと受光素子で分岐することである。その結果、部品点数を削減可能とし、ピックアップの厚さを従来の 1/5 にまでの薄型化を果たした。さらに LDHU ユニット内で光軸のアライメントがなされているため、セットの量産工程において光ピックアップとの光軸あわせのみで良いことや、機械的振動に強いというメリットの大きかった。レーザー事業の初期に、

レーザー単体では激しいコスト競争に入っており、単体レーザーの事業としてではなく、ホログラムユニット（＝モジュール化）とすることにより、付加価値を付与し、単価が高くても売れる利益率の高い商品を実現する事業戦略により、事業拡大を実現した。



出典：「高周波・光半導体デバイス」 電子情報通信学会 （1999）

図 4-11 レーザーダイオードホログラムユニット（LDHU）システムのコンセプトと構造



出典：「高周波・光半導体デバイス」 電子情報通信学会 （1999）

図 4-12 レーザーダイオードホログラムユニット（LDHU）の構造

高周波小信号用 SiGe IC の事例（GaAs から SiGe へ）

携帯電話の高周波受信部には GaAs の IC が用いられてきたが、シリコン系デバイスの性能向上により、SiGe HBT への置き換えが可能となった。化合物事業としての市場は減少したが、企業全体としては、高周波応用分野で最適な選択により利益を出せるという点でメリットは大きい。それにより、化合物半導体はさらに高速、高周波性能が必要な分野へと棲み分けが図られてきた。応用機器、システムによって最適なデバイスソリューションを提供する方向に変化してきている。松下電器においては材料開発を含む基礎研究開発からデバイス、セット製品事業までを内部に有する垂直統合型のビジネス形態を有している。半導体関連部門においてもシリコン半導体関連部門と、化合物半導体部門が存在しており、ある時期は市場開拓を目指して、競合関係になった場合もある。異なる分野のデバイス技術と高周波設計、評価技術等の共通技術が1つの企業内に存在することで、さまざまなアプリケーションに対してソリューションの選択、最適なソリューションの提供という形で戦略的ビジネスが展開可能なメリットがある。

化合物半導体事業の創出

図 4-13 に松下電器における化合物半導体製品の売り上げの推移を示す。これらのデバイスの基礎研究からスタートして 15 から 20 年の研究開発の期間を経て、実用化され、化合物半導体事業として急速に発展した。最終的に 2000 年には光と GaAs トランジスタ、IC を合わせて約 400 億円を超えるビジネスを創出した。

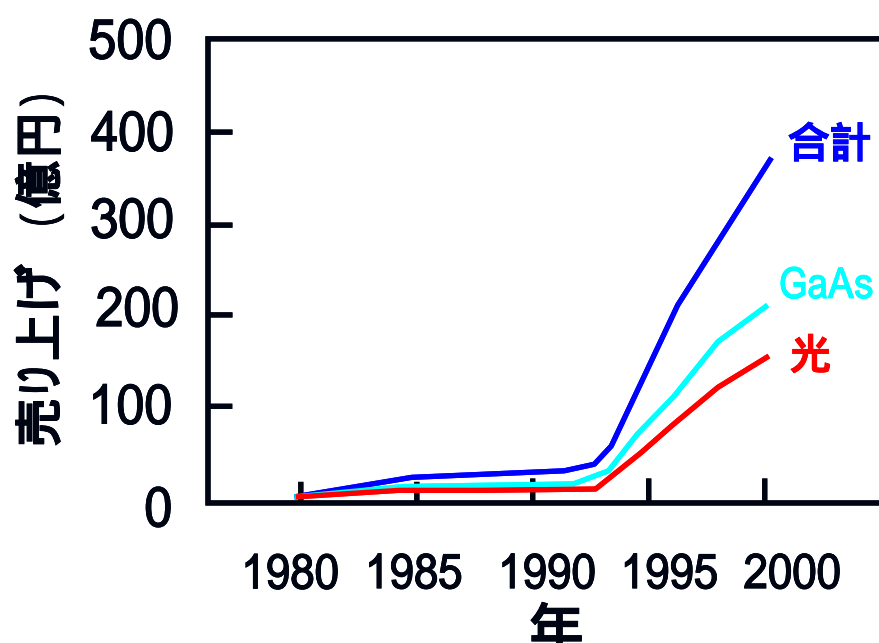
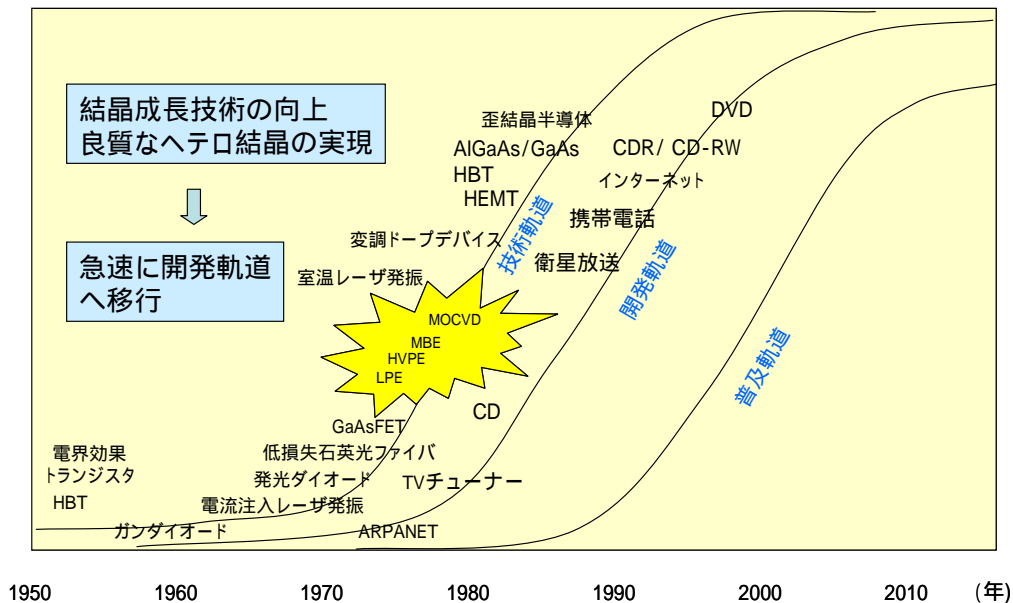


図 4-13 松下電器における化合物半導体製品の売り上げの推移



技術革新と経済発展 弘岡正明 日本経済新聞社を基に筆者が作成
 図 4-14 化合物半導体技術の開発時期と応用ビジネスの推移

図 4-14 に化合物半導体の要素技術及びデバイスとその応用製品の開発年代について比較した。化合物半導体の開発初期から 15～20 年で急速にキーとなる結晶成長技術及びデバイス技術が立ち上がり、それに伴い、応用技術、セット商品も急速に立ち上がっていることが判る。化合物半導体において、基礎研究から起算すると、商品化まで 15-20 年を要していると考えられる。松下電器の化合物半導体事業の発展について、開発の歴史と、図 4-13 の売り上げを比較した場合、弘岡正明の軌道に相当するカーブを描いていることがわかる 6)。

ROI (Return of Investment) に関する考察

これまで述べたいくつかの事例について研究開発から起算して製品化に至った後、5 年間の売り上げより、以下の定義により求めた投資回収率は いずれも 0.7～0.8 と 1 以下であった。7)

定義：投資回収率 = 5 年間の営業利益 / イニシャル投資

化合物半導体デバイスからみると研究開発（普及軌道）から製品化（普及軌道）に移行するまで、約 15～20 年以上を要しており、その間の研究設備投資や技術を蓄積するための人員を含む継続的な開発投資を要するためと考えられる。

しかしながら、松下における化合物半導体事業を考えた場合、2 つの側面がある。

1 つはデバイス自体を社外に外販するデバイスビジネスという立場とキーデバイスとして

松下社内のセット部門への供給である。松下はマクロ的にみると垂直統合型の経営形態を有しており、研究開発から企画、設計、製造、販売、流通までを内包しており、分野別に考えても、総合電機メーカーであり、家電製品から、情報通信分野、HA や FA 分野まで材料から部品、セット製品、システムまでを扱っている。先の携帯電話における事例で化合物半導体の実現により、携帯電話端末というセットで他社に先行し、付加価値の付与と差別化技術により、セットビジネスに貢献した点を考えると、デバイスのみでなくセットの観点からの評価が必要である。

松下電器における半導体事業の歴史

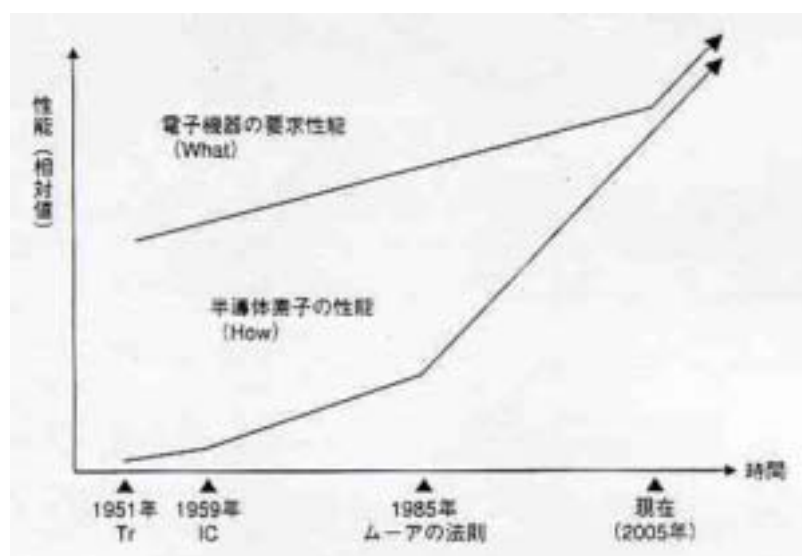
これまでは、化合物半導体事業について事例研究を行ったが、松下電器は総合家電メーカーであり、その中の半導体事業としてメインストリームであるシリコン半導体事業を行っている。ここでシリコン半導体及びセットビジネスという総合的見地から化合物半導体事業について考察を行う。8) 表 4-1 に松下電器のにおける半導体の歴史を示す。

表 4-1 松下電器のにおける半導体の歴史

年	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005
デジタル				▲16ビットマイコン(77)	▲16ビットマイコン(78)	▲16ビットマイコン(79)	▲16ビットマイコン(80)
アナログ	▲4ビットマイコン(77)	▲16ビットマイコン(78)	▲16ビットマイコン(79)	▲16ビットマイコン(80)	▲16ビットマイコン(81)	▲16ビットマイコン(82)	▲16ビットマイコン(83)
光ディスク		▲CDチップセット(78)	▲CDチップセット(79)	▲CDチップセット(80)	▲CDチップセット(81)	▲CDチップセット(82)	▲CDチップセット(83)
VTRビデオ	▲VTRビデオ(77)	▲VTRビデオ(78)	▲VTRビデオ(79)	▲VTRビデオ(80)	▲VTRビデオ(81)	▲VTRビデオ(82)	▲VTRビデオ(83)
携帯電話				▲携帯電話(80)	▲携帯電話(81)	▲携帯電話(82)	▲携帯電話(83)
ソフトウェア		▲アセンブリ言語ボード	▲インサートキットエミュレータ	▲Pascal(81)	▲C言語コンパイラ(82)	▲C言語コンパイラ(83)	▲C言語コンパイラ(84)
人型ロボット		▲TVチューナーGaAs(78)	▲TVチューナーGaAs(79)	▲TVチューナーGaAs(80)	▲TVチューナーGaAs(81)	▲TVチューナーGaAs(82)	▲TVチューナーGaAs(83)
CDROM		▲CDROM(78)	▲CDROM(79)	▲CDROM(80)	▲CDROM(81)	▲CDROM(82)	▲CDROM(83)
マイコン	▲16ビット MN1810(77)	▲4ビット MN1400(78)	▲32ビット TRON MN18400(79)	▲16ビット MN1800(80)	▲32ビット MN1800(81)	▲32ビット MN1800(82)	▲32ビット MN1800(83)
最新手法	レイアウト自動入力	機能自動入力	機能自動入力	機能自動入力	機能自動入力	機能自動入力	機能自動入力
パッケージ	挿入型(77)	挿入型(78)	挿入型(79)	挿入型(80)	挿入型(81)	挿入型(82)	挿入型(83)
生産プロセス	1.5 μm (77)	1.5 μm (78)	1.5 μm (79)	1.5 μm (80)	1.5 μm (81)	1.5 μm (82)	1.5 μm (83)
半導体集積回路	▲16ビット 8085/86 4 K DRAM	▲32ビット 80386 1 M DRAM	▲32ビット 80386 1 M DRAM	▲32ビット Pentium® 16 M DRAM	▲32ビット Pentium® 16 M DRAM	▲32ビット Pentium® 16 M DRAM	▲32ビット Pentium® 16 M DRAM
技術動向の大きな変化	家電用IC化	ビデオ	CD	ゲーム・パソコン	携帯電話	デジタル家電	デジタル家電
社会動向	高度化の要求(高エネルギー)						
テレビ		▲音声認識IC	▲音声認識IC	▲音声認識IC	▲音声認識IC	▲音声認識IC	▲音声認識IC
VTRビデオ	▲VTRビデオ	▲CD	▲CD	▲CD	▲CD	▲CD	▲CD
電話	▲携帯電話	▲携帯電話	▲携帯電話	▲携帯電話	▲携帯電話	▲携帯電話	▲携帯電話
パソコン	▲モニタボード	▲モニタボード	▲モニタボード	▲モニタボード	▲モニタボード	▲モニタボード	▲モニタボード

松下における半導体の開発は 1957 年のゲルマニウムトランジスタの開発に始まり、シリコンバイポーラトランジスタから MOS トランジスタへと変遷していった。また民生分野において当初のアナログ時代はテレビやビデオ用のアナログ IC、今日のデジタル家電時代に至ってはシステム LSI や化合物半導体デバイスなどを中心とした市場にあわせてソリューションを提供してきた。松下電器における半導体事業はセット事業と強固な連携によりセットの競争力を支える戦略的キーデバイスを核としてソリューションを実現するという使命を持っている。

図 4-15 に電子機器制御の変遷を示す。半導体の開発は半導体技術を用いて実現する電子機器(what)が要求性能とそれを実現する手段としての半導体 (How) の性能ギャップをいかに埋めるかの戦いであったと評している。しかしながら本研究の化合物半導体の事例で示したように、ビジネスの観点からするとギャップが埋まるまで待つわけにはいかず、そのギャップを容認した上で、その時点の技術でいかにビジネスを展開するかという視点が重要である。機器の頭脳であるシステム LSI はマイコン、DSP (digital Signal Processor)、メモリなどの半導体コンポーネントから構成され、半導体の集積化技術と共に機器制御、ソフト化を実現するキーテクノロジーである。表 4-2 に示すように松下電器はこのシステム LSI に開発を集中させるため、1990 年代後半から、単体メモリでなく、大容量の DRAM やフラッシュ EEPROM、FeRAM のようなメモリをロジックと混載するプロセスを開発してきた。これらのメモリをチップ上に搭載することで、外付けメモリの場合より、大幅な高速化と低消費電力化を実現するシステムオンチップ (SOC) の実現が可能となった。



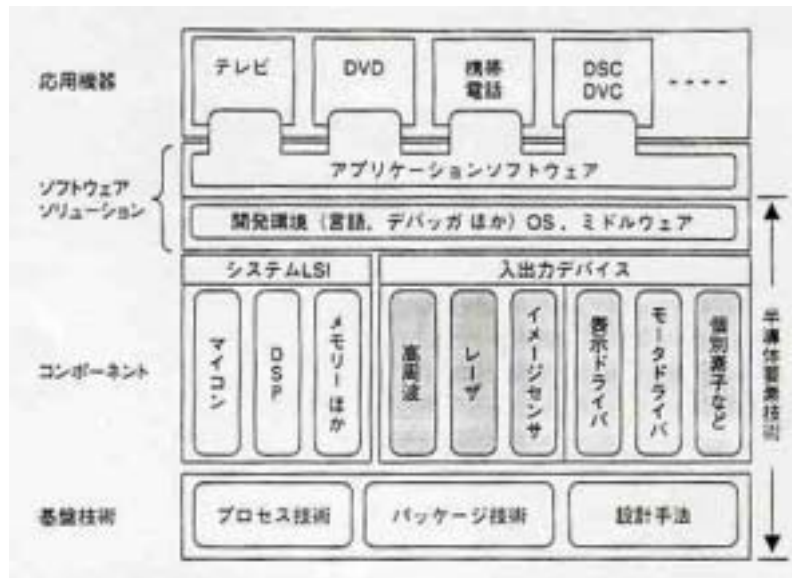
出典: Mtsushita Technical Journal Vol. 51 No.3 Jun. 2005

図 4-15 電子機器制御の変遷

表 4-2 松下電器における半導体プロセス開発の歴史

年	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005
ウェハー径 (mm)	50 75	100	150		200		300
リソグラフィ	コンタクト露光		g 線	i 線	KrF		ArF
加工	イオン注入	ドライエッチング			CMP		
Tr形成	CMOS	LOCOS		LOD	サリサイド	STI	Spikeアニール
配線	(Al) 配線		リフロー/SOG		CMP		Cu配線
バイポーラ IC (μm)	8	4	3	2	0.8	0.3	0.25
CMOS (μm)	6	4	2	1.2 0.8	0.5	0.35 0.25 0.18 0.13	90 nm
DRAM 搭載 (μm)			DRAM 搭載	1.2	0.7	0.5	0.35 0.25 0.18
フラッシュ 搭載 (μm)			フラッシュ 搭載			0.8	0.6 0.35 0.25
FeRAM 搭載 (μm)						0.8	0.18

出典: Mtsushita Technical Journal Vol. 51 No.3 Jun. 2005

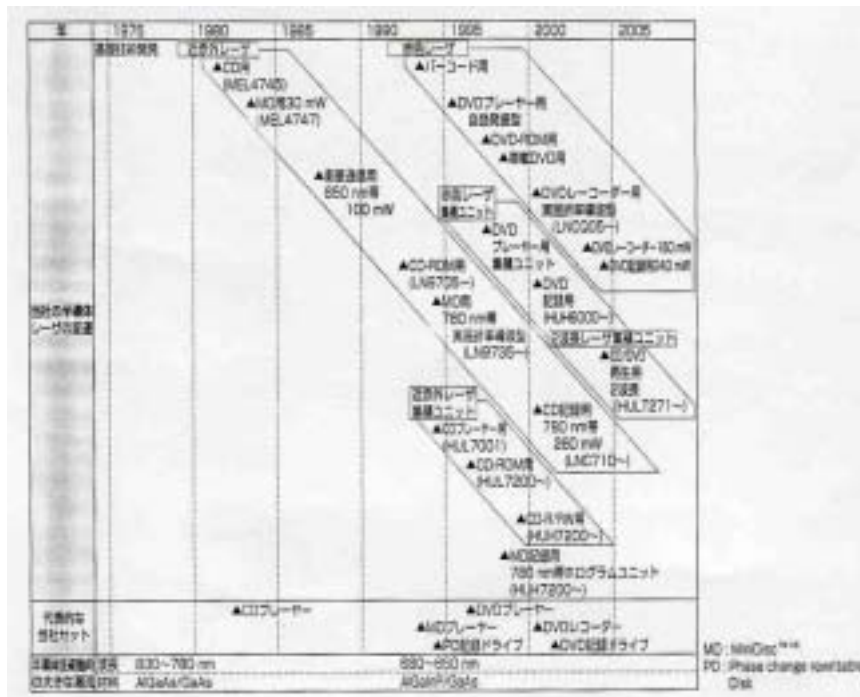


出典: Mtsushita Technical Journal Vol. 51 No.3 Jun. 2005

図 4-16 半導体ソリューションを実現する技術体系

このような中で化合物半導体は半導体トータルとしてソリューションを実現するための入出力のキーデバイスとして欠くことのできない位置づけにある。

表 4-3 松下電器のにおける半導体レーザー開発の歴史



出典: Mtsushita Technical Journal Vol. 51 No.3 Jun. 2005

表 4-4 松下電器のにおける高周波デバイス開発の歴史



出典: Mtsushita Technical Journal Vol. 51 No.3 Jun. 2005

このように化合物半導体はキーデバイスとしてシステム LSI と共に CD～DVD に至るまでの光再生記録機器や携帯電話などの戦略セットを支えてきた。

第 4 章の参考文献

- 1) Ntational TECHNICAL REPORT 1996 FEBRARY
- 2) S.Nagata, T.Ueda, A.Noma, H.Koizumi, K.Kanazawa, H.Ishida, T.Tanaka, D.Ueda, K.Kazumura, G.Kano, and C.P.de Arraujo, "A GaAs MMIC chip-set for mobile communications uSing on-chip ferroelectric capacitors," ISCC Dig.Tech. Papers, pp172-173, 1993
- 3) M.Nishituji, T.Uda, T.Yokoyama, K.Fujimoto, K.Nishii, M.Shibuya, M.Kitagawa, and
- 4) A.Tamura, "A new GaAs MMIC process technology uSing 0.5 μ m gate asymmetric LDD structure GaAs BP-MESFET combined with high-dielectric-constant thin film capacitors, " Semicond. Sci. Technol. vol. 10, pp1534-1540, 1995.
- 5) アーキテクチャルイノベーション ハイテク企業のジレンマの克服 田路則子
白桃書房
- 6) 技術革新と経済発展 弘岡正明 日本経済新聞社
- 7) 2004 年度 高知工科大「起業工学論」講義資料
- 8) Mtsushita Technical Journal Vol. 51 No.3 Jun. 2005

5章 化合物半導体におけるイノベーションの 経営学的考察

「イノベーション」という概念は J.A. シュンペーター（1912-1926）によって初めて、提唱され、定義として「新結合」であり、「経済発展理論 経済発展の原動力は技術革新」であるという捉え方をされた¹⁾。またイノベーションの形態について、以下の5つがあると述べている。財貨に関するイノベーション、生産方法に関するイノベーション、販路に関するイノベーション、原料・半製品の供給源に関するイノベーション、組織のイノベーション。それは技術のみではなく、これらの新結合を遂行することが、経済を発展させるとしている。「経済発展を生み出すような変化は経済体系の内部から生ずるものであり、それは体系の均衡点を動かすものであって、しかも新しい均衡点は古い均衡点からの微分的な歩みによっては到達し得ないようなものである。」と主張している。

これまでなされてきたいくつかの先行研究等²⁻⁵⁾も踏まえて、ここでイノベーションについて本研究テーマ関連付けて、その定義について筆者の視点でまとめてみた。イノベーションとはあるアイデア（技術、しくみ、手法など）を実現することにより、社会に大きなインパクトを与え、人々の考え方や生活に変化をもたらす、かつ経済的に効果を生み出すものをいう。イノベーションを図 5-1 に示すように、大きく3つに分けて考えた。1つは社会的なイノベーション。これは人々の願望や夢に起因するアイデアや概念であると考えられる。例えば離れた地点で、コミュニケーションが出来るシステムという概念が生まれ、これが具現化したものが、電話であり、無線通信である。さらに個人が、どこでも通信できるという夢を実現したものが、今日の携帯電話である。2つ目は技術におけるイノベーションであり、これはまさに技術によって何らかの課題を解決したり、アイデアを実現したりするための、アイデアであり、手段を提供するものである。また3番目としてイノベーションが経済的な効果を伴うという定義から、技術を事業化し、ビジネスに結びつけるための、ビジネスにおけるイノベーションが必要となる。これはいかにビジネスとして発展させるかというアイデアとそれに基く、戦略と実現手段からなるものである。社会におけるイノベーション（ニーズ志向）及び技術におけるイノベーション（シーズ志向）いずれのみでもイノベーションは成り立たない。その社会におけるイノベーションと技術におけるイノベーションを結びつけるものがビジネスにおけるイノベーションである。全てにおいてイノベーションの源はアイデアや概念などの人間の想念やイメージから始まるといっても過言ではない。アイデアや概念、それらを実現するための手段、実現されたものや、形を総称してイノベーションと呼ぶ。

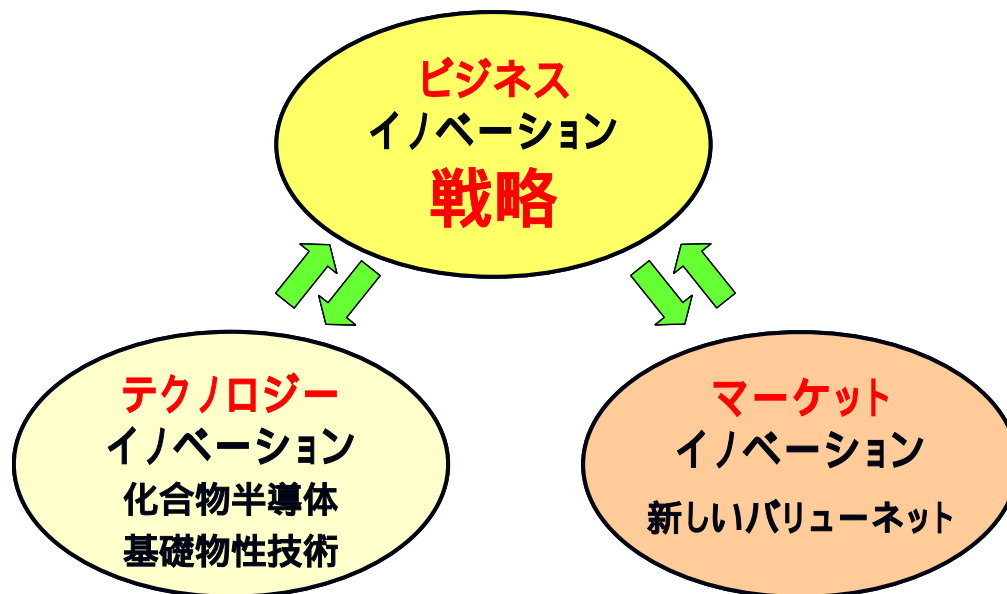


図 5-1 3つのイノベーション

5-1 異文化イノベーション

多様性の創造

シリコン半導体は単一の元素で構成されるため、単一の物性を示すのに対し、化合物半導体は複数の元素から構成されるため、その組み合わせによって個々の構成要素である単体の元素に無い物性を生み出すことができる。さらに複数の化合物を接合させることにより、ヘテロ接合が生まれ、多様な性質、機能を実現することができる。まさに化合物半導体自体がイノベーションそのものといえる。その違いにより、技術経営戦略的にも異なる方向性を持って発展を遂げてきた。シリコンについては大きく分けると2つの方向があり、1つは単体のメモリやマイコンのようにある一定の機能を実現し、それをいかに量産により単価を下げで行くかが、重要であり、「コモディティー・テクノロジー」と呼べる。もう一つは、システムLSIやSOC(System On Chip)に代表される様に求められる非常に複雑で高度な機能をソフトウェアの組み込みという形態により、1チップで実現するいわゆる「ソリューション・テクノロジー」と位置づけることができる。システムLSIは製品寿命も短いため、カスタム品をいかに短TAT(Turn Around Time)でユーザーに提供できるかが1つの大きな課題である。これらの発展を支えてきた技術としては、トランジスタの微細化と集積化とソフトウェアとの統合化である。ムーアの法則⁶⁾で示されたように、世界的に共通のロードマップという形でターゲットを設定し、その実現に向けて、技術開発を行ってきた。今日では実現の限界を指摘されながらも、そのたびに、イノベーションに

より、壁を打ち破り、限界が伸びてきている。微細化について例をとるとトランジスタのゲート長が $0.1\mu\text{m}$ 以下の領域にまで、到達しようとしている。これも1つには材料が単一であったがゆえに最終的には安定に微細化、大規模な集積化技術の確立が可能であったと考えられる。シリコン半導体に対して、筆者は化合物半導体を「ダイバーシティー・テクノロジー」と表現した。多様性ということがその大きな特徴として捉えることができる。化合物半導体は元素の組み合わせによって、個々の構成元素にはない全く新しい、性質が発現するため、まずは材料開発＝結晶の開発から始まる。組み合わせにより形成した化合物を一定の組成で組み合わせることにより、新たな混晶材料を生成することが可能である。またさらにこれらの化合物やその混晶を組み合わせることにより、ヘテロ接合が形成することができる。これらの組み合わせを変えることにより、高周波とランジスタに求められる高電子移動度を実現する構造や発光ダイオードやレーザーのように光る特性を作り出すことやさらに材料や混晶の組成を帰ることでその発光波長を変化させることも可能である。

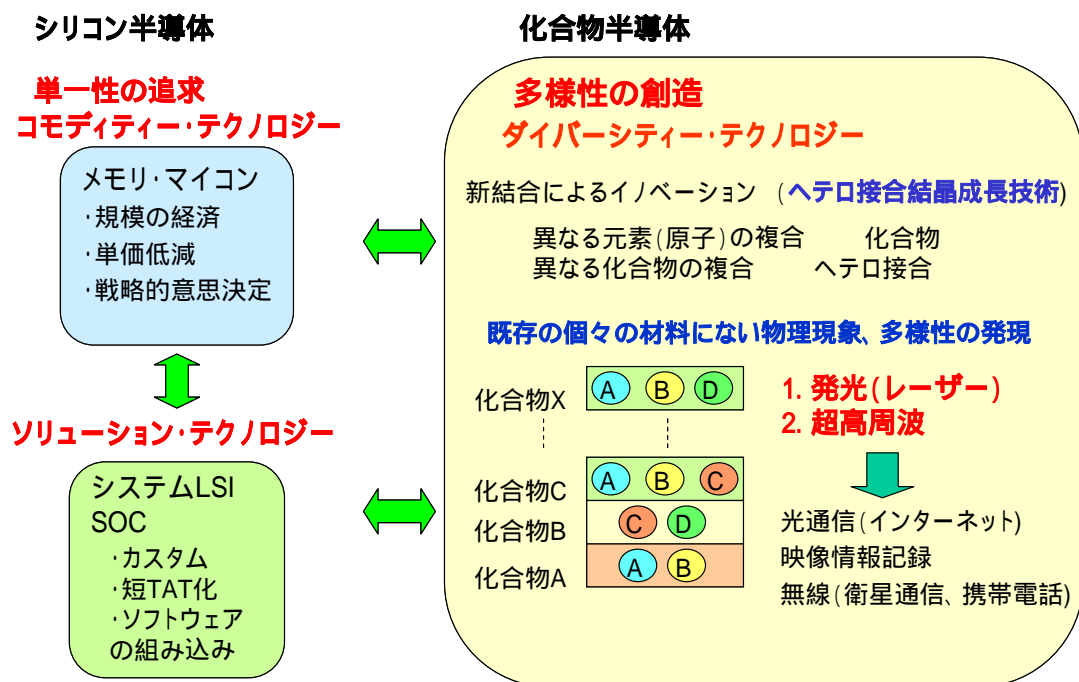


図 5-2 シリコン半導体と化合物半導体の比較

逆に単一で非常に安定な元素であるシリコン半導体に対して、元素が複合されているが故の弱みもある。すなわち安定性、不均一性、特にシリコンと比較すると2種類以上の未結合手を有する原子が表面に存在するため、界面制御が困難であり、不安定な面がある。またシリコン自体の融点も1000以上と高く、強固な共有結合であるのに対し、化合物半導体を構成する元素は融点が低く、イオン性結合であり、一部の化合物半導体を除いて分解

温度も 1000 以下である。そのため個々のトランジスタの特性ばらつき制御による均一化が難しく、微細化によって大規模な集積化を行うことは非常に困難な技術であった。化合物半導体デバイスの開発初期、材料及びヘテロ接合による高性能化、超高速動作が可能なことから、シリコン半導体 が用いられたロジック、メモリ、マイコン、LSI 等のデジタル分野等も化合物半導体デバイスで置き換わるというポストシリコンの議論も業界でも交わされた。 GaAs FET を用いた S-RAM やロジック IC の研究開発を行ったが最終的には、シリコンデバイス分野の技術革新が予想以上に著しく、化合物半導体トランジスタは集積化が困難であることから、一部の用途を除いて、事業化には至らなかった。しかしながら、シリコン半導体との棲み分けが図られ、化合物半導体は光、及び超高速、超高周波の分野へと発展していった。化合物半導体の特性を活かし、シリコンでは実現できない発光受光素子としての応用や単体もしくは小規模な IC という形態で超高速、超高周波動作が必要なアプリケーションへの応用として棲み分けが行われ今日に至った。

バリューネットワークについて

化合物半導体についての考察を行う前に、先行研究についてまとめる。

クレイトン・クリステンセンはその著書「イノベーションのジレンマ」⁷⁾において「イノベーション」とは「技術」の変化、すなわち組織が労働力、資本、原材料、情報を、価値の高い製品やサービスに変えるプロセスの変化を意味するとしている。イノベーションには2つあると述べており、1つは主要市場のメインの顧客がこれまで評価してきた性能指標にしたがって、既存製品の性能を向上させる「持続的イノベーション」である。もう一つは従来とまったく異なる価値基準をもたらす、短期的には製品性能を引き下げる「破壊的イノベーション」である。破壊的イノベーションにより生み出された製品の特徴として以下を挙げている。

- 1．通常、シンプルで低価格、利益率が低い。
- 2．最初に製品化されるのは新しい市場や小規模な市場
- 3．大企業にとっての最も収益率の高い顧客は破壊的技術を用いた製品を求めず、また当初は使えない。

破壊的イノベーションを 2 次元のグラフで表し、縦軸が製品の性能、横軸が時間を表している。「元モデルの二つの次元、時間と性能が、顧客が製品やサービスを購入し、使用する、特定の用途、市場を定義する。この用途と顧客の集合は、幾何学的には競争と消費が行われる。一つの平面に属する。」と述べておりこの平面を「バリューネットワーク」と呼んだ。さらに著書「イノベーションの解」⁷⁾においては、破壊的イノベーションには 2 種類あると述べており、これを説明するため、破壊的イノベーションのグラフに第 3 軸を加えている。縦軸は製品性能、横軸は時間と 2 次元の場合と同様であるが、新しい顧客や消費が行われる新しい環境を示している。2 種類のうち 1 つはこの第 3 次元に新しいバリューネット

ワークを生み出す破壊で「新市場破壊」と呼んでいる。

これは「無償費」に対抗するもので、その製品の性能の向上と共に主流市場の顧客を新しいバリューネットワークに引きだすようになる。もう1つは「ローエンド型破壊で主流のバリューネットワークのローエンドに端を発するものである。

ここで本研究の化合物半導体についてバリューネットワークの考えに照らして考察を行った。その結果、化合物半導体の場合はこれまでに無い形のイノベーションが行われてきたと言える。主流のシリコン半導体に対して、化合物半導体は、光ということや超高速、高周波動作という、全く新しい異なる性能軸を実現した。その点では新市場破壊型であるといえる。化合物半導体のトランジスタについて考えてみると開発当初は高周波動作は従来のシリコン軸上にもあった。しかし物性限界が見えてきたことや、逆に化合物半導体も当初ポストシリコンとして集積化、高速ロジック LSI を目指したが、安定な大規模集積かが困難であり、双方とも限界がわかり、性能軸の明確化、棲み分けがなされた。情報通信やデジタル家電もおけるセットを考えると、化合物半導体もシリコン半導体も一方のみでは価値が小さく、2つがセットやシステムにおいて融合して初めて大きな価値を生み出す。すなわち双方無くてはならない存在でレーザーや高周波デバイスとシリコンロジック～システム LSI があって初めて従来にない価値の高い製品を実現している。

化合物半導体デバイスにおけるバリューネットワークは競合する、独立した異なる2つの平面ではなく、2つの平面、もしくはレーザーと、電子デバイスを異なる平面上で捉えると、共生関係にある3つの平面が一体となった「立体的バリューネットワーク」を形成していると考えられる。一方、化合物半導体とシリコンの融合により実現したセット商品という観点からは、新たな消費、市場を生み出し、新しいバリューネットワークを生み出す、クリステンセンによる新市場破壊型のイノベーションに当てはまると考える。例えば、携帯電話などは移動体電話や自動車電話として存在していたが、コストも高く、ごく一部のユーザーのみが使用していた。携帯電話の実現により固定電話という主流市場から最終的に新市場に移行させた。これまで示してきた事例からもマーケットにおけるイノベーションを実現する、または技術のシーズからビジネスを生み出していくには、戦略を核とするビジネスにおけるイノベーションが非常に重要である。

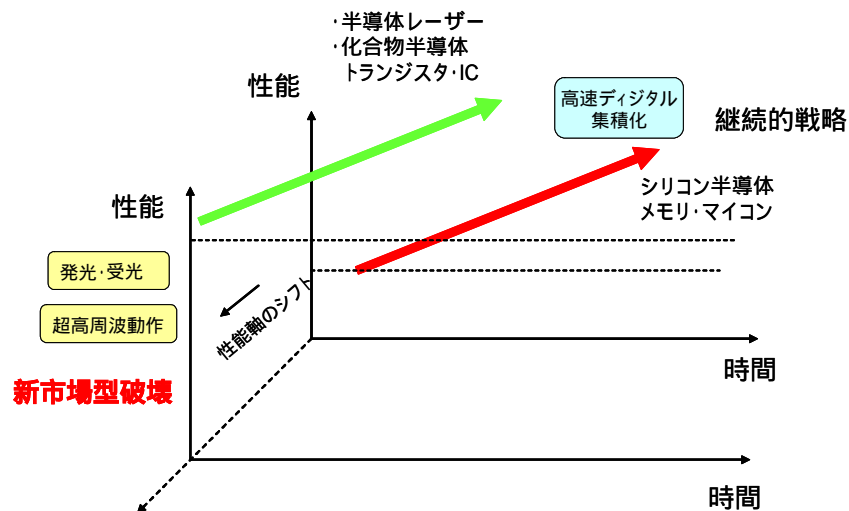


図 5-3 シリコン半導体と化合物半導体の新たなバリューネットワーク

5 - 2 異文化イノベーションのインテグレーション経営モデル

- ヘテロジーニアスインテグレーションモデル

本研究を通じて、イノベーションの過程において、異文化同士の接触がひとつの大きな役割を果たしている事を事例によって見出した。その考察を基に異文化イノベーションとさらに複合化した、ヘテロジーニアスインテグレーションモデルを提唱した。図 5-4 にヘテロジーニアスインテグレーションモデルの概念図を示す。別の見方をすると図 5-5 に示すように、単一の文化の中で発展してきた技術が、他の異なる文化を持つ技術と接触することにより、ある活性化エネルギーを得て、イノベーションへと発展するケースが挙げられる。さらに単一の文化が複数、複合、融合することによってイノベーションが生まれる事を見出した。

松下における化合物半導体の開発環境において以下に示すような共通のプラットフォームの中で組織内部において異文化が混在しており、それらが組織内外で接触する状況下にあった。

共通の技術プラットフォーム（化合物半導体）

化合物半導体材料： InGaAs、GaInAsP 等

結晶成長技術： MBE、MOCVD

評価技術： 構造解析（SEM）、結晶評価（XRD、TEM）

電気的評価（ホール測定、C-V 測定等）、光学的評価（PL、RAMAN 等）

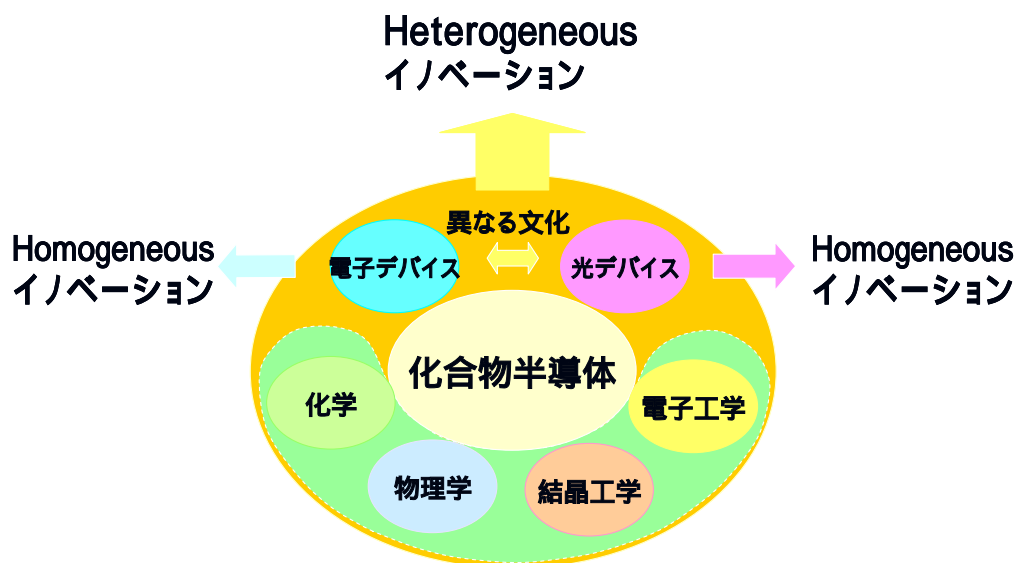


図 5-4 ヘテロジニアスインテグレーションモデル

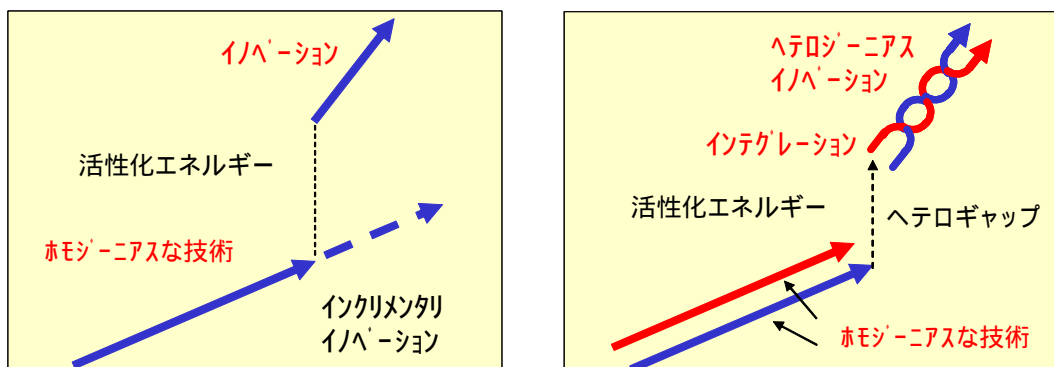


図 5-5 ヘテロジニアスインテグレーションモデル

第4章で述べた2つの事例について検証を行った。1つはホログラムユニットの例で、課題に対して化合物から見るとシリコンという異文化の開発を経験した組織内の技術者によってシリコンのミラーを使うというアイデアがもたらされ、イノベーションへと発展した。もう1つの事例はレーザードライバであり、これは共通のプラットフォーム上の異なる光デバイスと電子デバイスの文化が技術者という接点を通じて融合した事例である。同一の組織内で異なる分野に属する技術者が交流する場合、技術者としての純粋な興味として

の交流する場合と事前に何らかの課題を解決したいという明確な意図を持った接触する場合がある。その際に異質な視点や考えに触れ、ディスカッションを行っていく中で理論的考察と理論構築によりまた時にはセレンディピティー的に新結合、コラボレーションが生まれ、新たな価値が創造される場合がある。すなわち、異なる文化の中に存在した個々のホモジーニアスな技術同士の接触と融合によりヘテロジーニアスなインテグレーションが生まれる。

異文化の存在と接触の機会

ターゲットアプリケーションにおける文化

光デバイス： 発光効率、信頼性向上

電子デバイス：高速性、高周波性能の追求

要素技術分野における文化（ = 技術者のバックグラウンド）

電子工学、物理学、化学（有機、無機）

システム工学、情報工学（ソフトウェア）

他の分野（ 、 の複合したもの）

社内の他の部門（ 、 の複合）

部門の協力：タスクフォース、全社横断プロジェクト

同業他社、他の研究機関

学会、研究会、共同研究、開発、国家プロジェクト

アライアンス、合併、吸収

他国の文化（ ~ の複合）

外国人招聘研究員

海外留学、海外研究機関業務経験者

学会、研究会、共同研究、開発、公的プロジェクト

アライアンス、合併、吸収

ここで知識の創造という観点から考察を行う（9-11）。野中郁次郎、紺野登は共著、「知識創造の方法論」の中で、「日本人は現象の本質を洞察し概念化するコンセプト創造力が弱い」述べている。そのような中であって、化合物半導体の本研究事例ではそれがまさにコンセプト創造力が発揮、実践されイノベーションに結びついたものといえる。知識の創造モデルとして 共同化 表出化 連結化 内面化の4段階の過程を示している。これら「 ~ が螺旋状の循環プロセスとして動的に知識創造のスパイラルによってとらえる必要がある」としている。

企業における新たな知識創造のプロセス及び形態として以下の4点を挙げている。

コンセプト創造

戦略シナリオの策定

ビジネスモデルのデザイン

イノベーション

ナレッジワーカーによって暗黙知の共同化から表出化により形式知へ移行し、言語化により組織共有可能となる過程を示している。また個々の形式知が戦略的、分析的統合することで実践知となるとしている。総合の知については多面体な知識からいかに全体知を新たに構成するかについて述べられている。立体の各面は矛盾や対立を内包している事を前提に、新たな関係を生み出すことが総合である。

整理一貫させる。まとめる（インテグラル/積分）

化学的結合（融合、異化を伴う） 次元は維持

相乗効果

弁証法的統合：交互に矛盾する定立と反定立とを「止揚すること」

ここで弁証論的综合とは正反としてみていたものを角度を変えたり、壊してみたりする方法論とされている。

またコンセプトを創っているとアイデアが思いつきでボンと出ることがある。

「対話とは知識がより研ぎ澄まされていく過程である」と述べられている。

さらに「暗黙知から形式知に変化するには経験という変容のエネルギーの介在が必要」とされている。これらと本研究で取り上げた事例を比較すると本研究のヘテロジーニアスインテグレーションモデルにおいては異文化の接触により、活性化エネルギーを得てイノベーションが起こる点においては同様であるが、経験のみでなく2つ以上の異なる文化そのものが接触し、議論や理論構築により新結合を起こすためのエネルギーが発生し、ある一定の閾値をこえることでイノベーションが起こる点で異なる考える。

5 - 3 化合物半導体の R&D における ROI の考察

化合物半導体事業化の過程においていくつかの共通するモデルが見出した。第4章の衛星放送に対するUHFチューナーの実用化事例と光通信に対する光記録用短波長高出力レーザーの開発事例に共通する戦略である。新たな技術を研究開発から、実用化に結び付ける過程において、そのアプリケーションが明確でない場合、もしくは市場を含めてビジネスのターゲットは明確であるが、現状の技術ではすぐに要求される性能を満たすことが困難な場合、もしくは情報通信などのインフラにかかわる事業の場合で、実施までに長い期間がかかる場合がある。今日の激しい技術開発競争においても、全く新しい材料や原理を用いて、実用レベルの技術に仕上げていくには長い年月を要する。そのような状況下で、最終的にビジネスを成功させるにはまずは技術自体を存続させデスバレイに入れれないこと

が重要である。企業における研究開発は利益の追求がひとつの大きな目的であるため、投資に対して一定の期間での回収、ROI（Return of Investment）が求められる。その点において、技術の本質を見極め、その時点の未成熟な技術レベルにおいても既存技術に対する優位性、新たな価値を製品に付加できるアプリケーション、市場を探索し、たとえそれがニッチな市場であっても、参入、事業化を行うことが重要であると考え。事業と並行して更なる研究開発により技術の向上を図り、最終ターゲット市場で要求されるデバイススペックを満足するレベルまで発展させ、ビジネスの拡大を図る戦略が見られた。

化合物半導体の開発において黎明期は明確な用途やターゲットとするアプリケーションが無い状態で研究開発が進められ、その中でデバイスの実現及び性能の向上に伴ってターゲットが明確化してきた一面がある。ターゲットが見えてきた場合でも、初期においてはアプリケーションがデバイスに要求するスペックとその時点でのデバイス性能が大きく乖離している状態が存在した。最終的にはシーズとニーズが合致しビジネスへと発展していった。

化合物半導体とシリコン半導体ビジネスにおける投資の違いについて

シリコンの工場を建設するには最新の 90nm-65nm の世代で 2000 億円以上の投資が行なわれている。超微細化、集積化、大口径、均一化 高歩留まりを実現するためのプロセス装置や管理システムへの投資が大きな割合を占める。限られた装置メーカーの装置（機種）が業界で標準となっているケースが多々ある。それに対して化合物の場合は約 1/10 程度の規模である。比較的小規模な投資で市場を開拓し、短期で回収するという戦略をとることが可能である。従って投資に対するリスクがシリコン半導体に対して少なく済む。また、シリコン半導体はそのプロセス世代毎に装置が必要となる場合が多いが、化合物半導体においては汎用性が高く、古い世代のシリコン装置の転用や、10 年以上前の装置で生産も十分可能なケースが多く、その面でも設備投資は有利である。これらの点から、今日のデバイスに要求される多様化に対応しやすく、ビジネスの創出のチャンスを増やすことができる。しかしながら、化合物半導体においては、同じプロセス工程に使用する装置であっても、たとえば光デバイスと電子デバイスでは要求される装置の性能も大きく異なる。さらに化合物半導体で最も重要な結晶成長装置においては、特に結晶成長技術やプロセス技術が確立していない黎明期には各社が独自の工夫を凝らしたノウハウの固まりであった。そこに差別化技術が存在した。プロセス技術においても電子デバイス（GaAs IC）と光デバイス（レーザー）では大きく異なり要素技術やプロセスについても多様性が反映されていた。

バリューチェーンについて

バリューチェーン（価値連鎖）という考え方は1985年にハーバードビジネススクールのマイケル・E・ポーターが提唱したものである^{12, 13)}。企業内における活動は 購買、製造、出荷、販売・マーケティング、サービスという5つの主要活動と 管理、人事・労務、技術開発、調達という4つの支援活動からなると述べている。その個々の活動が付加価値にどのように寄与しているかを分析することが可能なツールである。この手法を用いることで、自社の他社に対する競争優位性や、付加価値の源泉がどこにあるかという事を明確にすることができる。その結果を基に、新たなビジネスモデルの構築やアライアンスやアウトソーシングなどのビジネス戦略を考える判断材料となる。このバリューチェーンの視点から化合物半導体事業の場合について考察を行った。化合物半導体においてはまさに上流のデバイス及びそのコンセプトと設計、下流のサービスに価値の源泉が存在しており、スマイルカーブを示している。サービスにおいて市場を見ることで上流のデバイスコンセプトへと結びつく。サービスの部分を営業ではなく、技術者自らがその役割の一端を担うことで、市場を把握し、さらに高い付加価値を生み出すデバイスの開発を行ってきた。化合物半導体が実用化された初期の段階ではそのキーテクノロジーである結晶成長技術が確立されていなかった。デバイスメーカーとしてはアプリケーションに応用可能なデバイスを実現することがターゲットであり、世の中で結晶成長技術が未熟な状況でも、デバイス開発のため結晶成長技術が必要であった。第4章の事例でUHF帯テレビジョン用MMICの事業化において電機メーカーであるため、技術の蓄積もノウハウもほとんど無い状態であり、エピ基板の製造を専門メーカーに委託することで、いち早く事業化を実現してきた。自社で独自開発をすると時間がかかり開発が遅れる。またホログラムユニットの事業化においてもレーザーのエピは専門メーカーに共同開発という形で、委託しており、ホログラムなどの光学設計は他社とのアライアンスによりコストを抑え、効率的に目標となるデバイスを実現し、いち早く事業を創出してきた¹⁴⁾。

第5章の参考文献

- 1．経済発展の理論 上・下 J.A.シュンペーター 岩波書店 （1977）
- 2．イノベーションと起業家精神 上・下 P. F. ドラッガー ダイアモンド社 （1997）
- 3．技術経営入門 藤末健三 生産性出版 （1999）
- 4．技術経営論 藤末健三 生産性出版 （2005）
- 5．イノベーション・マネジメント入門 一橋大学イノベーション研究センター[編]
日本経済新聞社 （2001）
- 6．Moore, G. E. , “ Are We ready for VLSI? ” Proc. Caltech Conference on VLSI , January

1979, pp.3-14

- 7 . イノベーションのジレンマ クレイトン・M. クリステンセン 翔泳社 (2001)
- 8 . イノベーションの解 クレイトン・M. クリステンセン 翔泳社 (2003)
- 9 . 知識創造企業 野中郁次郎 竹内弘高 東洋経済 (1996)
- 10 . 知識創造の方法論 ナレッジワーカーの作法 野中郁次郎 紺野登
東洋経済 (2003)
- 11 . イノベーションの本質 野中郁次郎 勝見 明 日経 BP (2004)
- 12 . 競争の戦略 マイケル・E・ポーター ダイヤモンド社 (1982)
- 13 . 競争優位の戦略 マイケル・E・ポーター ダイヤモンド社 (1985)
- 14 . アーキテクチャルイノベーション ハイテク企業のジレンマの克服 田路則子
白桃書房 (2005)

6章 結論

化合物半導体事業におけるイノベーションの過程について考察を行った。これまで化合物半導体の実用化が、社会変革をもたらし、大きな経済波及効果も生み出すいくつかのイノベーションを実現してきた。今後もユビキタス社会の実現に向けて情報通信、マルチメディア技術を支える化合物半導体は、より重要な役割を果たすことが予想される。化合物半導体自体が異なる元素同士を組み合わせ、さらにヘテロ結合を作り出すというまさに新しい結合により、さまざまな機能を実現可能な多様性を有するダイバーシティー・テクノロジーであり、イノベーションの源泉そのものである。その発光や超高速・高周波での動作という特徴から、既存のシリコン半導体のバリューネットワークとは異なる性能軸を生み出し、新たなバリューネットワークを構築した。しかしながらこれらの2つのバリューネットワークは独立、競合関係にあるものではなく、共生関係にあり、2つの技術の融合によって、光記録や光通信、無線通信において大きなビジネスを生み出してきた、いわゆる1つの立体的なバリューネットワークを形成している。またその事業化の過程においてはいくつかの共通するモデルが見出された。ニッチで事業化し、メジャーへ展開するモデルとそのイノベーションの過程において、異文化同士の接触がひとつの大きな役割を果たしている事について事例を基に検証を行った。その考察を基に異文化イノベーションとさらにそれらを複合化した、ヘテロジーニアスインテグレーションモデルを提唱した。単一の文化の中で発展してきた技術が、他の異なる文化を持つ技術と接触することにより、ある活性化エネルギーを得て、イノベーションへと発展するケースが挙げられる。さらに単一の文化が複数、複合、融合することによってイノベーションが生まれる事を見出した。化合物半導体において考察を行ったものであるが、本モデルは他の技術分野においても適用が可能である。さらに一つの技術のシーズが事業として発展し、社会的なイノベーションに発展するには、技術的なイノベーションのみでは、成し得ず、そこには、ビジネスにおけるイノベーション、すなわち戦略の介在がキーとなる。ユビキタス社会の実現に向けて、化合物半導体はひとつのキーデバイスであり続けると考えられる。今後、ビジネスとして発展させて行くには本研究のダイバーシティー・テクノロジーとヘテロジーニアスインテグレーションモデルの観点から以下の視点が必要であると考え。

- ・化合物半導体のみでなく、シリコンデバイスも含め、高周波、セットの観点でベストソリューションを提供。

- ・セットやシステムの高機能化に伴い、シリコン LSI 制御等技術との融合による、ソリューションを提供。

今後のイノベーションの可能性

- 1．原子の組み合わせによる新たな物性を用いた新しいデバイスの開発
- 2．化合物半導体を用いることで実現可能な新しいシステム、応用の模索
- 3．新テクノロジー（MEMS、マイクロマシン等）との融合による高付加価値化

化合物半導体技術を次元の高いものへと発展させ、ビジネスとしてさらに大きく発展させるためには、これまでにない新たな文化をもつ技術との接触、融合がキーとなると結論づける。

謝辞

本論文を完遂するにあたり、本研究を始める契機を与えて頂くと共に、本研究に対して終始、懇切なご指導とご鞭撻を賜りました高知工科大学起業家コース、教授 加納剛太 博士に厚くお礼申し上げます。本論文を作成するにあたり、ご指導、ご高配を賜りました、高知工科大学総合研究所 マテリアルデザインセンター センター長 山本哲也 博士、起業家コース客員教授 濱口智尋 博士、起業家コース教授 富澤治 博士、起業家コース教授 平野真博士に深謝致します。

本研究の技術に関する大部分は松下電器産業においてなされたものであり、本研究の機会を与えて頂くと共に御指導、御鞭撻を賜りました工学博士 上田大助 半導体デバイス研究センター所長に深く感謝致します。本研究における化合物半導体の研究開発において、暖かい御指導と御鞭撻を賜りました旧半導体研究センター 元光半導体研究所所長 梶原孝生様、元光半導体研究所所長 小沼毅様、元光半導体研究所所長 稲田雅紀様に深く感謝いたします。本研究におきまして多大なご支援を頂きました石黒永孝 ディスクリート Bu 長に深謝致します。

本研究の第3章の技術における研究開発におきまして、長年に亘り、御指導、御鞭撻を賜りました工学博士 井上薫 参事に深く感謝致します。また研究を遂行するにあたって御指導、ディスカッションを行って頂きました工学博士 西井勝則 チームリーダー、工学博士 石川修 グループマネージャー、工学博士 田村彰良 室長、反保敏治 参事、工学博士 大田順道 グループマネージャー、工学博士 田中毅 グループマネージャーに深謝致します。

また招聘研究員として松下電器において約2年間、共に研究を推進したDr. J. C. Harmand 氏には多大なご協力を頂き深く感謝致します。本研究を進めるにあたって元半導体研究センター、元松下電子工業 電子総合研究所、現半導体デバイス研究センターにおきまして 多大なご協力とご助言を頂きました正戸宏幸 チームリーダー、工学博士 柳原学 主任技師、龍治 彰 主任技師、酒井啓之 チームリーダー、西辻充 参事、池田義人 主任技師、田邊充 主任技師、工学博士 按田義春 主任技師、足立千夏様、神田敦彦様、柏木昇様に厚く御礼申し上げます。SiGe パワーデバイスの共同研究開発において多大な御協力を頂きましたアナログ LSI Bu の 清水啓一郎様、澤田茂樹チームリーダー、ディスクリート Bu の 豊田泰之 主任技師、曽根高真一 主任技師、岩元伸行 チームリーダーに深く感謝いたします。

また現在の多忙な業務の中、本研究をまとめるにあたって、御理解と暖かい御支援を頂きました嶋田恭博グループマネージャー、小野澤和利チームリーダーに深謝いたします。

高知工科起業家コースの秘書室、マテリアルデザインセンター センター秘書室、学生の皆様には大変お世話になりましたことを感謝申し上げます。

最後に日頃から筆者を支えてくれ、本研究をまとめることに理解を示してくれた家族に深く感謝いたします。

研究業績

筆頭論文

- (1) T. Matsuno, K.Nishii, K.Inoue, "Growth and properties of N-AlGaAs/InGaAs selectively-doped Single- and double- heterojunction FET structures", Journal of Crystal Growth 95(1989) pp.390-393
- (2) T. Matsuno, A. Kanda, T. Tanaka, "Power Amplifier Using Combined SiGe HBTs with and without Selectively Ion Implanted Collector", IEICE TRANSE. ELECTRON. VOL. E86-C, No.10 OCTOBER 2003

国際学会

- (1) Toshinobu Matsuno, Hiroyuki Masato, Akira Ryoji and Kaoru Inoue, "Mobilities of a 2 dimensional electron Gas in pseudomorphic and strain-free InAlAs/InGaAs HEMT structures", Inst. Phys.Conf. Ser. No129 (1992) pp.729-734
- (2) Toshinobu Matsuno, Katsunori Nishii, Shinichi Sonetaka, Yasuyuki Toyoda, Nobuyuki Iwamoto, "RF Power characteristics of SiGe Heterojunction Bipolar Transistor with High Breakdown voltage structures". IEEE MTT-S International Microwave Symposium 2002
- (3) Toshinobu Matsuno, Atsuhiko Kanda, Tsuyoshi Tanaka, "Power Amplifier Using Combined SiGe HBTs with and without Selectively Ion Implanted Collector", **Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics** (TWHM 2003)

国内学会

- (1) 松野年伸 井上薫 小沼毅「SD-DH 構造の電気的特性のウェル幅依存性」
第 34 回応用物理学会学関係連合講演会（早稲田大学）講演予稿集 29p V-10 p825
(1987)
- (2) 松野年伸 井上薫 小沼毅「InGaAs/AlGaAs SD-DH 構造の MBE 成長」
第 48 回応用物理学会学関係連合講演会（名古屋大学）、講演予稿集、17a ZB-2 p783
(1987)
- (3) 松野年伸 井上薫 小沼毅「InGaAs 歪層を用いたヘテロ接合 FET の MBE 成長」
第 35 回応用物理学会学関係連合講演会（法政大学）、講演予稿集 31a P 4 p293
(1988)
- (4) 松野年伸 井上薫 「InGaAs 歪単一量子井戸の PL 測定による評価」
第 49 回応用物理学会学関係連合講演会（富山大学）、講演予稿集 6a C 5/III p998
(1988)

- (5) 松野年伸 J. C. Harmand 井上薫 「逆 HEMT 構造の電気的特性への成長中断効果」
第 36 回応用物理学会学関係連合講演会 (千葉大学)、講演予稿集 3aS2/III p1029
(1989)
- (6) 松野年伸 J. C. Harmand 井上薫「GaAs 基板上への InGaAs/InAlAs HEMT 構造の MBE
成長」第 50 回応用物理学会学関係連合講演会 (福岡工業大学)、講演予稿集 30a Y 8/I
p323 (1989)
- (7) 松野年伸 J. C. Harmand 井上薫「GaAs 基板上への InGaAs/InAlAsHEMT 構造の
MBE 成長 (II)」
第 37 回応用物理学会学関係連合講演会 (東洋大学)、講演予稿集 29pT 8/I p243 (1990)
- (8) 松野年伸 J. C. Harmand 井上薫 「MBE 成長 InGaAs 表面の In Situ 評価」
第 51 回応用物理学会学関係連合講演会 (岩手大学)、講演予稿集 28a W 11/I p294
(1990)
- (9) 松野年伸 J. C. Harmand 井上薫 「GaAs 基板上への InGaAs/InAlAs HEMT の電気的
特性」第 51 回応用物理学会学関係連合講演会 (岩手大学)、講演予稿集 27a SZM 10/III
p1136 (1990)
- (10) 松野年伸 井上薫「InGaAs/InAlAs ヘテロ構造へのオーミックコンタクト検討」
第 38 回応用物理学会学関係連合講演会 (東洋大学)、講演予稿集 30a K 8/III p1172
(1991)
- (11) 松野年伸 正戸宏幸 井上薫「歪層及び歪緩和した InGaAs/InAlAs HEMT 構造の
電気的特性」
第 39 回応用物理学会学関係連合講演会 (日本大学)、講演予稿集 29a ST 19/III p1137
(1992)
- (12) 松野年伸 龍治彰 正戸宏幸 井上薫
「InGaAs をエッチングストッパーに用いた選択リセスエッチングの検討」
第 53 回応用物理学会学関係連合講演会 (関西大学)、講演予稿集 19a ZA 5/III p1170
(1992)
- (13) 松野年伸 田邊充 柳原学 酒井啓之 田村彰良 井上薫、
「UV リソグラフィ - を用いたサブクォ - タ - ミクロンゲート AlGaAs/InGaAs HEMT」
情報通信学会 信学技報、ED95-104 (1995)

共著論文、国際学会

- (1) K. Inoue, K. Nishii, K. Bando, A. Tezuka, T. Matsuno and T. Onuma,
"A high transconductance AlGaAs/GaAs/AlGaAs selectively-doped
double-heterojunction
FET with Pd buried gate structure", Proceedings of SPIE 797 (1987) pp.327-334
- (2) K. Inoue, K. Nishii, T. Matsuno and T. Onuma, "Strained N-AlGaAs/InGaAs/N-AlGaAs

- selectively-doped double-heterojunction FET", IEDM Tech. Dig., (1987) pp.422-425
- (3) Katsunori Nishii, Koru Inoue, Toshinobu Matsuno, Akitoshi Tezuka, Takeshi Onuma, "High performance AlGaAs/GaAs/AlGaAs selectively-doped double-heterojunction FET and its application to digital ICs", Inst. Phys. Conf. Ser. No91 (1987) pp.657-660
- (4) Katsunori Nishi, Toshinobu Matsuno, Osamu Ishikawa, Hideki Yagita, Koru Inoue "Novel High-Performance N-AlGaAs/InGaAs/N-AlGaAs Pseudomorphic Double-Heterojunction Modulation-Doped FETs", Jpn. J. Appl. Phys. 27(1988) pp. L2216-L2218
- (5) J. C. Harmand and T. Matsuno, K. Inoue, "Lattice-Mismatched Growth and Transport Properties InAlAs/InGaAs Heterostructures on GaAs Substrate", Jpn. J. Appl. Phys. 28(1989) pp.L1101-1103
- (6) J. C. Harmand and T. Matsuno, K. Inoue, "InGaAs/InAlAs (Si) modulation doped Heterostructures intentionally lattice mismatched to InP substrate", Inst. Phys. Conf. Ser. No106 (1989) pp.195-200
- (7) J. C. Harmand and T. Matsuno, K. Inoue, "Room temperature electron mobility of 10500cm²/Vs in an InGaAs/InAlAs (Si) heterostructure grown on a GaAs substrate", Inst. Phys. Conf. Ser. No106 (1989) pp.177-182
- (8) J. C. Harmand and T. Matsuno, K. Inoue, "InGaAs/InAlAs (Si) modulation-doped heterostructures GaAs substrate" intentionally lattice mismatched to InP substrate, J. Appl. Phys. 66 (1989) pp.2633-2636
- (9) J. C. Harmand and T. Matsuno, K. Inoue, "Lattice mismatched growth of InGaAs/ InAlAs MODFET structures on GaAs", Proceedings of the 7th International Workshop on Future Electron Devices, Superlattice and Quantum Functional Devices, (1989) pp215-216
- (10) O. Ishikawa, K. Nishii, T. Matsuno, C. Azuma, S. Nanbu and K. Inoue, "Low-NOISE InGaAs HEMT USING the New Off-Set Reces Gate Process", 1989 IEEE MTT-S Digest. (1989) pp.979-982
- (11) Kaoru Inoue, Katsunori Nishii, Toshinobu Matsuno, "Charge control analysis and fabrication of high transconductance pseudomorphic InGaAs/AlGaAs double-heterostructure MODFETs", Inst. Phys. Conf. Ser. No106 (1990) pp.641-646
- (12) Kaoru Inoue, Toshinobu Matsuno, "Analysis of multi-subband transport in selectively-doped N-AlGaAs/GaAs and N-AlGaAs/InGaAs quantum-well structures", Inst. Phys. Conf. Ser. No112 (1990) pp.345-350
- (13) Jean-Christophe Harmand, Toshinobu Matsuno and Kaoru Inoue, "Photoluminescence of an InAlAs/InGaAs Quantum Well Structure Grown on a GaAs Substrate", Jpn. J. Appl. Phys. 29 (1990) pp.L233-L235

- (14) J. C. Harmand and T. Matsuno, K. Inoue, "In Situ Surface Roughness Analysis of InGaAs Layers Grown on GaAs by MBE", Extended Abstracts of 22nd Conf. on Solid State Devices and Materials (1990) pp.481-484
- (15) K. Inoue, J. C. Harmand and T. Matsuno, "High-quality $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InAlAs}$ modulation-doped heterostructures grown on lattice-mismatched on GaAs substrates", Journal of Crystal Growth, 111 (1991) pp.313-317
- (16) Hiroyuki Masato, Toshinobu Matsuno and Kaoru Inoue, " $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{InAlAs}$ Modulation-doped Field Effect Transistors on GaAs Substrates Grown by Low-Temperature Molecular Beam Epitaxy", Jpn. J. Appl. Phys.30(1991)pp.3850-3852
- (17) Edmund Woloak, Jean-Christophe Haramand, Toshinobu Matsuno, Kaoru Inoue and Tadashi Narusawa, " $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ resonant tunneling diodes on GaAs", Appl. Phys. Lett.59 (1991)pp.111-113
- (18) Kaoru Inoue, Toshinobu Matsuno, "Electron mobility in modulation-doped $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ and pseudomorphic $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ quantum-well structures", Phys. Rev. B-47 (1993) pp.3771-3778

特許出願リスト(筆頭分)

特開昭 63-160324 分子線エピタキシャル結晶成長方法
 特開平 01-74764 半導体装置
 特開平 01-143270 半導体装置
 特開平 02-252247 半導体装置の製造方法
 特開平 03-45600 半導体装置の結晶成長方法
 特開平 04-3943 半導体装置およびその製造方法
 特開平 04-365333 ヘテロ接合電界効果トランジスタ及びその製造方法
 特開平 04-369842 ヘテロ接合電界効果トランジスタ
 特開平 05-75095 ヘテロバイポーラトランジスタ及びその製造方法
 特開平 06-69222 ヘテロ接合バイポーラトランジスタ及びその製造方法
 特開平 07-183315 半導体装置及び半導体装置の製造方法
 特開平 09-153608 半導体装置の製造方法
 特開 2000-216169 ゲート電極形成方法
 特開 2000-243703 半導体製造装置および半導体製造方法
 特開 2001-189283 半導体装置の製造方法