

学位論文題名

Study of Ion-Implantations into $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ and
Its Applications to Heterojunction Bipolar
Transistors($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中へのイオン注入及びヘテロ接合
バイポーラトランジスタへの応用に関する研究)

学位論文内容の要旨

近年、マイクロ波帯超高速デジタル、広帯域アナログ回路への応用を目的に、III-V族化合物半導体を用いたヘテロ構造電子デバイスの研究開発が盛んに行われている。特に、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ヘテロ構造は、GaAs基板に格子定数を整合させたまま $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ のAl組成 x を自由に設計できるため、応用範囲が広く最も研究が進展している。このAlGaAs/GaAsの利点を有効に活かした超高速電子デバイスとして、ヘテロ接合バイポーラトランジスタ(HBT)が注目されている。HBTは、エミッタ、ベース、コレクタがエピタキシャル成長により順次積層された薄膜縦型構造を取るため、デバイス構造、製作プロセスの多様性に優れている。

HBTの高速化を図る場合、トランジスタ動作するアクティブ領域以外の寄生部分の容量、特に、ベース-コレクタ間の接合容量(C_{BC})が阻害要因になる。従来のHBT構造は製作の容易さから最上層がエミッタとなるエミッタアップ構造が主流であったが、 C_{BC} 低減には構造上限界があった。本研究では、 C_{BC} 低減に有利なHBTの新しい構造であるコレクタアップ型(C-up, コレクタが最上層、エミッタが最下層)を実現し、その特性の優位性をアピールすることを目的とする。C-up構造ではトランジスタ動作させるために外部エミッタ/ベース接合領域(アクティブ領域の外側)中に電流注入を抑制するバリア領域を形成する必要がある。

本研究では、このバリア領域をイオン注入を用いた2つの新しい方法で形成した。一つはp形ドーパントのBeをn形 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ エミッタ中にイオン注入しp-n接合を形成する方法であり、もう一つは不活性元素である酸素のイオン注入によりn形 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中に高抵抗バリア領域を形成する方法である。p-n接合が有効なバリアとなるためには再結合電流の少ない高品質な接合特性を実現する必要がある。そのためにまず初めにイオン注入したBeの $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 層中での基本的な挙動を把握することが重要である。これまでBeイオン注入に関してはGaAsでは報告例は多いが $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ での本格的な検証は本研究が初めてであり、電気的活性化率のアニール温度依存性、Al組成依存性(組成 x は0から0.3まで)をホール測定により調べた。GaAs中にイオン注入したBeは400℃の低温アニールで活性化し始め、450℃で活性化率はほぼ100%に飽和してしまう。一方、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ では、GaAsと較べ活性化率は低く、アニール温度の上昇と共に徐々に増加する。また、一定のアニール温度では、Al組成が高い程活性化率は低い。イオン注入により損傷を与えられた $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中の結晶品質を評価するため、室温フォトルミネッセンス(PL)測定を行いバンド間遷移に基づくPL強度のアニール温度依存性を調べた。その結果、Al組成によらず400℃から光学的に活性化が始まり、アニール温度が上昇するに伴い徐々に活性化が進み、900℃でピークとなる。イオン注入で導入された放射損傷の回復には高いアニール温度が要ることがわかった。

2次イオン質量分析法及び繰り返しホール測定から $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中に注入したBe原子及び正孔濃度の分布を

求めた。Al組成が高い程高温アニールでの拡散が顕著になり、 SiO_2 表面保護膜と半導体の界面上に多量のBeがパイルアップし堆積することが観察された。これら実験結果から、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中Beの電氣的活性化率が低い原因は、Be原子自身が高温アニール後半導体表面から抜け出ること起因している。イオン注入された半導体領域は高密度欠陥領域が連続的に重ね合わさったアモルファス状態であり、活性化アニールにより再成長し結晶性が回復すると同時にBeがⅢ族サイト (Ga, Al) に置き換わることによりアクセプタになる。しかしイオン注入された $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中ではGaAs中に較べてAl-As結合及びGa-As結合の回復により高いアニール温度が必要であり、低温アニールでは容易に結晶性が回復しないためBeはⅢ族サイトに置き換われず活性化率は向上しない。結局、Al-As結合及びGa-As結合が回復するのに十分な高温アニールが与えられると、格子間に位置する大部分のBeは著しい熱拡散により半導体表面にまで達し界面で堆積する。表面保護膜を除去してホール測定は行われるので表面に堆積したBeは活性化にはカウントされないことになる。

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中Beの拡散を抑制し活性化率の改善を図るために、BeとP及びBeとAsの二重イオン注入 (Beの後にPあるいはAsのイオン注入) を行った。その結果、高温アニールにおいてBeの拡散が抑制され、Be単独注入の2倍程度の高い活性化率が得られた。これは、Ⅲ族元素とV族元素のストイキオメトリを制御した効果、すなわち $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中のAs空孔濃度がイオン注入されたV族元素 (P, As) により低減されⅢ族サイトの空孔濃度が増したため、結晶性が回復するに十分な高温アニールが与えられれば格子間に位置するBeがⅢ族サイトに入り易くなったためである。

更に高品質なp-n接合を形成できるかどうかを調べるため、n型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0, 0.3$) にBeイオン注入でp-n接合を形成し、ダイオードの電流-電圧特性をアニール温度をパラメータにして評価した。n値は、GaAs、 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ とも最小で1.8であり、イオン注入法で形成したp-n接合はAl組成に依らず再結合電流がかなり支配的であることがわかった。この最小値を与えるアニール温度はGaAsで600℃から $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ で650℃からと大差がなく、接合特性は注入したBeの活性化よりもむしろアモルファス状態から回復する結晶品質を反映している傾向がある。

次に、もう一つの外部 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ エミッタ中に高抵抗バリア領域を形成する方法である酸素イオン注入について本研究で初めてAlGaAs/GaAsダイオードを用いて評価し、高抵抗領域形成をアニール温度、注入ドーズ量をパラメータにして調べた。そして、最適化された条件で酸素イオン注入を行い形成したバリア領域はリーク電流が極めて少ない良好な高抵抗性を示し、外部ベース層を亜鉛拡散で高濃度化する技術と合わせて高電流密度で動作できるコレクタアップ構造HBTを作製することに初めて成功した。

更に、コレクタアップ構造HBTの利点 (低 C_{BC}) を活かすには、素子寸法の微細化が要求される。イオン注入時の損傷及びアニールによるベースドープメント自身の拡散を抑制するため拡散係数の小さいCをベースドープメントに用いて、コレクタ寸法 $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ の極微細HBTを製作し、100GHzを越える優れた高周波特性が得られた。加えて、電流利得のコレクタサイズ依存性を検討し、コレクタメサ周りのベース再結合電流が電流利得の低下に起因していることを本研究で初めて明らかにした。また、この電流利得の低下もAl組成を徐々に変化させた $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ グレーデッドベース層の採用で緩和できることも実験的に示し、将来のコレクタアップHBT構造設計を明確にできた。

結論として、本研究ではイオン注入がAlGaAs/GaAsヘテロ構造デバイス作製を自在にコントロールでき、トランジスタ特性向上に大きく貢献できることを初めて明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 中 原 純一郎
副 査 教 授 三 本 木 孝
副 査 教 授 和 田 宏
副 査 教 授 末 宗 幾 夫 (北海道大学大学院工学研究科)

学 位 論 文 題 名

Study of Ion-Implantations into $Al_xGa_{1-x}As$ and Its Applications to Heterojunction Bipolar Transistors

($Al_xGa_{1-x}As$ 中へのイオン注入及びヘテロ接合
バイポーラトランジスタへの応用に関する研究)

III-V族化合物半導体を用いたヘテロ構造電子デバイスの研究開発が盛んに行われている。特に、 $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ ヘテロ構造は、応用範囲が広く最も研究が進展している。このAlGaAs/GaAsの利点を有効に活かした超高速電子デバイスとして、ヘテロ接合バイポーラトランジスタ(HBT)が注目されている。本論文では、HBT高速化に大きな影響を及ぼすベース-コレクタ接合容量CBC低減に有利なHBTの新しい構造であるコレクタアップ型(C-upHBT)を実現し、その特性の優位性をアピールすることを目的とする。C-up構造ではトランジスタ動作させるために外部エミッタ/ベース接合領域中に電流注入を抑制するバリア領域を形成する必要がある、イオン注入を用いた2つの新しい方法で形成した。一つはp形ドーパントのBeをn形 $Al_xGa_{1-x}As$ エミッタ中にイオン注入しp-n接合を形成する方法であり、もう一つは不活性元素である酸素のイオン注入によりn形 $Al_xGa_{1-x}As$ 中に高抵抗バリア領域を形成する方法である。p-n接合が有効なバリアとして働くためには再結合電流の少ない高品質な接合特性を実現する必要がある。そのためにイオン注入したBeの $Al_xGa_{1-x}As$ 層における電氣的活性化率のアニール温度依存性、Al組成依存性をホール測定により調べた。GaAs中にイオン注入したBeは400°Cの低温アニールで活性化し始め、450°Cで活性化率は飽和し、大部分p形キャリアとして振る舞う。一方、 $Al_xGa_{1-x}As$ では、GaAsと比べ活性化率は低く、アニール温度の上昇と共に徐々に増加する。また、一定のアニール温度では、Al組成が高い程活性化率は低い。イオン注入により損傷を与えられた $Al_xGa_{1-x}As$ 中の結晶品質を評価するため、室温フォトルミネッセンス(PL)測定を行いバンド間遷移に基づくPL強度のアニール温度依存性を調べた。その結果、イオン注入で導入された放射損傷の回復には高いアニール温度が要ることがわかった。 $Al_xGa_{1-x}As$ 中に注入したBe原子及び正孔濃度の分布を求めた結果、Al組成が高い程高温アニールでの拡散が顕著になり、 SiO_2 表面保護膜と半導体の界面上に多量のBeがパイルアップし堆積することが観察された。これから、 $Al_xGa_{1-x}As$ 中Beの電氣的活性化率が低い原因は、Be原子

自身が高温アニール後半導体表面から抜け出ること起因することがわかった。 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中Beの拡散を抑制し活性化率の改善を図るために、BeとP及びBeとAsの二重イオン注入(Beの後にPあるいはAsのイオン注入)を行った。その結果、高温アニールにおいてBeの拡散が抑制され、Be単独注入の2倍程度の高い活性化率が得られた。更に高品質なp-n接合を形成できるかどうかを調べるため、n型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0, 0.3$)にBeイオン注入でp-n接合を形成し、ダイオードの電流-電圧特性をアニール温度をパラメータにして評価した。n値は、GaAs、 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ とも最小で1.8であり、イオン注入法で形成したp-n接合はAl組成に依らず再結合電流がかなり支配的であることがわかった。この最小値を与えるアニール温度はGaAsで600°Cから $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ で650°Cからと大差がなく、接合特性は注入したBeの活性化よりもむしろアモルファス状態から回復する結晶品質を反映している傾向がある。次に、外部 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ エミッタ中に高抵抗バリア領域を形成するため、酸素イオン注入を行ったAlGaAs/GaAsダイオードを作製し、順方向電流-電圧特性をアニール温度、注入ドーズ量をパラメータにして調べた。そして、最適化された条件で酸素イオン注入を行い形成したバリア領域はリーク電流が極めて少ない良好な高抵抗性を示し、外部ベース層を亜鉛拡散で高濃度化する技術と合わせて高電流密度で動作できるC-upHBTを作製することに初めて成功した。また、拡散係数の小さいCをベースドープメントに用いて、コレクタ面積2ミクロン平方の微細寸法HBTを製作し、100GHzを越える優れた高周波特性が得られた。

結論として、著者は本研究でイオン注入、アニールによるAlGaAs/GaAsヘテロ構造界面の不純物特性を実験的に明らかにし、デバイス作製の基礎技術を確立した。これらはトランジスタ特性向上技術に対する貢献が大なるものがある。また実際に高周波特性の良いトランジスタの作成を行った。

よって著者は北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格のあるものと認める。