

コヒーレントホットエレクトロンによる電子波干渉・回折の可能性

Possibility of Electron Wave Interference/Diffraction by Coherent Hot Electron

古屋 一仁*・宮本 恭幸*

Kazuhito FURUYA and Yasuyuki MIYAMOTO

超高速デバイスへの応用を目指した、電子波干渉・回折によるホットエレクトロンの伝搬制御の可能性について述べる。コヒーレンスの観点からは、非熱平衡状態の電子によっても条件を選ぶことで干渉を起こさせることが可能である。ホットエレクトロンの位相破壊時間を推定するために、共鳴トンネルダイオードを作製し共鳴準位幅を測定した。また電子波干渉・回折デバイスを作製するための超微細加工技術についても述べる。

1. はじめに

トランジスタのサイズ縮小は100 nm に迫り高速化・高密度化が進められている。また半導体結晶成長および極微細加工は目ざましく進歩し原子サイズ制御が可能になりつつある。そこでますます小さくなるトランジスタの発展方向と極限的構造形成技術の応用を探るために、キャリアの波動性が関与する物性およびデバイスの研究はさきわめて興味深くまた重要である。

本研究では超高速デバイスへの応用をめざしコヒーレントホットエレクトロンの生成および評価、さらに量子サイズ構造によるホットエレクトロン波の伝搬制御の可能性を研究している。ここではこれまでの研究経過について御報告する。

2. 電子波干渉に要求されるコヒーレンス

電子波デバイスの実現性はキャリアのコヒーレンスに依存する。最も基本的な干渉計をモデルにして必要なコヒーレンスとその実現可能性を考察した¹⁾。

干渉計では電子波は入口から伝搬し分岐点で別れ二つの分岐路を通過した後合流点で重ね合わさり出口に向かって伝搬する。もし分岐路通過中に位相破壊が生じると合流点で二つの電子波の位相相関はなくなるから、確率的に生じる位相破壊は干渉の強さを低下させる。干渉のビジビリティは、分岐路での単位時間あたりの位相破壊確率を $1/\tau_{ph}$ 、分岐路の通過時間を τ_{tr} として τ_{tr}/τ_{ph} で表され¹⁾、デバイスへ応用するためにはビジビリティを指定値以上にする必要がある。

干渉計スイッチを設計し分岐路の通過時間を見積ると次のようになる。一方の分岐路のポテンシャルを上昇さ

せて合流点で位相差 π が生じるようにする。電子波の波数を k_0 、分岐路長を l とすると通過時間 τ_{tr} は $(1/k_0)(h/2E)/(1-\pi/k_0 l)$ で計算される¹⁾。E が 10 meV で、 $k_0 l$ を 2π (5π) に選んだ場合走行時間は 0.4 (0.6) ps, E が 100 meV のとき 0.04 (0.06) ps, E が 200 meV のとき 0.02 (0.03) ps である。なお、分岐路長 l は有効質量 m^* を 0.04 m とし $k_0 l$ を 2π (5π) に選んだ場合、E が 10 meV で 64 (160) nm, 100 meV で 20 (50) nm, 200 meV で 14 (35) nm である。

分岐路中での位相破壊のほかに波源の性質や入り口から分岐点までの伝搬で生じる位相破壊も干渉の強さを決定するが、これらに比べて上述の条件が最も厳しい¹⁾。

金属あるいは縮退半導体中での電子の位相破壊過程は、電子-電子相互作用が支配的であり、これについては理論的実験的な報告がなされている²⁾⁻⁵⁾。理想的に絶対零度でフェルミ・エネルギー E_F の電子は非常に長い位相破壊時間を持ち得るが、温度を上昇させ電子エネルギーを E_F からずらせると散乱が生じるようになる。バルク中では電子-電子散乱確率は絶対温度の二乗に比例し、フェルミエネルギーからのずれ Δ の二乗に比例する⁶⁾。

変調ドープ構造中の位相破壊時間の測定結果は電子-電子散乱に基づいた理論式とよく一致し、1.4 K, E_F が 13.7 meV, Δ が 1 meV の位相破壊距離は 10 μm 程度、位相破壊時間は 30 ps 程度と測定された⁴⁾。

一方、熱平衡電子が存在しない空間に非熱平衡電子を注入し伝搬された場合には電子-電子散乱は生じない。縦光学 (LO) フォノンの自然放出による位相破壊が問題になるが、LO フォノンによる運動量緩和時間は GaAlAs で 0.2 ps 程度⁷⁾、位相破壊散乱時間は電子速度 10^8cm/s で 0.15 ps 程度と推定される⁸⁾。

*東京工業大学

以上の位相破壊時間から干渉観測の可能性を調べると、1 K 程度の極低温でフェルミエネルギーに十分に近い電子では明かに可能であり実際にも光のヤングの実験に相当する電子波干渉が観測されている⁴⁾。

一方、10 K 程度の温度における金属あるいは縮退半導体中の位相破壊時間は0.3 ps 程度と推定される。また77 K 程度以下での絶縁体中での位相破壊時間は0.15 ps 程度と推定される。このような比較的高い温度でも、上述のようにエネルギーを200 meV と高くすると分岐路走行時間は0.02 ps となり、7.5~15程度のビジビリティが得られる。

10 K 以上での動作と0.1 ps 以下の応答時間をめざすときホットエレクトロンによる電子波干渉が意味あるものとなる。そして固体中のパルスティックホットエレクトロンのコヒーレンスに関する実験データ収集は重要な研究課題となる。

3. ホットエレクトロンの位相コヒーレンス測定

OMVPE 成長条件を把握して優れた特性の共鳴トンネルダイオード (RTD) を作製し⁹⁾、電圧電流特性から共鳴単位のエネルギー幅を推定し、ホットエレクトロンのコヒーレンス評価を試みた¹⁰⁾。

成長条件と RTD 特性

ダブルバリア RTD を OMVPE により作製した。n⁺-InP 基板上に n-GaInAs 層260 nm, i-GaInAs スペーサ層2.6 nm, i-InP バリア層11 nm, i-GaInAs 量子井戸層8.7 nm, i-InP バリア層11 nm, i-GaInAs スペーサ層2.6 nm, n-GaInAs 層260 nm の構造を成長した。n-GaInAs 層のキャリア濃度は $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ とした。

材料はトリメチルインジウム (TMI) とトリエチルガリウム (TEG), アルシン (AsH₃: 10% 水素希釈), フォスフィン (PH₃: 20% 水素希釈) を用いた。

反応管圧力は76 Torr, 反応管内流速は300cm/s, 成長温度は600℃ と640℃ の二つの条件で行った。GaInAs の成長速度は0.8 μm/h- 2 μm/h の範囲とした。GaInAs 成長時と同じ TMI 流量を使って InP を成長しているため InP の成長速度は約半分の0.4 μm/h から1 μm/h である。

ヘテロ界面形成時は成長中断を入れた。GaInAs から InP への界面では AsH₃ 雰囲気中で10秒間成長中断を行った後、PH₃ 雰囲気中で0.5秒間成長中断を行った。InP から GaInAs の界面では PH₃ 雰囲気中で0.2秒間成長中断を行った後、AsH₃ 雰囲気中で0.2秒間成長中断を行った。V 族ガス切り替えによる圧力変動を防ぐために濃度が異なる V 族ガスを同流量で流している。従って InP 成長時の PH₃ 分圧は GaInAs 成長時の PH₃ 分圧の2倍になり、PH₃ 分圧が0.24 Torr から0.81 Torr, PH₃ 分圧が0.50 Torr から1.65 Torr である。V/III 比に関しては

GaInAs に対して160から550の範囲で InP に対しては680から2270の範囲で成長を行った。

ドーピングはジシラン (Si₂H₆) を使い、成長温度が640℃ のとき III 族総原料流量に対して0.057% Si₂H₆ を導入し、成長温度600℃ の時は0.13% Si₂H₆ を導入した。

成長後、n-GaInAs 層上にメタルマスクをつかって直径300 μm の AuGeNi ドットパターンを蒸着した後、Br-メタノールを使ってエッチングしメサ形状とした。裏面全面に AuGeNi を蒸着し、260℃ 1分半でシンタリングを行った。

この結晶系では伝導帯バンド不連続値が0.23 eV と小さいことから熱エネルギーによるバリア通過を抑制するために液体ヘリウム中 (T=4 K) および液体窒素中 (77 K) で測定した。図1に4 K での J-V 特性を示す。このダイオードは成長温度640℃, GaInAs の成長速度1 μm/h, AsH₃ 分圧0.81 Torr (V/III 比550), PH₃ 分圧1.65 Torr (V/III 比2270) の条件で成長し、P/V 比は正バイアス時が6.6, 負バイアスが9.7であった。77 K ではそれぞれ4.5および7.4であった。これらは従来の OMVPE による RTD 報告値の中で最大である。

以下に P/V 比の成長条件依存性を述べる。P/V 比は V 族供給量に大きく依存した。図2に成長温度640℃,

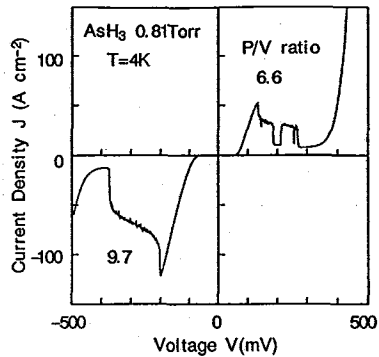


図1 RTD の J-V 特性

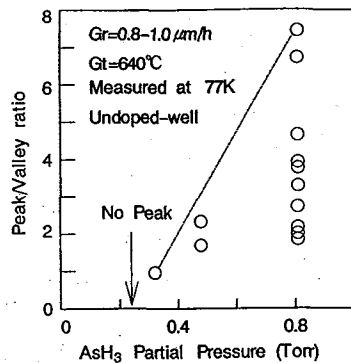


図2 PDT の P/V 比の GaInAs 成長時の V 族分圧依存性 77K

GaInAs の成長速度 $0.8\text{--}1\ \mu\text{m/h}$ において, GaInAs 成長時の V 族分圧を変えた場合の P/V 比変化を示す.

成長速度及び成長温度依存性は以下のとおりであった. GaInAs の成長時の AsH_3 分圧が $0.81\ \text{Torr}$, 成長温度 640°C の条件下で III 族の分圧を 2 倍にし, 成長速度を $1\ \mu\text{m/h}$ と $2\ \mu\text{m/h}$ (GaInAs) に変えたデバイスを, 連続した 2 回の成長により作製した. このとき両方のデバイスから $77\ \text{K}$ で P/V 比 3 程度が得られた. したがって P/V 比は V/III 比よりむしろ V 族分圧に強く依存している. また, 同様に, GaInAs の成長時の AsH_3 分圧 $0.81\ \text{Torr}$, 成長速度 $1\ \mu\text{m/h}$ の条件において, 連続した 2 回の成長で成長温度を 640°C および 600°C に変化した場合でも $77\ \text{K}$ で P/V 比が 3 程度に保たれた.

以上の実験のすべての成長条件で結晶の X 線回折, PL 強度, モホロジーに大きな違いは認められなかった. 一方, これまでに V/III および V 族分圧が高い方がヘテロ界面が平坦でありバックグラウンドキャリア濃度が低くなることが報告されている. よってこれらが RTD 特性にも影響を与えていると考えることができる.

RTD 井戸内不純物依存性

ヘテロ界面に $2.6\ \text{nm}$ の無ドーブのスペーサー層を成長し量子井戸層をドーブした. ドーピング濃度 N_w は, undope, $2 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$, $2 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ の三種とした. 図 3 に $4\ \text{K}$ における電流密度対電圧特性を示す. ピークバレー比は $N_w = 2 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$ で最大値 10.8 を得た.

共鳴準位幅測定

RTD の J-V 特性における二階微分はダブルバリアの透過率のエネルギー依存性を表し, これから共鳴準位幅を推定することができる¹²⁾. 図 3 で J-V 特性を示した RTD の二次微分特性を図 4 に示す. 2 個のピークが観測され, おおのの半値全幅は, undope で $22\ \text{mV}$ と $65\ \text{mV}$, $N_w = 2 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$ で $25\ \text{mV}$ と $68\ \text{mV}$ であった.

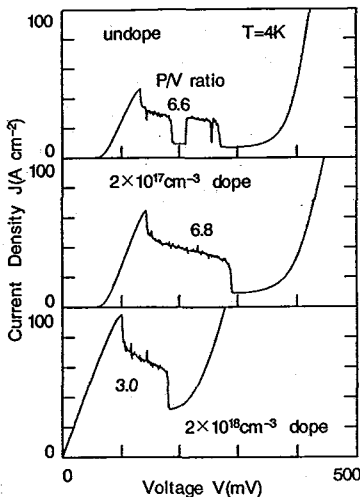


図 3 井戸内に不純物をドーブした RTD の J-V 特性

$N_w = 2 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ では一番目のピークは観測されず, 二番目のピークの半値全幅は $84\ \text{mV}$ であった. 通常, 用いられる仮定としてエミッタと井戸間の電圧降下が井戸とコレクタの電圧降下と等しいとすれば, 上に述べた幅の半分が共鳴準位幅になる.

共鳴準位幅の測定値について考察し, どのようにしてホットエレクトロンの位相破壊時間を推定することが可能になるか調べる. 上に述べたようにわれわれの実験で得られた最小の共鳴準位幅 ΔE は $11\ \text{meV}$ であった. これにより見かけのコヒーレンス時間は $\hbar/\Delta E = 0.06\ \text{ps}$ と見積られる. しかし, この見かけのコヒーレンス時間には, 量子井戸と外部との結合による準位の広がり, 共振器内での位相破壊により準位の広がり, そして, 共振器構造が空間的に不均一であることにより広がり, のすべての要因の影響が含まれてしまっている. したがってそれぞれの影響を分離することができるならばホットエレクトロンの位相破壊時間の情報を取り出すことができるようになる.

まず外部との結合による準位の広がり, バリアの厚さに依存するが, われわれの RTD の場合理論上 $1\ \mu\text{eV}$ とさわめて小さな値であり, この要因の寄与は無視できる.

次に OMVPE のヘテロ界面形成時に層厚に空間的変動が生じることによる不均一の影響については, 理論上は一原子層の層厚変動で量子井戸のエネルギー準位の変化は $2\ \text{meV}$ 程度である. したがって空間的な量子井戸層厚変動も準位幅広がり, の主要因ではない.

次にイオン化した不純物原子による共振器構造の不均一性について調べる. 残留不純物濃度を $10^{15}/\text{cm}^3$ とすると, $8.7\ \text{nm}$ の量子井戸層内には $330\ \text{nm}$ の ($=\sqrt{(10^{21}/10^{15}/8.7)}$) 間隔程度で不純物原子が存在すると絶対値 e の電荷によるクーロン場が生じたポテンシャルは大きく変化する. 非常に荒い見積りをしてみると,

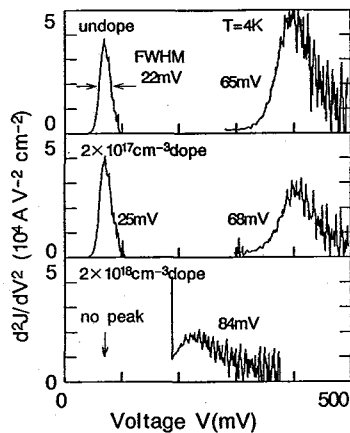


図 4 井戸内に不純物をドーブした RTD の J-V 特性の二次微分特性

量子井戸面に垂直で不純物原子を通過する面内のポテンシャルエネルギーは不純物原子が存在しないときは 24 meV ($=e/(4\pi\epsilon r)$; $\epsilon=13\epsilon_0$, $r=8.7/2$) 以上異なる。より詳細な検討が必要ではあるが、不純物原子が量子井戸層に存在する部分とそうでない部分とで RTD の共鳴単位は 10 meV のオーダーで変化する可能性がある。したがって測定された共鳴単位幅にはこの不純物原子の影響が主要因として含まれている可能性が高い。

不純物原子の存在による共振器構造の空間的不均一性の影響を除去してホットエレクトロンの位相破壊の影響だけを取り出すためには、量子井戸層内に不純物が一つも存在しない程に面積が小さな RTD で共鳴単位幅を測定することが有効である。

4. 電子波干渉・回折デバイス作製技術

ホットエレクトロンを回折格子により電子波回折させて輸送制御することをめざし、超微細ピッチの回折格子作製技術を開発してきている。また、ホットエレクトロン波干渉を観測することをめざした作製技術を開発している。

超微細埋め込み構造

半導体埋め込み微細構造として、電子ビーム露光法とウエットケミカルエッチング、OMVPE による埋め込み成長を組み合わせることで 70 nm の回折格子を実現した¹³⁾。

電子ビームを用いた細線パターン形成での最小線幅は、レジスト層に入射した電子が前方散乱を起こしビーム幅が広がるため本来のビーム径より大きくなる。レジスト内での前方散乱による線幅増大を抑えるには、加速電圧を高くすること、レジスト層厚を薄くすることが有効であり、高密度で超微細なパターンを描画する時には、露光部分と非露光部分とのコントラストが減少してくるので、レジスト現像条件の選択は重要である。実際に、電子線レジストとしてポリメチルメタクリレート (PMMA) を $30\text{-}50 \text{ nm}$ でスピコートして、電子ビーム露光装置 JBX5DII 装置により加速電圧 50 KeV で描画し、メチルイソブチルケトン：イソプロピルアルコール = $1 : 9$ (体積比) の薄い混合液で現像することによって、 50 nm ピッチ 20 周期と 40 nm ピッチ 10 周期の格子パターンを得ている¹³⁾。図 5 の SEM 写真からわかるように 50 nm ピッチパターンでは最小線幅 12 nm が得られている。後方散乱の影響は格子の本数が増加するほど顕著になり、露光のコントラスト減少として現れる。

描画した細線パターンを転写するエッチングプロセスで、ウエットケミカルエッチングは、ドライエッチングに比べ、損傷の観点からは有利である。ところが通常のケミカルエッチングでは、異方性が得られない問題があった。この問題を解決し、ウエットケミカルエッチ

ングをナノメートルサイズの量子細線や周期構造の形成に応用するためにわれわれが考案した GaInAs/InP 系結晶に対する 2 段階ウエットケミカルエッチング法¹³⁾について以下に述べる。目的のエッチング層、(100) InP 層の上に、薄く GaInAs 層をエピタキシャル成長させ、この薄層を InP 層エッチングの際のマスクに利用するのがポイントである。この 2 段階エッチングプロセスの概略を図 6 に示す。まず、第 1 段階では、GaInAs マスク層上に形成したレジストパターンを、ブロムメチルによりマスク層に転写する。そして、第 2 段階で、転写したパターンをさらにその下の目的の InP 層に転写する。この時、用いる塩素系エッチャントは InP のみエッチングし、GaInAs はエッチングしない強い材料選択性をもっている。

この 2 段階エッチング法が超微細加工に向くのは次の点による。まず、第 1 段階エッチングは通常のエッチ

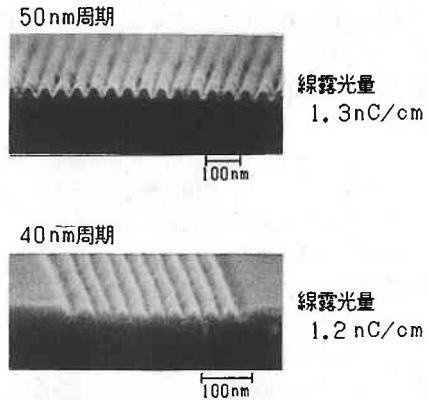
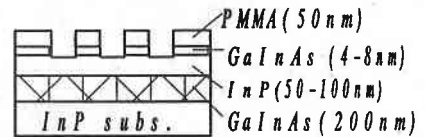
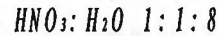


図 5 電子ビーム露光によるレジストパターン (a) 50 nm ピッチ 20 周期, (b) 40 nm ピッチ 10 周期

1. From Resist To Epitaxial mask



2. From Mask To semiconductor surface

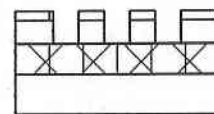
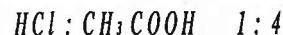


図 6 2 段階エッチング法のプロセスフロー

エッチングでありアンダーカットが問題になるが、パターン幅に比べ、エッチングすべきマスク層厚を十分に薄くすることで問題が起こらないようにできる。次に第 2 段階エッチングでは、エッチングすべき結晶とエピタキシャル成長したマスク層厚結晶とは完璧な密着性をもつことから、エッチャントがマスクと結晶との間に侵入することは起こり得ない。さらに、塩酸系エッチャントの InP に対するエッチング速度は結晶面に強く依存することから、アンダーカットは抑えられ、エッチング面はほぼ垂直になる。2 段階エッチング法により形成したピッチ 70 nm、深さ 100 nm の InP 周期構造の断面 SEM 写真¹³⁾を図 7 に示す。垂直なエッチング断面がアンダーカットなしに得られ、ウエットエッチング技術がナノメートルサイズ構造にまで適用できることを示している。

半導体結晶表面に形成した量子細線構造上に異種の結晶を再成長させて半導体結晶中に埋め込まれた超微細ヘテロ接合構造にする。超微細構造上の再成長における問題は構造変形もしくは消失である。これは平衡度の比較的高い結晶成長法、たとえば液相成長法、においては深刻である。そこで OMVPE などの非平衡で非可逆性が強い結晶成長法が再成長に用いられる。この場合でも熱により形状劣化を起こす問題が生じる。GaInAs の通常の OMVPE 成長温度である 580°C で、図 7 に示したよ

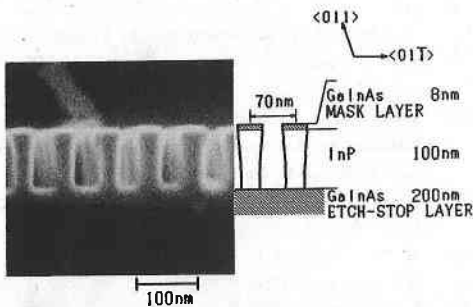
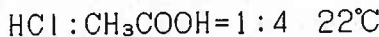


図 7 2 段階エッチング法による 70 nm ピッチ InP 周期構造

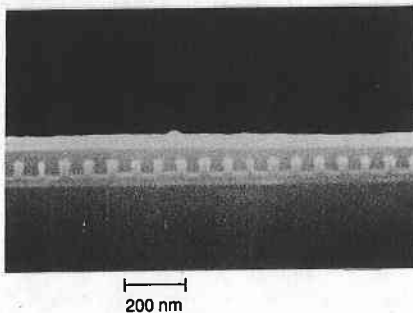


図 8 OMVPE 再成長埋め込み GaInAs/InP 周期構造
周期 70 nm

うな周期 70 nm の InP 微細構造上に GaInAs を再成長したところ構造は完全に失われた。そこで構造消失の原因を以下のように考察した。OMVPE では、サンプルをリアクタにロードし、基板温度を升温し、成長後、温度を低下して取り出す。成長中および成長後のヘテロ界面は高温下でも比較的安定である^{14), 15)}から、熱による形状の劣化は主として昇温中に起きたと判断した。

升温をできるだけ短時間にし、かつ温度は最低限に抑えて再成長を試みた。良好な表面状態が保てる最低の成長温度 520°C を選んだ。温度測定系の遅れ時間も考慮して昇温時間を 1.5 分まで切り詰めた。熱変形には InP 表面からの P 原子抜けが大きく関与していると考えられるために、リアクタ内に PH_3 を供給し P の蒸気圧を高めている。この PH_3 分圧も倍増して 1.66 Torr に設定した。この成長条件改良により熱変形の問題はほぼ完全に解決することができた。

上述の方法で埋め込んだ InP 微細周期構造の断面 SEM 像を図 8¹⁶⁾ に示す。周期 70 nm、深さ 40 nm の矩形の InP 構造が形状をほぼ保持したまま埋め込まれている。再成長した GaInAs の上面が平坦になっていることも注目すべき点である。このように 30 nm 足らずの再成長により、構造化表面が速やかに平坦化されるのは、OMVPE 成長の特長の一つである。

得られた周期 70 nm は、電子ビーム露光時の条件によって決まっていたが、現在は露光条件などの把握により 50 nm を描くことが可能になっており、また周期数を二つ穴スリットの為に減らすことで電子ビーム描画時の後方散乱を抑制できることから、50 nm 以下の短い間隔の実現が可能であると考えられている。

極微細電極構造

電極に対しては、やはり電子ビーム露光法を用いたリフトオフ法が最も有望であると考えられる。しかしながら前述したように極微細周期構造においては、前方散乱の影響を避けるために薄いレジストを使わなければならないことから、多層レジスト法により形成することにした。

下層レジストに 100 nm 厚の PMMA、中間層に 4.2 nm 厚の Ge、上層レジストに 50 nm 厚の PMMA を用いた三層レジスト構造を用い、 CF_4 および O_2 によるアクティブイオンエッチングにより、上層レジストに電子ビーム露光装置で描いたパターンを、下層レジストに転写した。ここで中間層である Ge の膜厚を上層レジストに較べて薄くすることで、図 5 に示すような形状の劣化したレジストでの転写を可能にしている。続けて Au/Cr の蒸着を行うことで、周期 50 nm の微細周期金属電極構造を形成した。形成後の SEM 像を図 9 に示す。

また、埋め込まれた半導体微細周期構造の真上に金属電極構造を形成するためには、位置合わせのマークが必

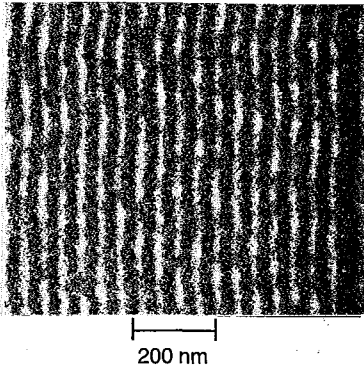


図9 周期50nmの微細周期金属電極構造のSEM像

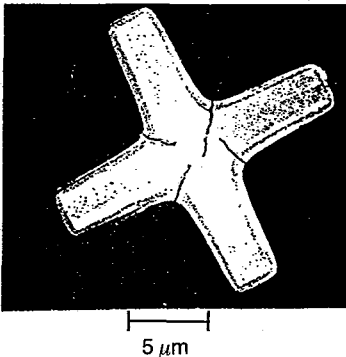


図10 選択成長後のInP上タングステンマークのSEM像

要となる。EB露光法においてよく使われるマークは金製であるが、マーク作製後の再成長を行うことは難しい。そこで高融点金属によるEB露光用マークを目指して、タングステンによるInP系のOMVPEでの選択成長を行った¹⁸⁾。成長は将来の微細構造形成時の熱による形状劣化を考慮し、始めに35 nmのGaInAsを570℃で成長し、続けてGaInAs層200 nmとInP層10 nmを650℃で成長した。マークは3 μm幅、厚さ300 nmの+形状を電子ビーム蒸着を用いたリストオフ法により作製し、成長を行った。成長後のSEM観察像を図10に示す。蒸着時の熱の影響で若干形状が歪んでいるものの、マーク上に多結晶はみられず、選択成長が確認された。

5. む す び

電子干渉デバイスの実現可能性についてコヒーレンスの観点から検討した。極低温かつフェルミエネルギーに非常に近いエネルギー状態の電子ではもちろん可能であるが、非熱平衡状態の電子によっても条件を選ぶことで干渉を起こさせることが可能であることを述べた。

ホットエレクトロンの位相破壊時間を推定するために

共鳴トンネルダイオードをOMVPEにより作製し共鳴準位幅を測定した。測定準位幅には不純物原子の配置による空間的な不均一性の影響が含まれていることを推定した。

電子波干渉・回折デバイスを作製するための超微細加工技術を開発し、70 nmピッチの埋め込み回折格子を実現した。

謝 辞

日頃ご支援頂く末松学長に感謝いたします。日頃ご討論頂く伊賀教授、荒井、浅田助教に感謝いたします。

(1992年12月3日受理)

参 考 文 献

- 1) 古屋：「応用物理」平成5年2月
- 2) G. F. Giuliani and J. J. Quinn : Phys. Rev B, 26, 4421 (1982).
- 3) T. Hiramoto, K. Hirakawa, Y. Iye and T. Ikoma : Appl. phys. Lett. 54, 2103 (1989).
- 4) A. Yacoby, U. Sivan, C. P. Umbach and J. M. Hong : Phys. Rev. Lett. 66, 1938 (1991).
- 5) G. Fasol : Extended abstracts 1992 Int. Conf. Solid State Devices and Marmin : Solid State Physics, Ch. 17 (Holt, Rinehart and Winston, New York, 1976).
- 6) N. W. Ashcroft and N. D. Mermin : Solid State Physics, Ch. 17 (Holt, Rinehart and Winston, New York, 1976).
- 7) S. Krishnamurthy, M. A. Berding, A. Sher and A. B. Chen : J. Appl. Phys. 63, 4540(1988).
- 8) 古屋：未出版
- 9) T. Sekiguchi, Y. Miyamoto, and K. Furuya : 6th International Conference on Metalorganic Vapor Phase Epitaxy, Cambridge (1992).
- 10) Y. Miyamoto, T. Sekiguchi, K. Fujita and K. Furuya : International Symposium on Gallium Arsenide and Related Compounds, Karuizawa (1992).
- 11) Y. Miyamoto, M. Kohtoku, S. Yamaura and K. Furuya, Jpn. J. Appl. Phys. 29, (1990) pp. 1910-1911.
- 12) M. Tsuchiya and H. Sakaki, Jpn. J. Appl. Phys., 30, (1991) pp. 1164-1168.
- 13) E. Inamura, Y. Miyamoto, S. Tamura, T. Takasughi and K. Furuya : Jpn. J. Appl. Phys. 28, 2193 (1989)
- 14) P. Daste, Y. Miyake, M. Cao, Y. Miyamoto, S. Arai, Y. Suematsu and K. Furuya : J. Cryst. Growth, 93, 365 (1988)
- 15) 森芳文：「エビタキシャル成長技術実用データ集 第1集 MBEとMOCVD 第1分冊 MOCVD」, サイエンスフォーラム 176頁 (1986)
- 16) T. Yamamoto, Y. Miyamoto, M. Ogawa, E. Inamura and K. Furuya : Electron. Lett. 26, 875 (1990)
- 17) 本郷, 古屋：'92春通通信全大 C-499
- 18) 宮本, 本郷, 古屋：秋応用物理学会講演会 16p-ZE-11