

平成 21 年 5 月 19 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560361

研究課題名(和文)：半導体量子ナノ構造を用いた超高感度テラヘルツ波計測技術の開発

研究課題名(英文)：High-sensitive Terahertz technology using semiconductor quantum nanostructures

研究代表者

前元 利彦 (MAEMOTO TOSHIHIKO)

大阪工業大学・工学部・准教授

研究者番号：80280072

研究成果の概要：電子のバリステック伝導によって生じる非線形な電気特性を利用した新しい原理の電子デバイスを開発するために、InAs/AlGaSb ヘテロ構造を用いてバリステック整流デバイスを作製して幅広い温度範囲で電気・磁気特性の評価を行った。4.2K, 77K で明瞭な整流特性が観測され、平均自由行程が500 nm程度の室温においても整流効果の観測に成功した。斜めに量子細線型構造を配置した微細化デバイスでは、磁場を印加した状態で整流特性を評価することで構造内のバリステック電子の状態について新しい知見を得た。さらなる高性能化のために、量子細線を T 字型に接合した量子細線 3 分岐構造 (Three-terminal Ballistic Junction : TBJ) の試作と評価も行った。TBJ では基準電位が存在することから、回路応用の観点でバリステック整流デバイスよりも有用である。InAs/AlGaSb 系 TBJ においても、明瞭な整流特性が観測され、温度依存性や素子サイズ依存性からバリステック伝導がより支配的な状態で強い整流特性が得られることが分かった。また TBJ におけるパルス入力に対する応答特性を評価したところ、InAs/AlGaSb 系 TBJ では GaAs/AlGaAs 系 TBJ と比較して約 1 桁高い周波数での動作を確認し、高速動作の可能性を示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：バリステック, 整流デバイス, InAs/AlGaSb ヘテロ構造, 整流効果, 量子細線, 3分岐構造, 磁気抵抗, 回路応用

## 1. 研究開始当初の背景

近年、電磁波領域において光と電波の領域に挟まれたテラヘルツ波帯は未開拓の分野で応用が遅れていたが、技術の進展に伴ってテラヘルツ電磁波の発生・受光に関する研究が活発化しつつある。情報通信分野にとどまらず、医療や環境、セキュリティの分野への幅広い応用についても議論されるようになってきた。テラヘルツ波は固体の格子振動や分子の振動および回転、半導体の不純物準位、ナノ構造の量子準位、超伝導のエネルギーギャップに至るまで様々なエネルギースケールに対応しているので、物質内部で生じる現象やキャリアダイナミクスなど物性物理の観点からも非常に興味もたれている。従来、このテラヘルツ帯は光学技術の波長限界より長波長側にあるため“光”として取り扱うことが困難であり、一方、電子デバイス・エレクトロニクス技術の周波数限界よりもさらに高く、数100GHz以上の高周波側で電気的な信号としても取り扱うことが困難であった。また、天文学の分野を除いては利用する価値に乏しく、その理由はテラヘルツ光子のエネルギーが極めて小さくかつ要求される感度も高く、従来はその要求を満たす単一光子検出器が存在しなかったことによる。単一光子検出には光電子増倍管を利用できるが、波長が $1.5\mu\text{m}$ 程度より長い光の検出は難しく、また $10\mu\text{m}$ から $1\text{mm}$ 程度の長波長領域の検出器として、光吸収によるポロメーターや半導体の不純物準位からの光伝導や超伝導トンネル接合を利用する検出器が開発されてきたが単一光子の検出レベルには及ばなかった。

最近、東大・小宮山進教授らのグループが、二次元電子系の量子ホール効果や半導体量子ドットによる単電子トランジスタ(SET)の半導体量子構造を利用した高感度単一光子検出器を

開発した。従来素子の1万倍以上に対応した高感度検出器であり、さらに極微弱イメージング電子顕微鏡に組み込んで量子ホール電子系による測定系の開発も進んでいる。しかし、波長制御範囲がまだ狭い点( $170\sim 210\mu\text{m}$ )や動作温度については希釈冷凍機を用いなければならないため、実用的な光子検出器として工学的応用を考えたとき、いくつかの問題点もある。このような極微弱なテラヘルツ光の検出器の開拓を進めている研究機関はほとんど無く、広範なテラヘルツ波を高感度で検出するデバイスの開発は急務となる。

以上のような研究の背景から、本研究では、エネルギーバンド構造の設計自由度が大きなInAs/AlSb系半導体ヘテロ構造を基盤材料とし、これまでの研究成果をもとに高品質な極薄超格子構造の成長プロセスの開発、量子ナノ構造を用いたテラヘルツ高感度検出素子の開発と動作温度の高温化を目的として研究を進める。

## 2. 研究の目的

小さな電子の有効質量と強い閉じ込め効果をもつInAs/AlSb系ヘテロ構造の優れた特質を生かして、急峻なヘテロ界面をもつ結晶成長ならびに量子ナノ構造を実現し、量子物性の解明とその中の電子のダイナミカルな振る舞いについて理論・実験の両面から研究を進める。量子ナノ構造をゲートで制御してキャリアダイナミクスについて新しい知見を得ることは、波長可変テラヘルツ受発光素子を開発する上で極めて重要である。また、キャリアの強い閉じ込め効果を与え、エネルギー準位を大きく変化させることにより、テラヘルツ電磁波と半導体中のキャリアとの相互作用を調べることも物性物理の観点から重要であると言える。InAs/AlSb系量子井戸構造の原子層レベルの界

面制御および構造設計，電気的特性・光物性の基礎的なデータを蓄積する。技術的問題を解決しながらテラヘルツ波素子に向けた構造最適化を行う。さらに検出器開発に向けて，量子ポイントコンタクト構造を利用した電子トンネリングの実験とデバイス加工技術についても検討し，超高感度なテラヘルツ波検出器のデバイス試作を行う。

### 3. 研究の方法

まずナノスケール構造において電子のバリステック伝導状態によって生じる非線形性を利用した新原理の整流デバイスに着目した。室温における平均自由行程が非常に長い InAs/AlGaSb ヘテロ構造を用いて，より高速で動作する整流デバイスの実現を目指し基礎的な特性の評価を研究の目的とした。

InAs/AlGaSb ヘテロ構造に電子線リソグラフィとウェットエッチングを用いてアンチドットを有するバリステック整流デバイス(図1)を作製し，デバイス構造がバリステック伝導特性に及ぼす影響をナノスケールデバイスにおける電子輸送特性から評価・検討した。

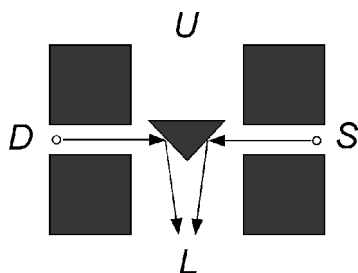


図1 バリステック整流デバイスの概念図と電子の運動の軌跡。ソース(L)とドレイン(D)から入射した電子は，いずれも下方の端子Lに入射され，電子の入射向きに関わらずUL間では同じ極性の電圧が得られる。

### 4. 研究成果

#### (1) InAs 系ナノ構造におけるバリステック整流効果

作製したバリステック整流デバイスを 4.2 K, 77 K の低温に加えて，300 K での直流測定により整流性の観測に成功した。各温度での整流特性は平均自由行程の違いを反映したオーム則によらない非線形な電流-電圧特性であり，平均自由行程の長い条件で整流特性が強く観測されたことからバリステック伝導に起因した整流特性であることが分った。また，InAs/AlGaSb バリステック整流デバイスの磁気輸送特性を評価するために 4.2 K で磁気抵抗測定を行った結果，曲がり抵抗を測定することによって，磁場による電子の軌道の変化を反映した磁気抵抗の変化が観測できた。

このアンチドットを有する 4 端子構造の細線からアンチドットを含むデバイスを中心に射出する電子の角度分布成分を考慮し，デバイス中でバリステック伝導が維持されるという仮定でモデル化した Landauer - Büttiker の式を用いたシミュレーション結果と実験から得られた I-V 特性の比較を行った。実験結果の中で最も平均自由行程の長い 4.2 K の結果とシミュレーション結果を比較したところ比較的よい一致を得た。

次に，アンチドット構造はデバイスの全体の大きさを微細化していく際に不利であるため，アンチドット構造を用いない 4 端子構造を用いた。電流注入端子であるソース・ドレイン電極は出力を取り出すための電圧端子に対して斜めに傾けた 4 端子構造を作製し，その電子輸送特性を評価した。

その結果，バリステック伝導が保たれる 4.2 K および 77 K では明瞭な整流特性が観測され，デバイスのサイズから判断して拡散伝導が支配的である室温では整流性は示さ

ず、オーミックな変化を示した。そこで、バリステック伝導する電子を効率的に一方方向に伝導を促す Waveguide 構造を電圧端子の片方に設け、4 端子構造自信も微細化することで 300 K での整流効果も観測に成功した。

## (2) バリステック整流デバイスの磁気抵抗評価

電流注入端子を斜めに傾けたデバイスにおける電子輸送特性を磁場中で評価し、バリステック伝導する電子がローレンツ力を受けたときの影響を評価した。その結果、整流特性は磁場を印加することでローレンツ力の方向を反映して磁場の変化に対して定性的に一致した整流性の対称性の崩れが観測された。また、電流注入端子である細線間を直接的に伝導するフォーカシング状態は構造から予測される磁場よりも弱い磁場で生じた (図 2)。この結果を検証するためにさらに細線構造の傾きを強めた構造で曲がり抵抗測定を行い、電子のフォーカシング現象の観測を行ったところ、ゼロ磁場近傍において明瞭な負の曲がり抵抗が得られたことから、バリステック伝導によるピークであることが確認できた。電子のフォーカシング現象という観点ではピークが観測された磁場は予測される磁場よりも低磁場であることから、細線構造から出斜される電子は細線構造に沿った角度とは異なる角度分布で出斜されていることが分かった。

この構造において整流特性の磁場依存性を調べたところ、電流導入端子である細線間を直接的に伝導するフォーカシング現象による整流性の消失は構造から予測される磁場よりも低磁場で観測され、曲がり抵抗測定の結果と定性的に一致する結果が得られた。磁場の変化による整流性の変化の様子を 2 次元プロットすることで整流性の消失が電流

の増加によって急激に低磁場側にシフトしていることから、整流性の消失と電流の増加は密接に関係していることが示唆され、電流増加に寄る伝導電子のバリステック性が弱まった可能性や、細線間の実効的な電界が強まることでバリステック電子の角度分布に影響した結果であることが分かった。

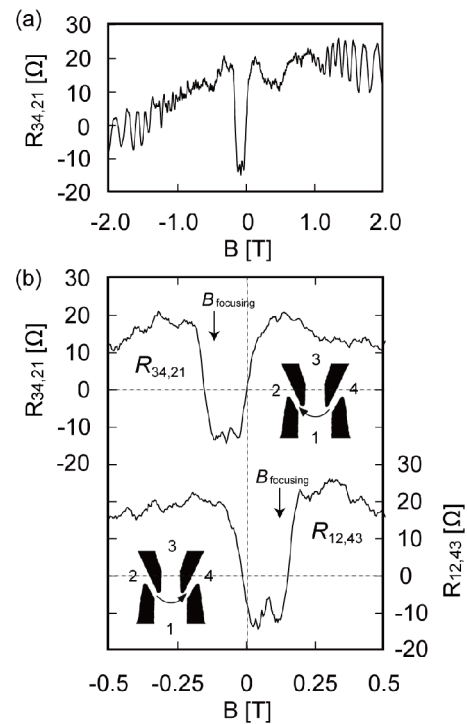


図 2 斜め細線型バリステック整流デバイスにおける曲がり抵抗。(a) -2 T から 2 T までの磁気抵抗、(b) 異なる方向から電子が入射したときの磁気抵抗変化。

## (3) 量子細線 3 分岐構造における非線形電子輸送特性

ナノ構造において整流特性が得られる TBJ に注目し、GaAs/AlGaAs ヘテロ構造と InAs/AlGaSb ヘテロ構造を用いて試作・評価を行った。バリステック整流デバイスでは得られない基準電位を TBJ では設定できることから回路応用の点で有用であり、バリステック整流デバイスよりも大きな電圧出力の整流特性を期待して評価を行った。

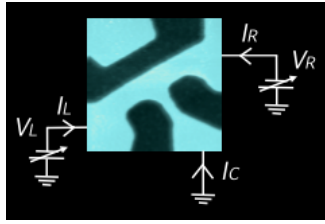


図3 InAs/AlGaSb TBJのAFM像と測定対象

InAs/AlGaSb ヘテロ構造と材料系の比較を行うために GaAs/AlGaAs ヘテロ構造にトップゲートを有する細線構造を T 字型に配置した TBJ を試作し、プッシュフィックス形式でバイアスしたときに中央ブランチで観測される非線形な電圧出力のゲート電圧依存性や、プッシュプル形式でバイアスしたときの整流特性を評価し、FET モデルとの比較を行った。InAs/AlGaSb ヘテロ構造に作製した TBJ (図3) において、同様の評価を行いプッシュプル形式で電圧を印加したときに中央ブランチから電圧および電流の整流特性の観測に成功した。理論からも予測されるように、構造の対称性が重要であり、中央のブランチの位置を極端にずらして作製した場合には、ブランチの位置を反映した非対称的な整流特性が得られた。得られる整流特性は FET モデルを用いて定性的に説明でき、温度依存性からもフェルミエネルギーが小さいより低温で整流特性が強くなる傾向が見られたが、FET モデルだけでは完全に説明ができずバリスティック伝導がより支配的な状態で強い整流特性が得られることが分かった。

GaAs/AlGaAs TBJ と InAs/AlGaSb TBJ の整流特性を比較した結果、GaAs/AlGaAs TBJ の方が整流特性として得られる電圧出力の絶対値が大きいことが分かった。また、高電界領域では GaAs/AlGaAs TBJ では見られない  $v_c$  の変化が観測され、入力端子の電流と整流特性の変化から InAs/AlGaSb ヘテロ構造に作製

した TBJ における  $v_c$  の変化は 3 つの領域で区別できることが分り、低電界領域では速度飽和が起こらずバリスティック伝導状態における非線形性が  $v_c$  に現れ、電界の上昇に伴い急激な速度飽和により  $v_c$  が線形に変化し、さらに電界が強まるとインパクトイオン化による電流の急増が生じることが分った。

また、周波数依存性を調べた結果、GaAs/AlGaAs TBJ と比較して InAs/AlGaSb TBJ では整流特性の出力電圧の減衰が約 1 桁高い周波数領域まで観測できた (図4)。これは測定温度における GaAs/AlGaAs ヘテロ構造の電子移動度と電子濃度が InAs/AlGaSb ヘテロ構造よりも低かったため、TBJ の持つ抵抗値や TBJ へのアクセス抵抗が高くなり、時定数が高いことによると考えられ、これらの結果は高周波領域でのデバイスの応用の点で InAs/AlGaSb TBJ の優位性を示す結果が得られたと結論づける。

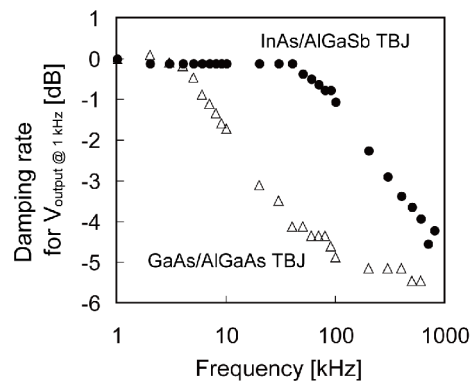


図4 GaAs/AlGaAs TBJ および InAs/AlGaSb TBJ のパルス波入力に対する応答特性の周波数依存性

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

M. Koyama, K. Fujiwara, N. Amano, T. Maemoto, S. Sasa, and M. Inoue,

“ Electron transport properties in InAs four-terminal ballistic junctions under weak magnetic fields ”, phys. stat. sol. (c) 印刷中 ( 査読有 ) .

M. Koyama, T. Inoue, N. Amano, T. Maemoto, S. Sasa, and M. Inoue, Nonlinear Electron “ Transport Properties and Rectification Effects in InAs/AlGaSb Ballistic Devices ”, phys. stat. sol. (c) 5, 107-110 (2008) ( 査読有 ) .

K. Fujiwara, N. Amano, M. Koyama, T. Maemoto, S. Sasa, and M. Inoue, “ InAs/AlGaSb HEMTs with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and HfO<sub>2</sub> Gate Insulators ”, Proc. of the 2008 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (c), 73-74 (2008) ( 査読無 ) .

M. Koyama, T. Inoue, N. Amano, T. Maemoto, S. Sasa, and M. Inoue, “ Nonlinear Electron Transport Properties in InAs/AlGaSb Three-Terminal Ballistic Junctions ”, J. of Physics: Conf. Ser. 109, 012023 (1-3) (2008) ( 査読有 ) .

#### [ 学会発表 ] ( 計 3 件 )

M. Koyama, K. Fujiwara, N. Amano, T. Maemoto, S. Sasa, and M. Inoue, “ Electron transport properties in InAs four-terminal ballistic junctions under weak magnetic fields ”, 34th International Symposium on Compound Semiconductors, 2008.9.23. Rust, Germany.

藤原健司, 塩路真広, 天野直樹, 小山政俊, 前元利彦, 佐々誠彦, 井上正崇, “ 高誘電率材料を用いた InAs/AlGaSb HEMT の作製と評価 ”, 2008 年秋季第 70 回応用物理学会学術講演会, 2008.9.4., 中部大学.

K. Fujiwara, N. Amano, M. Koyama, T. Maemoto, S. Sasa, and M. Inoue,

“ InAs/AlGaSb HEMTs with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and HfO<sub>2</sub> Gate Insulators ”, 2008 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, 2008.5.2, 大阪大学中ノ島センター.

#### 6 . 研究組織

##### (1) 研究代表者

前元 利彦 ( MAEMOTO TOSHIHIKO )

大阪工業大学・工学部・准教授

研究者番号 : 80280072

##### (2) 研究分担者

井上 正崇 ( INOUE MASATAKA )

大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号 : 20029325

佐々 誠彦 ( SASA SHIGEHICO )

大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号 : 50278561