

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610070

研究課題名(和文)電子増倍素子を用いた精密高速測定技術の開発

研究課題名(英文)Development of a fast precise measurement system using electron amplifiers

研究代表者

山本 倫久(Yamamoto, Michihisa)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：00376493

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、電子間相互作用による非平衡電子の緩和過程を利用して、半導体基板中で電流を増幅する雪崩式“電子増倍素子”を開発することを目的とした。電子増倍素子を試作し、パラメータを調節することによって、入力電流が低い場合に増幅率9を得た。この素子をうまく利用すると、将来的には伝搬する電子を1個単位で捉えられる可能性がある。その応用を見越して、電子波干渉計の出力電流を増幅するための埋め込み技術の開発も進めた。

研究成果の概要(英文)：This work aims at realizing an on-chip avalanche current amplifier utilizing relaxation process of non-equilibrium electrons induced by the electron-electron interaction. We developed such an amplifier and achieved the amplification ratio of 9, tuning parameters for the low input current. This may allow for detecting a single propagating electron in a solid. We also developed technologies to connect this amplifier to an electron wave interferometer.

研究分野：低温電子物性

キーワード：半導体物性 量子エレクトロニクス 量子細線

### 1. 研究開始当初の背景

最近の微細加工技術や高周波エレクトロニクス技術の進展により、量子系のコヒーレンスやダイナミクスを直接捉えることが可能になってきた。例えば、量子ドットへの単一電子の出入りは、近接して設置された量子ポイントコンタクト(QPC)における電流変化として実時間で捉えることが可能であり、この QPC 電荷検出計は、半導体量子情報の分野では標準的な技術として利用されている。

量子ダイナミクスの測定は、量子状態の時間発展を利用した量子情報物理や非平衡系の物理の解明には不可欠であり、そうした実験では、精密且つ高速な測定系が求められる。測定の精密さや広いバンド幅を得るために、最近では市販の測定装置に加え、自作した増幅計を冷凍機内部に設置して高度な測定技術を開発する研究者が増えてきた。それでも、測定すべき電流や電圧が微小な場合には、その測定精度の限界が量子コヒーレンスの検出や系の高速応答を探る際のバンド幅、つまり観測可能なダイナミクスの時間スケールを決定している。例を挙げると、量子ドットに出入りする単一電荷の実時間測定(シングルショット)のバンド幅は最高でも数 MHz に限られており、GaAs 系における核スピンによる電子スピンのディフェージング(数 10MHz)、近藤効果発現に対応する量子素過程(数 100M-GHz)などの重要な物理ダイナミクスが、既存の技術では直接検出不可能となっている。

こうした領域にアプローチするためには、現在の測定精度を 1 桁程度上げる必要がある。電流の測定精度が 1 桁高くなれば、究極的には伝搬する電子を 1 個単位で検出することも可能になるかもしれない。測定における雑音の低減には原理的な限界があり、測定精度を更に上げるためには信号自体を増幅するしかない。

### 2. 研究の目的

本研究は、電子-電子相互作用による非平衡電子の緩和過程を利用して、半導体基板中で電流を増幅する“電子増倍素子”を開発することを目的とした。また、増幅度としては 10 程度を目標とした。

この電子増倍素子を半導体微細構造素子に組み込むことによる精密な電流測定が可能になれば、従来のもより 2 桁程度速い数 10~100MHz 領域の超高速単一電荷測定技術などが実現できる。こうした技術は、希釈冷凍機温度で単一電子単位の量子素過程を超高速実時間測定で捉える新しい技術への足がかりとなる。

### 3. 研究の方法

電子増倍素子の動作原理と評価方法を図 1 に示す。この素子は、注入された非平衡電子が緩和する過程で励起電子を雪崩的に生

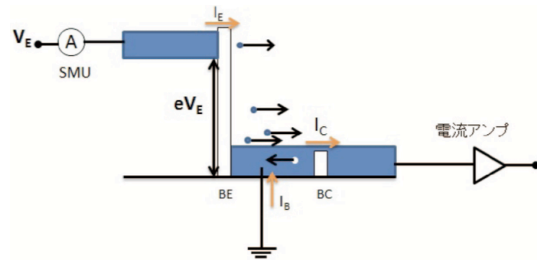


図 1: 電子増倍素子とその評価実験の模式図。エミッターから注入される電流  $I_E$  を SMU で測定する。エミッターとベースとは、バリア BE によって隔てられており、電位差  $V_E$  が印加されている。また、ベースとコレクタとは、バリア BC によって隔てられている。尚、ベースは接地されている。エミッターから注入された電子は、ベースにある電子との相互作用によって、励起電子とホールの対を雪崩的に生成する。ホールは BC によって跳ね返されてグラウンドに吸収されるが、励起電子だけはコレクタに達する。従って、コレクタ電流  $I_C$  は、エミッター電流を増幅した値となる。 $I_C$  を測定することにより、増幅率  $I_C/I_E$  を評価できる。

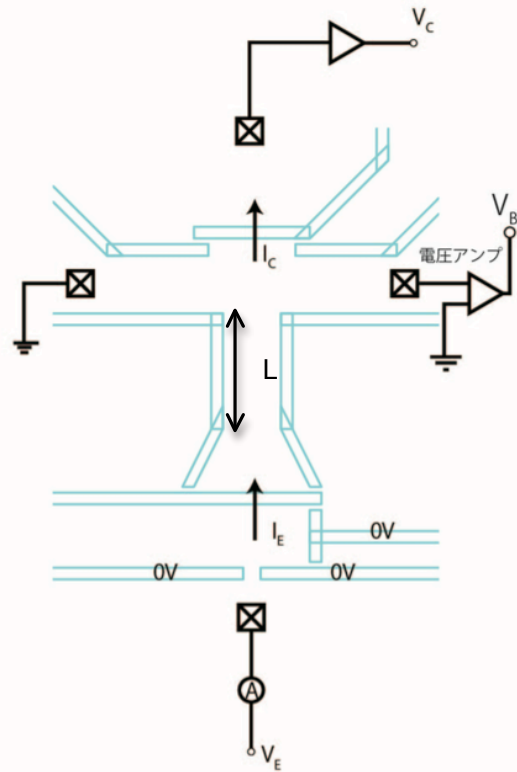


図 2: 電子増倍素子の基本パターンとその評価実験の模式図。増幅機構の長さ  $L$  は、 $2\mu\text{m}$  と  $5\mu\text{m}$  の 2 種類を用意した。また、バリア BE、BC の高さ増幅機構の幅はゲート電圧によって制御できるようにした。

成することを利用した電流増幅機構となっている。本研究では、(1) 電子増倍素子の

デザインとパラメータの最適化と(2)電子増倍素子の微細構造への埋め込みに取り組んだ。

#### (1) 電子増倍素子のデザインとパラメータの最適化

図1に対応する増幅機構として、図2に示すように試料をデザインし、作製した。そして、増幅率をバリアBE、BCの高さ、試料幅、エミッター電圧 $V_E$ などの関数として評価した。

#### (2) 電子増倍素子の微細構造への組み込み

図2において、エミッター側にある量子ポイントコンタクト(QPC)の電流を増幅する実験を試みた。また、2経路干渉計への組み込みに必要となる架橋ゲート構造の作製技術を開発した。

### 4. 研究成果

#### (1) 電子増倍素子のデザインとパラメータの最適化

電子増倍素子の動作を以下のパラメータなどの関数として評価した。その結果、図2のデバイスで最適なパラメータ条件を見出し、目標値に近い増幅率9を得ることができた。ただし、更なる改善の余地も残っている。尚、この成果については論文投稿を予定している。

##### (a) コレクタバリアBC

BCの評価実験ではバイアス $V_E$ を固定し、 $I_E$ が数nA程度になるようにエミッターバリアBEを調整した。BCに印加するゲート電圧の関数として増幅率を測定すると、BCゲートの直下の二次元電子系が空乏化する直前において増幅率が最大となった。理想的には、BCゲートの直下が空乏化した状態で高い増幅率が得られることがより望ましいが、BCに入射する電子の向きが揃っていないためにこのような結果になったと推測できる。増幅機構(ベース)を一次元量細線とし、グラウンドをエミッターバリア側につなぐことによって改善する可能性がある。

##### (b) エミッター電流 $I_E$ (エミッターバリアBE)

バイアス $V_E$ を固定したままエミッターバリアBEの高さを変化させることにより、エミッター電流 $I_E$ を変化させることができる。コレクタバリアを固定し、BEを調整するゲ

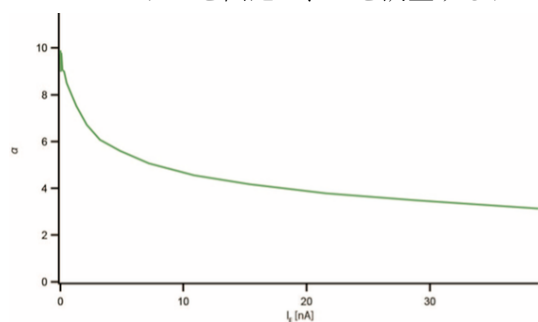


図3： $I_E$ の関数として測定された増幅率。 $V_E=-200\text{mV}$ 、 $L=2\mu\text{m}$ 、温度は $0.3\text{K}$ 。

ト電圧を変化させながら $I_E$ の関数として測定された増幅率 $\alpha$ を図3に示す。電流値の上昇とともに増幅率が低くなっていることが確認できる。これは、電流値が大きいと増幅機構の中にホールが残ってしまうことによると考えられる。この結果は、この電子増倍素子が低電流の増幅により適していることを示している。低電流領域での増幅率は目標としていた値(10程度)に近く、将来的には干渉計を通過する電子を1個単位で検出できる可能性がある。

##### (c) エミッター電圧 $V_E$

増幅率は $V_E$ にも強く依存することが確認できた。 $V_E$ が小さい場合には、電子-電子相互作用による散乱が起こりにくいために緩和長が長くなってしまい、増幅機構が働かない。逆に $V_E$ が大きすぎると電子の速度が大きすぎて緩和が起こりにくくなる。その中間においてのみ、緩和長が増幅機構の長さよりも小さくなり、高い増幅率が観測された。

##### (d) ベース領域の閉じ込め

ベース領域をゲート電極を利用して一次的に閉じ込めることによって増幅率が高くなることが確認された。これは、BCに入射する電子の方向をある程度までは揃える効果があるからであろう。ただし、閉じ込めを強くしすぎるとコンダクタンスが悪くなり、増幅率が低下した。

##### (e) 増幅機構の長さL

増幅機構を長くすることによって増幅率が上がることを期待したが、結果としては $L=2\mu\text{m}$ の試料の方が $L=5\mu\text{m}$ の場合よりも増幅率の最大値が大きくなった。増幅機構にホールが溜まることによる増幅率の低下がボトルネックとなっていると考えられる。

#### (2) 電子増倍素子の微細構造への組み込み

図2の試料において、エミッター側に設置したQPCの電流の増幅を試みた。しかし、QPCから出た電子をうまく増幅機構へと集中させることができず、QPC電流そのものの増幅には至らなかった。しかし、これを試みた試料では、エミッターバリアが不均一になっていることを示すデータがある。これを均一にできれば、原理的にはQPC電流を弾道的に増幅機構へと集めることができるので、再挑戦する価値がある。

また、本研究で開発した電子増倍素子は低電流の増幅に適しているため、これを干渉計に組み込むことによって、伝搬する電子の干渉を単一電子単位で観測できる可能性がある。そのために必要な技術として、架橋ゲート構造の作製技術を開発した。これは、文字通り立体的にゲート電極を配置する技術である。かなり高い再現性でその作製ができるようになったことにより、単一電子単位の干渉を精密測定によって検証する準備が初めて整った。

## 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0件)

[学会発表] (計1件)

1. 山本倫久, “半導体量子電子光学実験の進展”, 日本学術振興会, 先端ナノデバイス・材料テクノロジー第151委員会 研究会「量子ハイブリッドシステム」, 2015年1月23日 (招待講演)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本 倫久 (YAMAMOTO, Michihisa)  
東京大学・大学院工学系研究科・講師  
研究者番号：00376493