

平成 22 年 6 月 10 日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20710110  
 研究課題名（和文） 単一電子回路網形成へ向けてのカーボンナノチューブ単電子トランジスタの開発  
 研究課題名（英文） Development of carbon nanotube single electron transistors toward single electron circuits  
 研究代表者  
 森 貴洋 （MORI TAKAHIRO）  
 独立行政法人産業技術総合研究所・ナノ電子デバイス研究センター・産総研特別研究員  
 研究者番号：70443041

研究成果の概要（和文）：単電子回路網は、理論的には究極の省エネルギー電子回路となるものである。その問題は基本素子となる単電子トランジスタを室温で動作させることにある。本研究課題ではカーボンナノチューブを用いた単電子トランジスタ（CNT-SET）の動作温度向上を目的とした。本研究では高温動作可能な CNT-SET の作製手法として、イオンビームによるカーボンナノチューブの部分変質法を開発した。これを用いて作製した CNT-SET によって 160K 程度での動作が実現された。

研究成果の概要（英文）：The single electron transistors (SETs) are promising candidates of the fundamental components of the future electronics. In principle no others are lower power operable devices than the SET. We focused on the development of the higher temperature operable SET using carbon nanotube (CNT) in this research project. The ion beam irradiation method was developed to fabricate the CNT-SET for the aim. With the method we have achieved the CNT-SET operation up to 160K.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：ナノ電子デバイス

科研費の分科・細目：マイクロ・ナノデバイス

キーワード：カーボンナノチューブ,単電子トランジスタ,電子デバイス

## 1. 研究開始当初の背景

微細化によって進展してきたシリコンテクノロジーにおいては、さらなる高速化・高集積化を目指すに当たり、パラダイムシフトの必要性が議論されている。国際半導体技術ロードマップ（ITRS ロードマップ）によると、

2020～2030年頃には現行のシリコン CMOS に代わるデバイスの導入検討が必要になると予想されており、その候補となるデバイス技術を総称して「Beyond CMOS」と呼んでいる。本研究で対象とする単電子エレクトロニクスは Beyond CMOS 技術の 1 つに挙げられてお

り、近年注目度が増しているトピックである。

単電子エレクトロニクスにおける基本素子は SET となる。実用化の観点からは、(1) 室温で動作すること、(2) 多数の SET を同時に構築できること（生産性の問題）の2点が要求されるが、現状ではこれらの要件を満たす SET は開発されていない。

単電子回路網の実現に向けては、この問題点をクリアする SET の開発が急務である。

## 2. 研究の目的

本研究課題では上記背景に挙げた要件を満たすカーボンナノチューブ (CNT) を用いた SET の開発を目的とした。CNT は直径約 1nm という極めて微細な構造を持つため、デバイスサイズも温度特性向上のために必要な SET においては極めて有利な材料となる。

## 3. 研究の方法

CNT-SET の場合、バリアの形成手法が温度特性向上の鍵となる。そのため、下記のように研究を進めた。

### (1) バリア形成手法の開発

CNT-SET におけるバリアの要件は、高抵抗・低容量の2点である。まずこの条件を満たすバリアの形成手法を開発し、その方法によって CNT-SET が形成可能かどうかの基本調査を行った。

### (2) 上記手法による SET の試作・評価

開発されたバリア形成手法によって実際に SET を試作し、温度特性を評価した。

## 4. 研究成果

### (1) バリア形成手法について

本研究課題においては、イオンビーム変質法によるバリア形成手法を開発した。これまでも CNT の変質にイオンビームを利用する方法は報告されていたが、本研究課題ではこれを低エネルギー化することによってデバイスプロセスに利用可能であることを示した。図 1 に実際の実験結果を示す。図 1 (a) は3つの初期導電率が異なる CNT に対して、100eV の Ar イオンビームを照射した際の、照射量と導電率をプロットしたものである。100eV の低エネルギーイオンの照射によって CNT が変質していく様子がわかる。次に図 1 (b) に示したのは保護膜の効果調べるために行った実験の結果である。実際のデバイスプロセスでは、CNT の必要な部分のみを変質し、その他の部分は変質しない、もしくは変質しても影響が少ない必要がある。本研究課題では、非変質のために電子線レジストである ZEP640A を保護膜として用いた。グラフから、保護膜が 60nm 以上あれば CNT は変質されないことがわかる。ここまでの結果によ

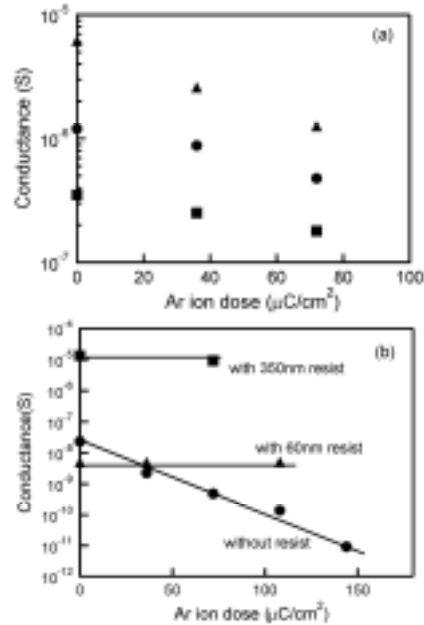


図 1 CNT に対するイオンビームの照射効果

って、Ar イオンビームによって CNT が変質できること、その変質は高抵抗であるというバリアの条件を満たすこと、また必要な部分だけを変質するというデバイスプロセスに必要な技術が実現可能であることが確認された。

### (2) SET の試作・評価

まず極低温 (1.5K) 測定において SET としての性能評価およびバリア容量の評価を行った。図 2 に SET として動作している証である、いわゆるクーロンダイヤモンドを観測したデータを示す。このクーロンダイヤモンドの形状を解析することによって、各種のデバイスパラメータが抽出される。まず形成された量子ドット長は 25.7nm であり、これは設計値が 25nm であったことから、設計通りの

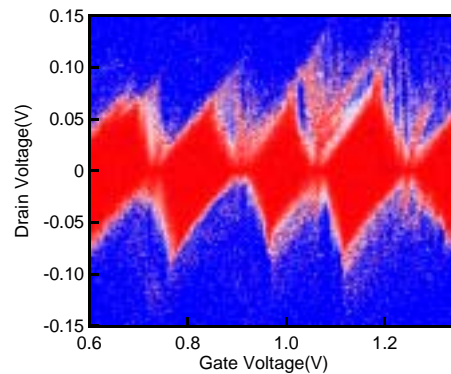


図 2 CNT-SET で観測されたクーロンダイヤモンド

CNT-SET が形成できていることがわかる。次にバリア容量は1つのバリアに対して0.53aFであった。これは最も簡単なCNT-SET作製手法である金属-CNT間のバリアを用いる手法におけるバリア容量に比較すると2桁低いオーダーであり、極めて低容量のバリアが形成されていることが確認された。温度特性を決定する重要なパラメータである帯電エネルギーは80meVとなり、この点では室温動作の条件(約26meV以上)をクリアしている。

次にSETにおけるゲート特性の特徴であるクーロン振動の温度依存性を測定することで、最高動作温度を評価した。その結果を図3に示す。このグラフでは160Kまでは明瞭なクーロン振動が観測されており、180Kにおいても若干振動しているようにも見えるが、その振幅が極めて小さいため、最高動作温度を160Kに決定した。

帯電エネルギーが室温動作要件を満たしているにもかかわらず動作温度が160Kで留まった理由としては、バリア高さが不十分であったことが考えられる。これはバリアのプロパティとしてはさらなる高抵抗化が必要であると考えられる。

以上のように、本研究課題ではCNT-SETにおけるバリア形成手法としてイオンビーム変質法を開発した。この方法は一括してCNT-SETを複数形成可能な手法であり、産業応用可能な形成手法となっている。またそれがCNT-SETの温度特性を改善することを示し、同手法によるCNT-SET形成が室温単電子回路網の実現に向けて可能性をもつものであることを示した。

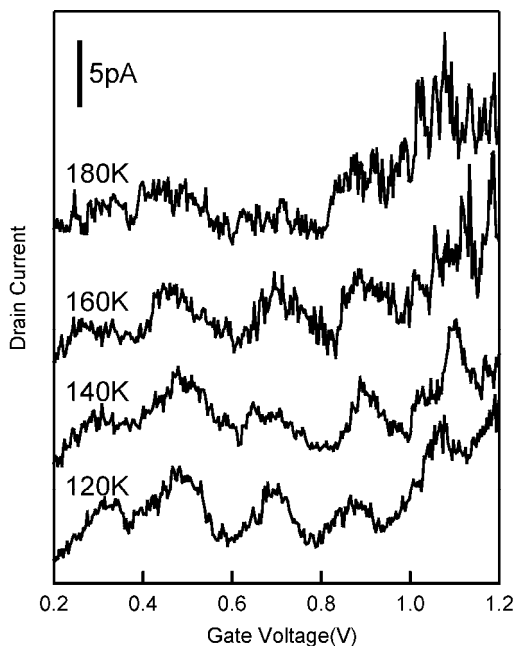


図3 クーロン振動の温度依存性

## 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2件)

“Higher temperature operation of the single electron transistors based on single-wall carbon nanotubes”

T. Mori, S. Sato, K. Omura, S. Yajima, Y. Tsuruoka, K. Uchida, Y. Achiba, H. Yajima, and K. Ishibashi

Sensors and Materials 21, 385-391 (2009) 査読有

”Formation of single electron transistors in single-walled carbon nanotubes with low energy Ar ion irradiation technique”

T. Mori, S. Sato, K. Omura, S. Yajima, Y. Tsuruoka, Y. Achiba, and K. Ishibashi

Journal of Vacuum Science and Technology B 27, 795-798 (2009) 査読有

[学会発表](計3件)

Barrier formation technique using low energy Ar ion irradiation to form wide temperature range operable SWCNT-SET

T. Mori, Y. Tsuruoka, Y. Achiba, and K. Ishibashi

9th IEEE Conference on Nanotechnology 2009/7/26~7/30 Genoa, Italy

Ar イオンビーム部分照射による high-EC SWCNT-SET の形成

森貴洋、鶴岡泰広、阿知波洋次、石橋幸治  
第56回応用物理学関係連合講演会

2009/03/30~04/02 筑波大学

Formation of Single Electron Transistors in Single-Walled Carbon Nanotubes with Low Energy Ar Ion Irradiation Technique

T. Mori, S. Sato, K. Omura, S. Yajima, Y. Tsuruoka, Y. Achiba, and K. Ishibashi

International Conference on Nanoscience and Technology 2008

2008/07/20~07/25 Keystone, USA

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日：  
国内外の別：

取得状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

森 貴洋 (MORI TAKAHIRO)

独立行政法人産業技術総合研究所・ナノ電子デバイス研究センター・産総研特別研究員

研究者番号：70443041