

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686055

研究課題名(和文)集積化可能な超高速カーボンナノチューブ発光素子開発

研究課題名(英文)Ultra-high-speed and small-footprint carbon nanotube light emitters

研究代表者

牧 英之(Maki, Hideyuki)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：10339715

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,800,000円、(間接経費) 6,240,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、カーボンナノチューブを用いて超高速・超小型の発光素子を開発することを目的としている。ここでは、半導体でのエレクトロルミネッセンス発光素子および黒体放射による発光素子について検討した。エレクトロルミネッセンス発光素子および黒体放射素子では、その発光機構の解明およびデバイス構造最適化による高速発光素子の作製に成功した。また、光通信測定では、微弱光下での測定系作製に成功した。また、微小共振器を用いて、発光の狭線幅化に成功した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed the high-speed and small-footprint light emitters based on carbon nanotubes. We used the EL emitters and blackbody emitters. For these emitters, we investigated the light emission mechanisms, and succeeded in fabrication of high-speed light emitters. In addition, we constructed the optical-communication measurement system. We also succeeded in fabrication of microcavity device and in observation of narrow-linewidth emission.

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：光デバイス・光回路 カーボンナノチューブ

1. 研究開始当初の背景

情報化社会の急速な進展に伴って情報処理・情報伝達で取り扱う情報量が急増しており、現在の電子集積回路・電気配線による信号処理・伝達では、高速化に限界が近づきつつあるとともに、集積化・高速化に伴って消費電力が急増していることから、情報通信・処理の高速化しつつ低消費電力化を実現する技術として、光を用いた信号処理・通信が解決策の一つと考えられている。しかし、集積回路チップ内やチップ間・ボード間・機器間での光情報処理・通信を広く普及させるためには、()基板上に集積可能な微小な発光素子を()現在の集積回路の中核を担うシリコンウェハー上へ直接形成することが不可欠であるが、現在使われている化合物半導体では実現が困難であり、化合物半導体が変わる新たな材料系を探索することが必要不可欠となっている。そこで本研究では、光による情報処理・通信を実現する新たな発光材料として、究極の一次元ナノ材料であるカーボンナノチューブ(CNT)に着目した。これまでに一本のCNT、および多数のCNTを含むCNT薄膜を用いた発光素子の作製に成功し(図1)電子・正孔再結合に伴うエレクトロルミネッセンス(EL)を観測することに成功している。また、素子構造・発光測定装置の改良により高バイアス印加を可能とすることで、現在報告されている中で最も短波長(1.1 μ m)なEL発光を世界に先駆けて観測することに成功した(図2)。さらに、エレクトロルミネッセンスの発光機構の解明も進め、発光の励起機構として電子正孔注入励起および衝突励起の2つ機構が同時に発現することを電気・発光同時測定により明らかにした。

また、研究代表者は、これまでの研究に、

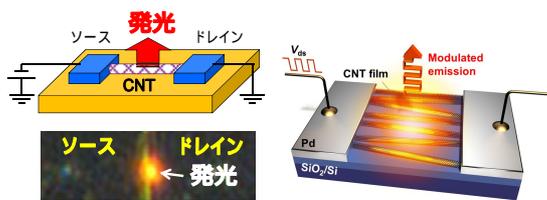


図1 単一CNTとCNT薄膜デバイス構造と発光の様子

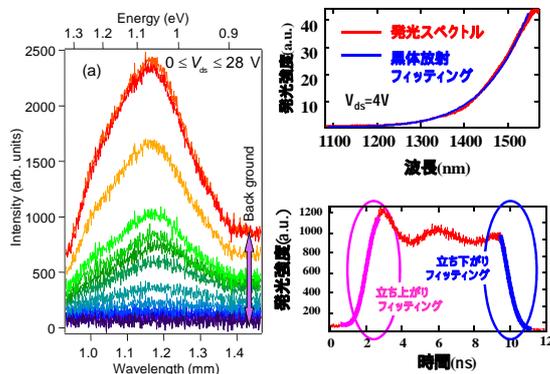


図2 EL素子の発光スペクトルおよび黒体放射素子の発光スペクトルと時間分解測定

において高い歩留まりを有するCNT薄膜発光素子を用いて、黒体放射による連続スペクトル光源の開発に成功した。また、パルス電圧印加による時間分解発光測定を行ったところ、CNTの低熱容量・高熱伝導性に起因して、黒体放射であるにも関わらず立ち上がり1nsと高速変調性を有していることが確認され、本素子は、単一の発光素子から高速変調可能な連続スペクトル光源を得ることができる、全く新しい発光素子であることが明らかとなった(図2)。また、この高速変調光源を用いて、光ファイバー内へのパルス光伝送実験を行い、1nsのパルス幅を有するパルス光を光ファイバー中に伝送させることに成功してきた。

2. 研究の目的

発光の高速変調機構の解明や素子構造の検討により超高速・超小型・省電力・低コストのCNT発光素子を開発するとともに、実際に光ファイバーを用いた光通信の実証実験を行うことにより、現在の化合物半導体では実現できないシリコン上へ集積可能な微小発光素子を実現することを目指した。これにより、集積回路チップ内光源、チップ間・ボード間・機器間光通信用光源として利用可能なCNT発光素子を実現することを目指した。

3. 研究の方法

(1) 電子・正孔再結合発光素子および黒体放射素子の動作原理解明に基づいた発光特性・高速変調性の向上

研究代表者がこれまで進めてきた電子・正孔再結合によるEL発光素子および黒体放射発光素子の高い集積性・高速変調性・省電力性を明らかにするとともに、動作原理解明による特性向上を図ることを目的とした。CNT-EL発光素子においては、それまでに明らかにした発光励起機構やバンド変調効果を踏まえ、本研究では、CNT薄膜EL素子における発光励起機構の解明と発光波長制御・発光効率向上・高速変調性向上に関する研究を行った。

一方、研究代表者が明らかにした黒体放射発光素子での高速変調性に関しては、これまでに直径1nmの微小な円筒構造に起因した(a)極めて小さい熱容量と(b)高い熱伝導性によると考えられていた。そこで、本研究段階では、詳細な高速変調機構を理論的に明らかにするとともに、素子構造を最適化することによって更なる高速化を目指した。

(2) 光ファイバー・フォトレーザーを用いた高速光通信の実証

上記の素子に対して光ファイバーを結合して、高効率なファイバー導入系を構築するとともに、光通信で実際に用いられているフォトレーザーを用いて、実時間で高速変調パルス光を検出する測定系を構築することにより、本素子を用いた高速光ファイバ

ー通信を実証することを目指した。素子にパルスジェネレータを用いてパルス電圧を印加し、発光パルスを対物レンズやファイバークプラを通してフォトレシーバーへ導入した。発生する検出信号をデジタルオシロスコープにより観測してフォトレシーバーからの信号評価を行った。

(3) シリコン上へ集積化可能な面内・垂直発光素子、共振器による狭線幅化

計算機等の更なる高速化・省電力化に向けて、現在の電気配線に代わる光による情報処理・伝送を実現する新たな微小光源の開発を目指しているが、光ファイバーによる広帯域伝送を実現するため、垂直方向に共振器構造を有する狭線幅垂直発光素子を開発することを目指した。ここでは、発光層であるCNTに対して、誘電体薄膜の微細加工によって導波路構造を形成して垂直方向に発光を取り出すとともに、発光層・誘電体薄膜をミラーで挟んだ共振器構造を作製することにより、ミラー内で共振する光のみを取り出し、発光の指向性向上および発光波長の狭線幅化を行った。

4. 研究成果

(1) 電子・正孔再結合発光素子および黒体放射素子の動作原理解明に基づいた発光特性・高速変調性の向上

電子・正孔再結合発光素子では、半導体CNT薄膜発光素子の発光機構を解明するため、様々なバイアス電圧およびゲート電圧印可時において、発光スペクトルを測定した結果、吸収スペクトルで予想された複数のカイラリティーからのEL発光が主に寄与するとともに、バックグラウンドとしてわずかな黒体放射発光が含まれることが明らかとなった(図3)。CNT発光素子の電流-ゲート電圧特

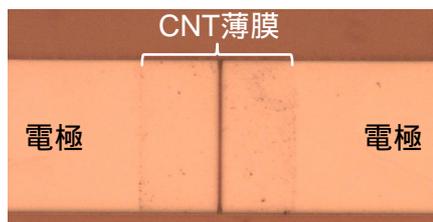


図3 半導体CNT薄膜素子

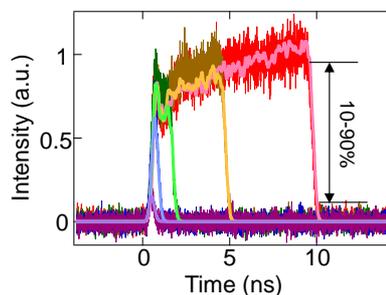


図4 高速応答CNT黒体放射発光(細線)と解析的シミュレーション(太線)

性および発光特性の相関を調べた結果、電流-電圧特性においてp型半導体特性を示したが、発光スペクトル測定においても同様に正ゲート側で発光強度の減少が見られ、多数キャリアに支配された衝突励起機構によるEL発光であることが明らかとなった。

また、黒体放射発光素子では、これまでの単純な2端子構造では、特性インピーダンス50からの不整合が各所で起こることを踏まえ、コプレーナ導波路を用いたデバイス構造設計を行い、発光時間分解測定を試みた。その結果、従来型の2端子素子においては発光の立ち上がり時間が約0.5nsであったが、特性インピーダンスの改善により立ち上がり時間は約100psとなり、5倍程度の大幅な高速化に成功した(図4)。さらに、パルス電圧印可によるパルス光発生を試みたところ、新規デバイス構造により120psのパルス光発生に成功し、パルス幅を1/4程度も狭線幅化することに成功した。さらに、黒体放射発光素子の解析的なシミュレーション手法を構築し、実験結果を完全に説明することに成功した。

(2) 光ファイバー・フォトレシーバーを用いた高速光通信の実証

実時間測定系の構築においては、光軸調整には比較的高輝度のレーザーが必要であることから、レーザー光源を用いた光軸調整手法を構築した。これにより、光源から超高感度アバランシェフォトダイオードまでの高精度な光軸調整を可能とした。さらに、グラフェン発光素子において想定される超微弱な発光の観測には、光軸調整のみでは不十分であり、光軸調整に加えて光検出系の検出回路最適化が同時に行える必要がある。そこで本研究では、レーザー光源に対してアッテネータを通した光減衰を施した光学系を構築し、超微弱光下での光検出実験も同時に行える測定系を構築した。これにより、グラフェン発光素子と同程度の微弱光下での発光測定が可能となり、光軸調整と回路調整の両立が可能となった。現在、この測定系を用いて、減衰した光源下において1GHzでの光検出に成功していることから、40-60dB程度の減衰下において発光測定回路系の最適化を行うことにより、グラフェン発光素子での実時間での1Gbps光通信測定が可能となる。

(3) シリコン上へ集積化可能な面内・垂直発光素子、共振器による狭線幅化

本研究では、光共振器構造を利用した垂直射出型の狭線幅発光素子の作製も試みた。ここでは、CNT黒体放射発光素子をファブリペロー共振器内に配置することにより、発光ピークを狭線幅化することに成功した。これまでに、金属ミラー共振器および分布グラグ反射鏡による共振器を実現し、狭線幅化に成功している(図5)。

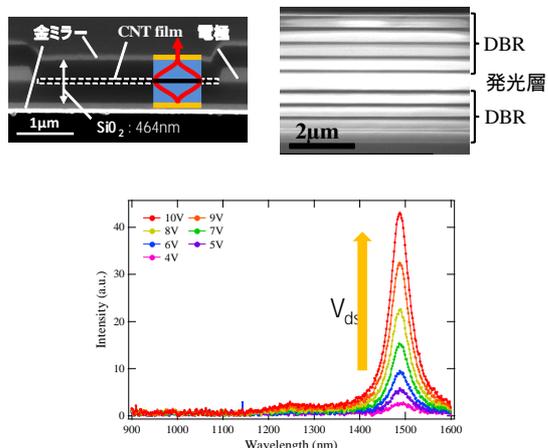


図5 作製した金属ミラー共振器素子および分布ラッグ反射鏡素子。下図は、金属ミラー素子の発光スペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Tatsuya Mori, Yohei Yamauchi, Satoshi Honda, Hideyuki Maki, An electrically-driven, ultra-high-speed, on-chip light emitter based on carbon nanotubes, Nano Letters, 14(6), 3277-3283, 2014. (査読有)
DOI:10.1021/nl500693x

牧英之、シリコンチップ上・超小型カーボンナノチューブ発光素子、化学工業、5月号、65巻5号、360-365、2014。(査読無)

Masanori Fujiwara, Daiju Tsuya, and Hideyuki Maki, Electrically driven, narrow-linewidth blackbody emission from carbon nanotube microcavity devices, Appl. Phys. Lett. 103 (2013) 143122, 2013. (査読有)

DOI:10.1063/1.4824207

〔学会発表〕(計7件)

鈴木祐司、牧英之 “半導体カーボンナノチューブ薄膜を用いた微小・高速発光素子”、第61回応用物理学会春季学術講演会、相模原市、2014年3月20日。

遠藤匠、早瀬潤子、牧英之 “単層カーボンナノチューブを用いた通信波長帯域での単一光子生成”、第61回応用物理学会春季学術講演会、相模原市、2014年3月17日。

T. Endo, J. Ishi-Hayase, H. Maki, “Telecom-Wavelength Photoluminescence from Single-Walled Carbon Nanotube for Single Photon Emission”, The 12th Asia Pacific Physics Conference, Japan, Jul.16, 2013.

Y. Suzuki, H. Maki, “Light emitter based on purified semiconducting Single-walled carbon nanotube films”, The 12th Asia Pacific Physics Conference, Japan, Jul. 16, 2013.

Y. Suzuki, H. Maki, “Light emitter

based on purified semiconducting single walled carbon nanotube films”, Fourteenth International Conference on the Science and Applications of Nanotubes, Finland, June 26, 2013.

H. Maki, T. Mori, Y. Yamauchi, S. Honda, “Carbon nanotube based ultra-high-speed blackbody emitters”, Fourteenth International Conference on the Science and Applications of Nanotubes, Finland, June.26, 2013.

M. Fujiwara, D. Tsuya, and H. Maki, “Narrow Linewidth Carbon Nanotube Blackbody Emitter with a Microcavity”, 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials(SSDM 2012), Kyoto, Sep. 27, 2012.

6. 研究組織

(1)研究代表者

牧 英之 (Maki Hideyuki)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：10339715