

高配向カーボンナノチューブ薄膜における
異方性熱特性・発光特性と光・電子デバイス応用

2024 年度

俣野眞一郎

主 論 文 要 旨

No.1

報告番号	㊦ 乙 第	号	氏 名	俣野眞一朗
主 論 文 題 名： 高配向カーボンナノチューブ薄膜における異方性熱特性・発光特性と光・電子デバイス 応用				
(内容の要旨) 偏光分析技術は基礎研究の分野から工業応用と様々な場面で活用されており、偏光分析技術を用いるためには、広い波長帯域に光強度を持つ偏光光源が重要となっている。従来の偏光光源では、非偏光の熱光源に偏光子を挟む必要があり、広い波長帯域の偏光を光源からダイレクトに生成することは難しかった。そこで、本研究ではナノカーボン材料であるカーボンナノチューブ(CNT)が高密度・高配向度に整列された集合材料である CNT 配向膜に着目した。CNT は擬一次元構造を有するナノ材料であり、ナノ構造由来の熱発光が示されていた。そして、CNT 配向膜は CNT の特徴をマクロデバイスへ反映させることができる材料として注目されている。そのため、CNT 配向膜では、CNT 由来の異方的な物性が調べられてきたが、CNT 配向状態における熱発光現象は示されていなかった。そこで本博士論文では、CNT 配向膜による熱発光の調査し、光デバイスとしての特性評価を行った。 本博士論文は7章から構成される。第1章は序論として研究背景を記し、ナノカーボン材料の基礎物性やナノカーボン熱光源について述べる。第2章では、本研究において、CNT 配向膜のデバイス作製やデバイスの発光特性評価等のために用いた実験装置・解析手法について紹介をする。第3章では、CNT 配向膜の熱発光に対する光学特性の評価を行った結果を示す。当研究では、CNT 配向膜を用いて電圧印加式の発光デバイスを作製した。CNT 配向膜は固有の異方的な物性を有するため、印加電圧方向に対して配向方向が平行・垂直の関係となるような2種類のデバイスを用意した(以後、平行・垂直デバイスと呼ぶ)。CNT 配向膜デバイスは赤外発光を示し、スペクトル測定により赤外波長帯域に広く光強度を有する熱発光であることが示された。そして偏光依存性の測定により、CNT 配向由来の偏光熱発光をすることが示された。また、平行・垂直デバイスにおいて実験的に異なる発光分布を有することが示された。そこでシミュレーション解析をすることで、CNT 配向膜・電極の接触熱コンダクタンスが熱発光に寄与していることが示された。第4章では、CNT 配向膜のマイクロ偏光熱光源に対する変調特性を評価した結果を示す。当研究では、CNT 配向膜を用いて電圧印加式の1μm^2マイクロ熱光源を作製した。そして、熱発光に対して時間分解光学測定を行うことで、電圧シグナルに対する応答性を評価し、応答速度が配向方向によって異なることが明らかとなった。その異方的な応答性の機序を明らかにするため、マイクロ熱発光デバイスを対象とした時間依存シミュレーションを行うことで、平行デバイスでは20 MHz の高速変調特性を有することが示された。さらに、CNT 配向膜上の CNT 膜・電極コンタクトの影響により、異方的な応答特性を有することが明らかとなった。第5章では、ナノ架橋構造を組み込んだ CNT 配向膜デバイスにおける偏光熱発光の光学特性結果について示す。通常の熱発光デバイスでは、シリコン基板上に作製をしているため CNT 配向膜と基板は接触している。そのため当研究では、フッ酸プロセスによって CNT 配向膜を浮かせた架橋構造を作製し、偏光熱発光の光学測定を行なった。その結果、架橋 CNT 配向膜デバイスでは、偏光度0.9の高偏光度化が実現されることを示した。これは、基板発光の影響が無い CNT 配向膜からのダイレクトな偏光を示している。第6章では、CNT 配向膜における熱破断後の状態を分析した結果を示す。CNT 配向膜は熱耐久特性があり高温状態を維持することができ、それが熱光源としての優位性でもある。しかし、想定以上の電力を印加すると CNT 配向膜は熱破断を起こす。当研究では、熱破断後における電気特性を評価することで、従来の材料では見られない電流の回復並びにスイッチング現象が観測された。さらに、CNT 配向膜固有のパラメータである配向方向に対するスイッチング依存性を評価することにより、配向による低抵抗状態の変動が示された。第7章では、本研究の結論と当研究領域の今後の展望について述べる。				

Thesis Abstract

No. _____

Registration Number	☒ "KOU" ☐ "OTSU" No. _____ *Office use only	Name	Shinichiro Matano
Thesis Title Study of thermal and radiative anisotropic properties on a highly-aligned carbon nanotube film for optical and electronic devices			
Thesis Summary Technology using polarized light is essential in various fields, from academic research to industrial applications, and a polarized light source covering a broad wavelength range is required for polarized light analysis. Conventionally, one can use an unpolarized light source with an external polarizer, but it is challenging to produce polarized broadband light directly from a light source. An aligned carbon nanotube (CNT) film is a promising material for a light emitter covering a wide wavelength range. A CNT has a quasi-one-dimensional structure, leading to polarized light emission. An aligned CNT film is a monocrystalline based on single-wall CNTs. In the film, CNTs are well aligned and densely packed, where anisotropic characteristics due to a CNT are expected to emerge in an entire film. However, thermal emission property on an aligned CNT film has not been reported yet. This study investigated thermal radiation from a highly-aligned CNT film, and evaluated emission properties as a polarized light source. This thesis consists of seven chapters. Chapter 1 provides the research background and describes the basic properties of carbon nanomaterials and the previous studies on a thermal emitter based on carbon nanomaterials. Chapter 2 includes information about research equipment and analysis methods used in this study. Chapter 3 shows the results and the discussion on thermal radiation from an aligned CNT film. In this study, electrically driven thermal light emitters were fabricated using an aligned CNT film. The devices have two types; in one device (named "parallel device"), the applied voltage direction is parallel to the CNT's alignment direction, and in the other device (named "perpendicular device"), the voltage direction is vertical to the alignment direction. In both devices, infrared emissions were observed, and emission spectrum data indicate that the emissions are derived from blackbody radiation. Polarization measurement shows thermal radiation from an aligned CNT film is polarized along the CNT alignment direction. Moreover, simulation analysis revealed that the different emission distributions between the parallel and perpendicular devices are due to the CNT-electrode contact thermal conductance. Chapter 4 shows the results and the discussion on the modulation property of polarized thermal radiation from an aligned CNT film device. In this study, electrically driven thermal light emitters were fabricated with a 1 μm^2 light-emitting area using an aligned CNT film. The time-resolved optical measurement found that the emission response speed depends on the alignment direction, reflecting the anisotropic properties of an aligned CNT film. For the investigation of the anisotropic response speed, a time-dependent 2D thermal transfer simulation was prepared. The simulation results revealed that the parallel device has ~20 MHz high-speed response, and the contact			

thermal conductance between an electrode and a CNT film, plays an important role in the thermal radiation from an aligned CNT film. Chapter 5 shows the results and the discussion on an aligned CNT film device with a suspended structure. In this study, electrically driven thermal light emitters were fabricated with an aligned CNT film suspended. The silicon oxide under the aligned CNT film was removed in the device through a hydrofluoric acid etching process. The polarization analysis and the spectrum measurement revealed that the suspended device improves the polarization of thermal radiation from an aligned CNT film with ~ 0.9 polarization degree. It indicates that the suspended device enables us to obtain polarized thermal radiation directly from an aligned CNT film without the effect of the substrate. Chapter 6 shows the results and the discussion about the thermal breakage observation on an aligned CNT film. An aligned CNT film has excellent heat resistance, which is a critical advantage for a thermal light emitter because a thermal emitter requires a high-temperature state. In this study, the Joule-heating power over the CNT's resistance limit was applied to the aligned CNT film device, and electrical and optical properties were measured after the thermal breakage. The results show that the electrical paths are recovered after the breakage, and a resistive switch phenomenon occurs on an aligned CNT film. Moreover, through the investigation of switch dependence on the CNT's alignment direction, it was found that on-state conductance depends on the alignment direction. Chapter 7 describes the conclusion and the future prospects of this study.