

令和 6 年 4 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14678

研究課題名（和文）高出力環境振動発電のためのグラフェンをドーピングした液晶のダイナミクスの解明

研究課題名（英文）Investigation of the dynamics of graphene-doped liquid crystals for high power vibration energy harvesting

研究代表者

三好 智也（Miyoshi, Tomoya）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・特任助教

研究者番号：90809641

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：誘電異方性と流動性を併せ持つ液晶は、MEMSトランスデューサへの応用が近年注目されている。一例として、静電型エレクトレット振動エネルギーハーベスタの電極間ギャップにネマチック液晶を挿入することで2桁の高出力化が可能で、外部場が存在する状態での振動流中における分子配向や誘電特性の動的応答を調べる必要がある。液晶の配向と誘電特性を同時に評価するために、強磁場印加のための高アスペクト比・ブリッジ構造チャネルシリコンマイクロ流体デバイスを作製した。ネマチック液晶として5CBを用い、定常層流と振動層流を与えたときのインピーダンス計測を行いその誘電特性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

環境発電は、周囲の環境に薄く広く存在するエネルギーを回収して小電力電子デバイスを動作させる技術であり、Society 5.0の共通基盤技術としてIoTの社会実装に向けたメンテナンスフリーの自立電源として大きな期待が寄せられている。

小型振動発電の高出力化に寄与する本研究により、電池交換不要な無線センサノードの実現が促進され、構造ヘルスマニタリング、セキュリティ、ウェアラブルデバイスなどへの応用によるサステナブルな社会の実現に貢献できると考える。

研究成果の概要（英文）：Liquid crystals, which possess both dielectric anisotropy and flow properties, have attracted much attention in recent years for their application in MEMS transducers. As an example, while inserting nematic liquid crystals between electrodes can increase the output power of electrostatic/electret vibration energy harvesters by two orders of magnitude, it is necessary to investigate the dynamic response of molecular orientation and dielectric properties in vibrational flow in the presence of an external field. In order to simultaneously evaluate the orientation and dielectric properties of liquid crystals, a high-aspect-ratio and bridge-structure channel silicon microfluidic device capable of applying a strong magnetic field was fabricated. We used 5CB as a nematic liquid crystal and measured its impedance when subjected to steady and oscillatory laminar flow to clarify its dielectric properties.

研究分野：電子デバイス

キーワード：液晶 振動発電 グラフェン

1. 研究開始当初の背景

環境発電は、周囲の環境に薄く広く存在するエネルギーを回収して小電力電子デバイスを動作させる技術であり、Society 5.0 の共通基盤技術として IoT の社会実装に向けたメンテナンスフリーの自立電源として大きな期待が寄せられている。環境中に存在するエネルギー源として、光や熱、電波などがある中で、最も普遍的にかつ高いエネルギー密度で存在する環境中の振動から発電する環境振動発電は構造ヘルスマニタリング、セキュリティ、ウェアラブルデバイスなど広い応用に向けて開発されている。環境振動発電の課題は、発電可能な周波数帯域の狭さや製作プロセスなどが挙げられている中で、最も大きな課題はその発電出力の大きさにある。種々の小電力アプリケーションに用いるにあたって主に産業界から要求されている電力レベル (10mW ~ 1W) と、環境発電デバイスが出力可能な電力レベル(10 μ W ~ 1mW)の間には、電子回路の消費電力の改善が日進月歩で行われている中でも、未だに 1 桁以上の大きな隔りがある。

そこで近年、液晶材料を機能性液体として利用して静電誘導型の振動発電デバイスの発電出力を向上させる研究が行われており、初期的な成果として 5CB というネマティック液晶を振動発電デバイスの空気ギャップに挿入することによって約 100 倍の発電出力増加が得られている。発電出力の著しい増加に寄与しているのは液晶の誘電率異方性にあるのだが、そこで問題になっているのは液晶の電気抵抗率である。一般的に液晶は絶縁材料として区分されるが、環境振動発電のようなマイクロ発電デバイスにおいては、空気と同等程度の高い電気抵抗率を有していない場合大きな漏れ電流が発生し、高出力発電をしてもそれと同時に電力が散逸してしまい有効な電力として外部に取り出せない。液晶の誘電率異方性と電気抵抗率にはトレードオフの関係が見られるため、新しい分子構造を有する望ましい特性の液晶の合成が困難とされている中、これを打ち破る何らかの方法によって大きな誘電率異方性と高い電気抵抗率の両方を備えた環境振動発電用の機能性液体を実現する必要がある。

望ましい特性を有する新規の分子構造を持つ液晶の合成は困難であり、そのため特性改善のための液晶へのナノマテリアルのドーピングが広く行われている。金属ナノ粒子や強誘電ナノ粒子などが主にディスプレイ向けの電気工学的な特性改善のために研究されている中、近年グラフェンナノシートをドーパントした液晶の誘電特性や電気容量のスイッチング動特性など電気機械特性への影響について報告された。0.0002wt%の極微量のグラフェンのドーピングで誘電率異方性が 3 倍になり、これは例えば誘電率異方性が 3 程度 ($\epsilon_{\parallel}=6, \epsilon_{\perp}=3$) と小さく高い電気抵抗率の液晶の場合(MLC-7030)、発電力がドーピングしない場合と比べておよそ 10 倍増大することとなる。しかし、誘電率異方性の増大と同時に、電気抵抗率は 1 割程度にまで小さくなり、漏れ電流は大きくなってしまふ。グラフェンのドーピングによる誘電率異方性の増大は振動発電の大出力化に寄与するものであるが、電気抵抗率の望ましくない低下が発生しており、これはグラフェンの良好な電気伝導率が寄与していると思われるが、誘電率異方性の増大も電気抵抗率の低下も明確なメカニズムの解明は行われていない。

グラフェンは上述した誘電特性の例のように多くのユニークな特性を有しているが、その中にグラフェンの異常に大きな反強磁性がある。例えば、グラフェンが多数積層したグラファイトの直径 50mm x 2mm の円板は、ネオジム磁石程度の磁場によって 0.1N 弱の反磁性磁気力を生じることが報告されており、単層であるグラフェンはさらに顕著な反磁性を有することが理論的に指摘されている。つまり、液晶中にドーピングしたグラフェンナノシートに対して、外部磁場

は大きな相互作用を生じさせることができ、液晶中におけるグラフェンの濃度分布を制御できることが示唆されるが、これについて報告された例は一切ない。

2. 研究の目的

本研究では、上述の考察からグラフェンと液晶の分子間と界面相互作用、また外磁場による液晶中のグラフェンの分布制御に着目して、IoTの社会実装のための自立電源である大出力の環境発電デバイス実現に資するグラフェンと液晶のダイナミクスの解明を目的とする。

Fig. 1 上図に示しているように、従来の液晶を用いた環境振動発電においては、液晶をそのまま空気の代わりにギャップに挿入して、その異方性誘電率を利用して、対抗電極間の発電に寄与する静電容量を大きく($\alpha\epsilon_{\parallel}$)、発電量を減少させる寄生容量を小さく($\alpha\epsilon_{\perp}$)して発電の高出力化を実現していた。しかし、誘電率異方性が大きい液晶は電気抵抗率が小さいというトレードオフの関係が見られており、漏れ電流の影響により発電出力の散逸が問題になっている。

そこで、Fig. 1 下図のように、グラフェンをドーピングして、さらにグラフェンの反強磁性を利用して外部磁場によってその濃度分布を制御することによって、グラフェンの濃度が高い可動部側の層では大きな異方性誘電率を得つつ、グラフェンの濃度が低い固定電極側では漏れ電流を抑制するために電気抵抗を高める事を着想した。本着想は上述の考察から導き出したものであるが、振動や温度勾配など機械刺激下における液晶とグラフェン、またデバイスとの界面の間の相互作用を解明することができれば、環境発電分野における革新的な大出力発電の実現に留まらず、液晶分野におけるドーパントの分布の制御による新たな特性発現としての成果にも繋がる。

3. 研究の方法

本研究では、上述のようにグラフェンと液晶の分子間と界面相互作用、また磁場印加による液晶中のグラフェンの分布制御に着目して、グラフェンと液晶のダイナミクスの解明を行う。具体的には、評価用液晶セルの作成、ネマチック液晶の定常層流と振動層流における配向と誘電特性評価を行った。

4. 研究成果

Fig.2 に示すように、テンパックス-シリコン-テンパックスのサンドイッチ構造を持つマイクロ流体デバイスを製作した。高アスペクト比シリコンチャンネル（幅 100 μm 、高さ 525 μm ）を深掘りエッチング (DRIE) で形成した。上下のテンパックスは 46%HF でウェットエッチングして加工した。それら 3 層を陽極接合で組み立てて、注入口と排出口を PDMS

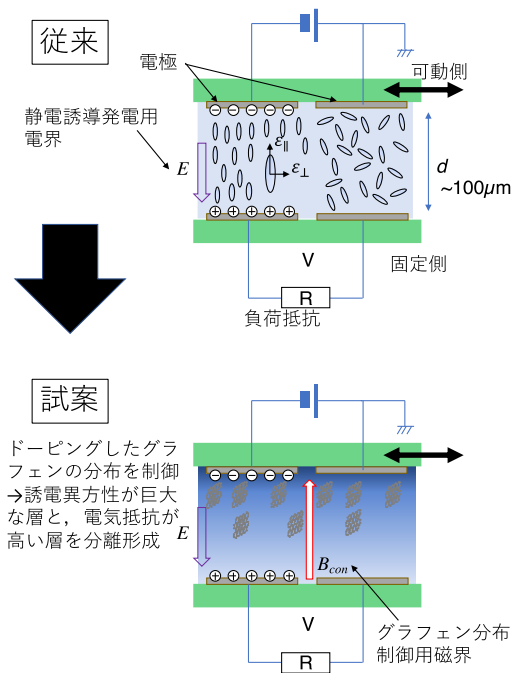


Fig. 1 グラフェンをドーピングした静電誘導型環境振動発電用液晶

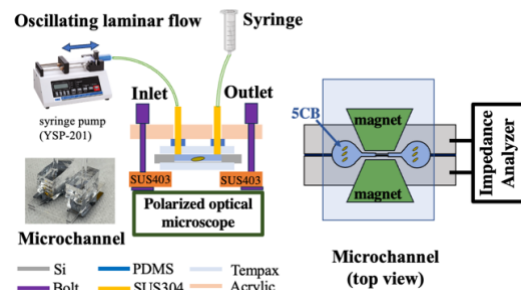


Fig. 2 液晶評価実験系

モールドによって封止した。観察領域はブリッジ構造になっており、永久磁石を一对配置することで磁場を印加することができる。この実験系では、インピーダンスアナライザー（1260 Impedance/Gain-Phase Analyzer、Solartron Analytical）を用いて誘電率と電気抵抗率を測定し、偏光光学顕微鏡を用いて液晶の配向を測定することができる。

ネマチック液晶として 4-Cyano-4'-pentylbiphenyl (5CB) を用い、シリンジポンプを用いて液晶の定常層流および振動層流を形成した。Fig.3 は、流量と振動数を変化させたときの 5CB の誘電率と抵抗率を示している。静止時に比べ、流動を与えることで抵抗率の顕著な増大が得られた。また、流量の増加とともに誘電率は減少し、抵抗率は増大した。一方、振動数を増加させると、静止時に比較して誘電率が増大し、抵抗率は減少した。特に、周波数 2Hz 付近においては静止時に比べて誘電率を維持しつつ高い抵抗率が得られることを明らかにした。得られた結果については、応用物理学会春季講演会にて報告した。

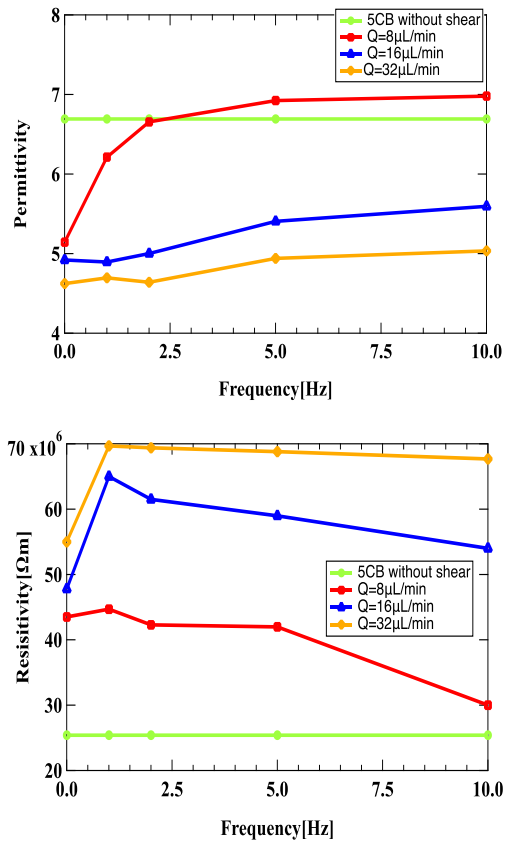


Fig. 3 振動流条件下での 50V の交流電圧を印加した 5CB のインピーダンス測定：(a)誘電率、(b)電気抵抗率

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Han Wang, Tomoya Miyoshi, Yuji Suzuki
2. 発表標題 Effects of Oscillating Flow on the Anisotropic Permittivity of Nematic Liquid Crystal
3. 学会等名 第71回応用物理学会春期学術講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------