

核四極共鳴と光計測の融合技術による信号計測技術の開発

大田 垣 祐 衣*

Development of Signal Measurement Technology Based on the Fusion of Nuclear Quadrupole Resonance and Optical Measurement Techniques

Yui OTAGAKI*

Nuclear quadrupole resonance (NQR) is a kind of magnetic resonance phenomenon which is caused by the irradiation of a radio-frequency magnetic field against a target substance containing nuclei with the nuclear spin $I \geq 1$. As the resonance frequency and spectrum of each substance are unique, NQR detection is specific. To improve the signal-to-noise ratio of NQR measurements, it is important to observe the electromagnetic field generated from the NQR probe in detail and use that information to optimize the electromagnetic field. In this study, the electromagnetic field generated from the gradiometer coil that is used as the NQR probe for transmission and reception was observed in detail by using an electro-optic (EO) sensor.

1. はじめに

核四極共鳴 (NQR) とは、外部から電磁波を加えたときの原子中のスピンの状態変化による信号を検出する技術である¹⁾。電氣的に偏りのある核スピン1以上の原子核を有する物質に対して、物質固有の共鳴周波数の交流磁場を照射し、共鳴した物質から緩和過程で生じる磁気信号を検出することにより、物質の有無を特定することができる (図1)。対象物により反応する電磁波の周波数が異なるので、特定の物質を非破壊で検査可能となる。他の技術と異なり原子核の情報を観測することができるため特異性が高く、結晶の揺らぎに対し高い感度を持つ。NQRは分子そのものを直接探す技術であり、多くの医薬品や爆薬に核スピン1の¹⁴Nや3/2の³⁵Clが含まれるため、医薬品の品質検査・麻薬等の不正薬物の捜索・爆薬の検知など、様々な分野での利用が期待される。さらに、医薬品の有効成分量の検査や経年による変質等の分析にも応用が試みられている。

本研究では、高精度かつ定量的なNQR信号計測のために、光電界 (EO) センサを用いてNQR計測の励起電磁場の詳細な解析を行った。NQR計測において低いSNRが課題となっており、試料と交差する領域の励起電磁場の最適化によって、試料から得られる信号強度を高めることは有効であると考えられる。これまで、フォトニクス技術を用いた、NQR信号計測時の励起電磁場やNQR信号の電磁場分布の詳細な解析は行われていない。本研究ではNQRとフォトニクスの融合技術の開発を目的としている。

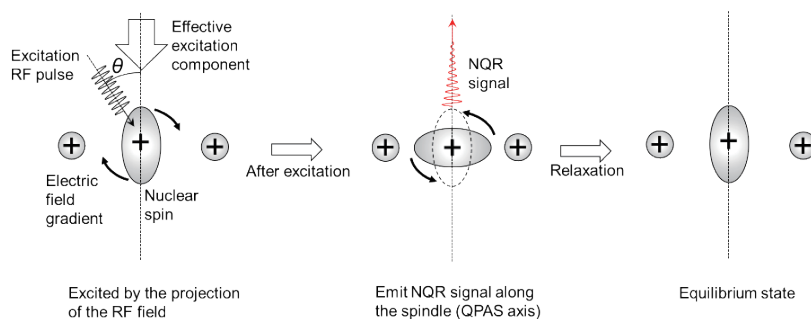


図1 核スピンの励起とNQR信号発生原理.

2. 実験方法

本研究では、NQRプローブからの励起電磁場を、擾乱の少ないEOセンサで精密に解析することで、効率よく核スピンを励起する可能性を見出す。

2023年3月6日 受理

* 豊田理研スカラー

三重大学大学院工学研究科電気電子工学専攻

EOセンサとは、電気光学効果を示す結晶に電界を印加することで結晶中に伝搬させている光が変調を受け、変調された光の偏光状態を観察することで、印加された電界を計測する装置である。LiNbO₃などの電気光学効果を示す結晶に強い電界を加えた際、結晶の光学的性質が変化する現象を電気光学効果と言い、ポッケルス効果、カー効果などが知られている。中心対称性を持たない結晶は印加電界の強度に比例した屈折率変化を示し、これをポッケルス効果という²⁾。ポッケルス効果により屈折率が変化すると、結晶中を伝搬する光波の位相速度も屈折率変化量に応じて変化するため、出力光は位相変調を受ける。

本研究で使用したEOセンサのセンサヘッドは、LiNbO₃基板上にマッハツェンダ型干渉計を形成した構造となっており、センサヘッドに含まれる金属は結晶上の微小な電極のみである。したがって、周囲の金属との干渉を抑えることができ、従来の金属コイルのセンサに比べ擾乱の小さいより精密な励起電磁場の空間解析を行うことができる。

計測対象のNQRプローブとして、グラジオメータ型コイルを使用した。NQRプローブから被測定物までの正確な距離が未知の場合のNQR計測では、一般的に送受信で共通の平面型コイルがプローブとして使用される。その中でも平面型のグラジオメータ型コイルは、2つの同型のコイルを、一様な高周波電磁界に対して逆相の誘導起電力が発生するように接続した構造である。遠方からのRF干渉をキャンセルするよう設計されており、装置から数cmから数十cm離れた対象物質を検知することを想定したNQR計測に利用されている^{3,4)}。

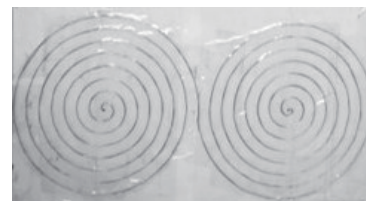


図2 グラジオメータ型コイル。

本実験では、EOセンサとベクトルネットワークアナライザ (VNA) を用いて、グラジオメータ型コイルの電界計測を行った。VNAのポート1から出力された信号をグラジオメータ型コイルから放射させ、EOセンサでコイル上を走査し、印加電界で変調された光信号をフォトダイオードによって電気信号に再変換し、VNAのポート2で周波数・信号強度・位相を計測した。

3. 実験結果および考察

グラジオメータ型コイルから放射される電界をxz面 ($y=0$) について計測した結果を図3に示す。図3から、 $y=0$ 面における電界のx成分は2つのコイルの間で強め合うように分布しており、z成分は2つのコイルのそれぞれの中心から放射状に電界が分布していることが分かる。グラジオメータ型コイルは、左右のコイルから逆相の電磁界が発生するよう設計されており、磁気四重極子的な電磁界が発生している。以上のことから、NQRの共鳴周波数において、所期の通りのグラジオメータ型コイルの電界分布を確認し、EOセンサによる計測が有効であることが分かった。

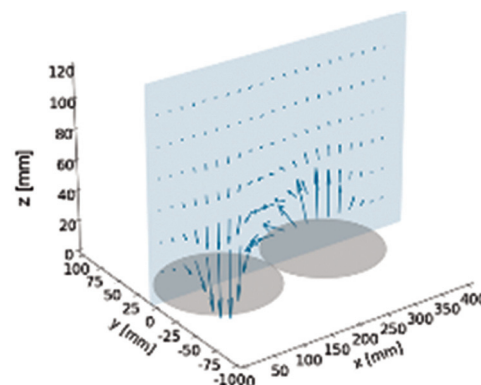


図3 グラジオメータ型コイルの電界分布。

4. むすび

EOセンサを用いてNQR信号計測用プローブの電磁界計測を行った。今後、電磁界シミュレーションと、試作したコイルのEOセンサによる電磁場解析を利用して、NQRプローブとして使用するコイルの構造検討を進めていく。

REFERENCES

- 1) A. N. Garroway, M. Buess, J. Miller, B. Suits, A. Hibbs, G. Barrall, R. Matthews and L. Burnett, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **39** (2001) 1108-1118.
- 2) A. Yariv, "Quantum Electronics," Third Edition, John Wiley & Sons, 1989.
- 3) G. V. Mozzhukhin, A. V. Efremov, A. V. Bodnya and V. V. Fedotov, *Russian Phys. J.*, **48** (2005) 978-983.
- 4) Y. Otagaki, Y. Miyato, J. Barras, H. Sato-Akaba and P. Kosmas, *IEEE Sens. J.*, **21** (2021) 6922-6929.