



بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک
ایران و دوازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری
فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸



مغناطومتر اتمی با تفکیک پذیری فضایی میکروسکوپی

نجمه طریقی تابش^۱، ملیحه رنجبران^۲، محمد حسین خلخالی^۳ و محمد مهدی طهرانچی^{۱*}

۱. تهران، دانشگاه شهید بهشتی، گروه فیزیک

۲. تهران، دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسما

۳. تهران، دانشگاه خوارزمی، گروه فیزیک

n.tarighitabesh@mail.sbu.ac.ir, m_ranjbaran@sbu.ac.ir, m_khalkhali@khu.ac.ir
Teranchi@sbu.ac.ir.

چکیده - مغناطومترهای اتمی در اندازه‌گیری‌های فوق دقیق مانند تصویربرداری‌های میکروسکوپی توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. در این تصویربرداری‌ها، به تفکیک‌پذیری فضایی بالا در کنار حساسیت بالا نیاز هست. در این مقاله روشی برای بهبود تفکیک‌پذیری فضایی یک مغناطومتر اتمی فوق حساس، بر پایه به‌کارگیری متمرکزکننده شار مغناطیسی ارائه شده است. بدین منظور با استفاده از نرم‌افزار آنالیز المان محدود، عملکرد متمرکزکننده-مغناطومتر بر تفکیک‌پذیری و حساسیت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج ما نشان می‌دهد که با استفاده از متمرکزکننده شار مغناطیسی نوک تیز که از ماده مغناطیسی نرم با نفوذپذیری مغناطیسی بالا ساخته شده است، می‌توان تفکیک‌پذیری فضایی را تا ابعاد میکروسکوپی افزایش داد.

کلید واژه - تفکیک‌پذیری فضایی، حساسیت، مغناطومتر اتمی، متمرکزکننده‌های شار مغناطیسی، نفوذپذیری مغناطیسی.

Atomic magnetometer with microscopic spatial resolution

Najmeh Tarighi Tabesh, Maliheh Ranjbaran, Seyed Mohammad Hoesein Khalkhali, Mohammad Mehdi Tehranchi

Abstract- Atomic magnetometers have attracted a lot of attention in high resolution measurements such as microscopic imaging. In these imaging techniques, high spatial resolution and also high sensitivity are required. In this paper, we have proposed a method to increase the spatial resolution of a high sensitivity atomic magnetometer based on utilizing the magnetic flux concentrators which are made of soft magnetic materials with high magnetic permeability. For this purpose, using finite element analysis software, the efficiency of concentrator-magnetometer on the spatial resolution and sensitivity has been investigated. Our results show that utilizing sharp tip magnetic flux concentrator, which is made of soft magnetic material with high permeability, can enhance the spatial resolution to microscopic dimensions.

Keywords: Spatial resolution, Sensitivity, Atomic magnetometer, Magnetic flux concentrator, Magnetic permeability.

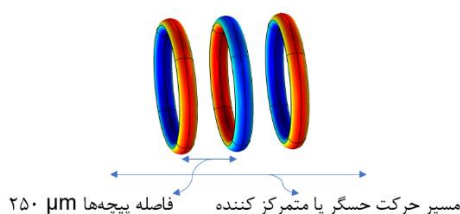
مقدمه

پارامتر نوع ماده، هندسه و نسبت ابعاد متمرکز کننده وابسته است [۵]. هندسه این متمرکز کننده‌ها در انواع میله‌ای و مثلثی [۵ و ۶]، مکعبی [۴] و T شکل [۵] مطالعه شده است. شکل نوک تیز به طور ویژه در متمرکز کننده شار مغناطیسی بر پایه مغناطومتر اتمی برای افزایش تفکیک پذیری فضایی ناشی از میدان مغناطیسی تک نرون مورد استفاده قرار گرفته است [۳].

برای دستیابی به تفکیک پذیری فضایی میکروسکوپی در مغناطومتر اتمی، در این مقاله به کارگیری متمرکز کننده شار مغناطیسی با استفاده از نرم افزار آنالیز المان محدود (کامسول) بررسی شده است. بدین منظور تولید میدان مغناطیسی در ابعاد میکروسکوپی و اندازه گیری آن در دو حالت به کارگیری سلول ۱ cm همراه با متمرکز کننده و بدون آن شبیه سازی شده است.

شبیه سازی

به منظور بررسی تأثیر متمرکز کننده شار مغناطیسی بر تفکیک پذیری فضایی مغناطومتر نیاز به تولید میدان در ابعاد فضایی میکروسکوپی داریم. برای تولید این میدان سه پیچه با یک دور سیم شبیه سازی شده است. این پیچه‌ها دارای جریان $i = 56 \text{ mA}$ می‌باشند و جهت جریان پیچه وسط مخالف دو پیچه دیگر است. قطر پیچه‌ها 0.075 cm ، قطر سیم جریان آن 0.008 cm و فاصله بین پیچه‌ها $250 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است که فاصله جدایی بین پیچه‌ها که در شکل (۱-۱) نمایش داده شده، نشان دهنده میزان تفکیک پذیری فضایی می‌باشد.



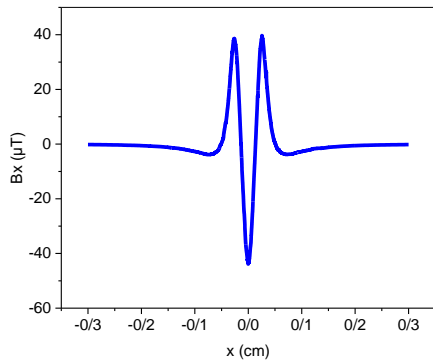
شکل ۱-۱: پیچه‌های مولد میدان مغناطیسی

مغناطومتر اتمی امروزه در اندازه‌گیری‌های فوق ظریف میدان مغناطیسی مورد توجه دانشمندان بسیاری قرار گرفته است. این مغناطومتر با توجه به قابلیت استفاده در دمای اتاق جایگزین خوبی برای مغناطومتر تداخل کوانتومی ابررسانا در اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی زیستی به شمار می‌آید. در این اندازه‌گیری‌ها، با توجه به کاربرد، دو متغیر حساسیت و تفکیک پذیری از اهمیت خاصی برخوردار هستند. این دو کمیت را می‌توان رقیب یکدیگر دانست. حساسیت در کاربردهای مهمی از جمله نقشه برداری مغناطیسی قلب و مغز و اندازه‌گیری تغییرات میدان مغناطیسی زمین از اولویت برخوردار است اما در کاربردهایی چون ردیابی نانوذرات و آشکارسازی تک نرون‌ها تفکیک پذیری در کنار حساسیت جایگاه ویژه‌ای می‌یابد [۱].

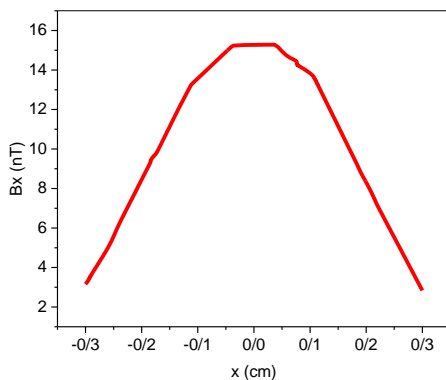
اساس کار مغناطومتر اتمی اندازه‌گیری فرکانس حرکت تقدیمی اتم‌های قطبیده اسپینی در یک سلول حاوی بخار فلز قلیایی می‌باشد [۲]. در این مغناطومترها با کوچک شدن ابعاد سلول، طول عمر اسپین اتم‌های قلیایی به علت برخورد با دیواره کوتاه شده و موجب از بین رفتن حساسیت آن خواهد شد. به عنوان مثال مغناطومتر اتمی با ابعاد سانتی‌متر دارای حساسیت زیر $1 \frac{fT}{\sqrt{Hz}}$ است، اما این ابعاد برای تفکیک پذیری فضایی میکروسکوپی مفید نخواهد بود [۳]. به علت مشکلاتی که کوچک سازی مغناطومتر اتمی به همراه دارد، می‌توان ابعاد سلول را ثابت نگه داشته و مغناطومتر را همراه با متمرکز کننده شار مغناطیسی استفاده نمود.

متمرکز کننده‌های شار مغناطیسی که از مواد مغناطیسی نرم با نفوذ پذیری مغناطیسی بالا ساخته می‌شوند، میدان مغناطیسی ضعیف را جمع‌آوری کرده و در یک منطقه محدود که حسگر مغناطیسی قرار دارد متمرکز می‌کنند. این تمرکز به تقویت میدان مغناطیسی انجامیده و به سه

بیشینه‌ها $250 \mu\text{m}$ (متناسب با فاصله پیچه‌ها از یکدیگر) می‌باشد. در صورتیکه این کمینه و بیشینه‌ها در شکل ۱-۳ ب که فاصله اندازه‌گیری افزایش یافته، مشاهده نمی‌شود.

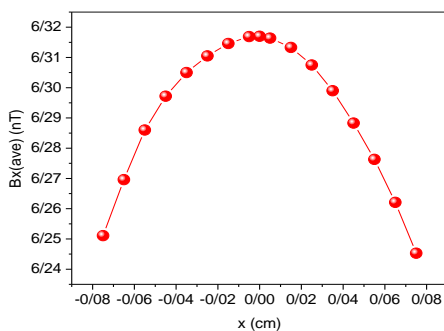


شکل ۱-۳ الف: توزیع میدان مغناطیسی در راستای x ، 0.1 cm زیر پیچه‌ها



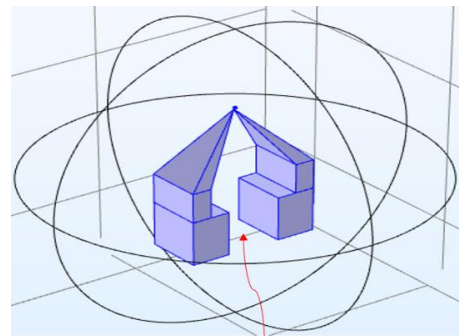
شکل ۱-۳ ب: توزیع میدان مغناطیسی در راستای x ، 0.5 cm زیر پیچه‌ها

حال به مقایسه نتایج اندازه‌گیری میدان مغناطیسی به همراه و بدون متمرکز کننده می‌پردازیم. میانگین مؤلفه x میدان مغناطیسی در برش‌های خطی 1 cm در 0.5 cm زیر پیچه‌ها در شکل (۱-۴) آورده شده است.



شکل ۱-۴: میانگین مؤلفه x میدان مغناطیسی در برش‌های خطی

سپس متمرکزکننده شار مغناطیسی مطابق با شکل (۲-۱)، با استفاده از ماده مغناطیسی نرم (فریت) با نفوذپذیری مغناطیسی $\mu_r = 10^4$ شبیه‌سازی شده است. در این شکل نوک متمرکز کننده دارای شکاف $50 \mu\text{m}$ و جایگاه مغناطومتر اتمی با شکاف $1/4 \text{ cm}$ مشخص شده است. این جایگاه متناسب با ابعاد سلول فلز قلیایی، که 1 cm در نظر گرفته شده، تعیین شده است.



جایگاه مغناطومتر اتمی ($1/4 \text{ cm}$)

شکل ۲-۱: متمرکزکننده شار مغناطیسی

نوک متمرکزکننده شار مغناطیسی در 0.1 cm زیر پیچه‌ها قرار داده می‌شود. سپس متمرکزکننده شار مغناطیسی در این مکان حرکت کرده و در هر مکان میانگین میدان مغناطیسی در برش خطی 1 cm (جایگاه مغناطومتر) اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به اینکه سلول فلز قلیایی میانگین میدان مغناطیسی در ابعاد سلول را بدست می‌دهد، مؤلفه x میدان مغناطیسی در برش‌های خطی میانگین‌گیری شده است. در حالت بدون استفاده از متمرکز کننده، با توجه به ابعاد سلول (1 cm)، نزدیکترین فاصله‌ای که می‌توان تا هدف مغناطیسی در نظر گرفت 0.5 cm است.

نتایج

به منظور بررسی تفکیک‌پذیری در صورت استفاده از سلول 1 cm به همراه و بدون متمرکز کننده، توزیع میدان مغناطیسی پیچه‌ها در 0.1 cm و 0.5 cm زیر پیچه‌ها در شکل‌های ۱-۳ الف و ب بدست آمده است. در شکل ۱-۳ الف ملاحظه می‌شود که فاصله بین کمینه مرکزی تا

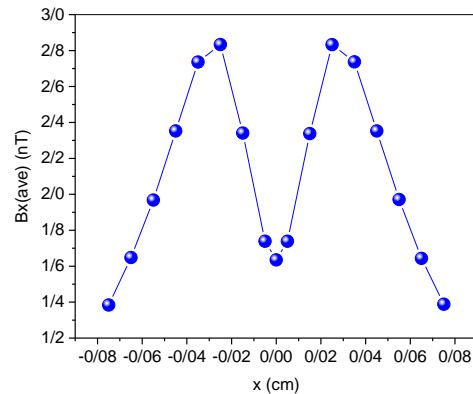
نتیجه گیری

تفکیک پذیری فضایی مغناطومترهای اتمی، که از حساس ترین حسگرهای مغناطیسی به شمار می آیند، در بسیاری از کاربردهای میکروسکوپی مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از روش های بهبود تفکیک پذیری، به کارگیری متمرکز کننده شار مغناطیسی است. در این مقاله با استفاده از نرم افزار آنالیز المان محدود (کامسول)، عملکرد متمرکز کننده-مغناطومتر بر حساسیت و تفکیک پذیری بررسی شده است. نتایج ما نشان داد که متمرکز کننده نوک تیز که از مواد مغناطیسی نرم ساخته می شود، می تواند به هدف مغناطیسی مورد نظر خیلی نزدیک شده و در نتیجه امکان دستیابی به تفکیک پذیری فضایی تا حدود $250 \mu\text{m}$ را فراهم آورد. اما با توجه به رقابت بین حساسیت و تفکیک پذیری فضایی، حساسیت مقداری کاهش پیدا کرده است.

مراجع

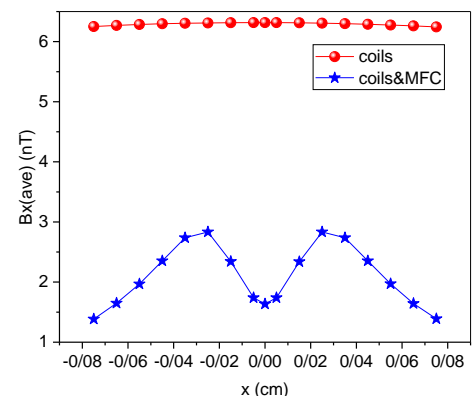
- [1] Y.J. Kim, and I. Savukov, Ultra-sensitive magnetic microscopy with an optically pumped magnetometer. Scientific reports, 6 (2016) 24773.
- [2] M. Ranjbaran, M.M.Tehranchi, S.M. Hamidi, and S.M.H. Khalkhali, Harmonic detection of magnetic resonance for sensitivity improvement of optical atomic magnetometers. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 424 (2017) 284-290.
- [3] S. Brugger, and O. Paul, Magnetic field amplification by slender cuboid-shaped magnetic concentrators with a single gap. Sensors and Actuators A: Physical, 157(1) (2010) 135-139.
- [4] X. Sun, L. Jiang and P.W. Pong, Magnetic flux concentration at micrometer scale. Microelectronic Engineering, 111 (2013) 77-81.
- [5] W. Griffith, Clark, R. Jimenez-Martinez, V. Shah, S. Knappe, J. Kitching, Miniature atomic magnetometer integrated with flux concentrators, Applied Physics Letters, 94 (2009) 023502.

با قرار دادن نوک متمرکز کننده در 0.1 cm زیر پیچه ها و محاسبه میانگین مؤلفه x میدان مغناطیسی در محل مغناطومتر شکل ۵-۱ بدست آمده است.



نمودار ۵-۱: میدان مغناطیسی محاسبه شده در راستای x با استفاده از متمرکز کننده شار مغناطیسی

در شکل ۵-۱ ملاحظه می شود که متمرکز کننده تغییرات میدان مغناطیسی در ابعاد میکروسکوپی را همانند توزیع میدان مغناطیسی (شکل ۳-۱ الف) به خوبی دنبال کرده است. با مقایسه نتایج با و بدون متمرکز کننده که در شکل (۱-۶) نشان داده شده، نتیجه می گیریم که با استفاده از متمرکز کننده شار مغناطیسی نوک تیز، می توان به هدف مغناطیسی مورد نظر نزدیک شده، شار مغناطیسی در ابعاد میکروسکوپی را جمع آوری نموده و در نتیجه تفکیک پذیری فضایی را بهبود بخشید.



نمودار ۶-۱: مقایسه اثر متمرکز کننده شار مغناطیسی بر تفکیک پذیری