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 تفکیک‌پذیری فضایی میکروسکوپی

نجمه طریقی تابش[۱]، ملیحه رنجبران[۲]، محمد حسین خلخالی [۲و۳] و محمد مهدی طهرانچی[۱و۲*]

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. بدین‌منظور 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، ، مغناطومتراتمی، متمرکزکننده‌های شارمغناطیسی، 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.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

مقدمه

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 تفکیک‌پذیری از اهمیت خاصی برخوردار هستند. این دو کمیت را می‌توان رقیب یکدیگر دانست. حساسیت در کاربردهای مهمی از جمله نقشه‌برداری مغناطیسی قلب و مغز و اندازه‌گیری تغییرات میدان مغناطیسی زمین از اولویت برخوردار است اما در کاربردهایی چون ردیابی نانوذرات و آشکارسازی تک نورون‌ها تفکیک پذیری در کنار حساسیت جایگاه ویژه‌ای می‌یابد [۱].

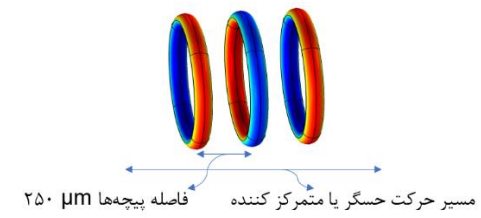
اساس کار مغناطومتر اتمی اندازه‌گیری فرکانس حرکت تقدیمی اتم‌های قطبیده اسپینی در یک سلول حاوی بخار فلز قلیایی می‌باشد [۲]. در این مغناطومترها با کوچک شدن ابعاد سلول، طول عمر اسپین اتم‌های قلیایی به علت برخورد با دیواره کوتاه شده و موجب از بین رفتن حساسیت آن خواهد شد. به عنوان مثال مغناطومتر اتمی با ابعاد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

متمرکزکننده‌های شار مغناطیسی که از مواد مغناطیسی نرم با نفوذپذیری 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 پارامتر نوع ماده، هندسه و نسبت ابعاد متمرکز کننده وابسته است [۵]. هندسه این متمرکز کننده‌ها در انواع میله‌ای و مثلثی [۵و۶]، مکعبی [۴] و T شکل [۵] مطالعه شده است. شکل نوک تیز به طور ویژه در متمرکزکننده شار مغناطیسی بر پایه مغناطومتر اتمی برای افزایش تفکیک‌پذیری فضایی ناشی از میدان مغناطیسی تک نورون مورد استفاده قرار گرفته است [۳].

برای دستیابی به تفکیک‌پذیری فضایی میکروسکوپی در مغناطومتر اتمی، در این مقاله به کارگیری متمرکزکننده شار مغناطیسی با استفاده از نرم‌افزار آنالیز المان محدود (کامسول) بررسی شده است. بدین منظور تولید میدان مغناطیسی در ابعاد میکروسکوپی و اندازه‌گیری آن در دو حالت به‌کارگیری سلول cm ۱ همراه با متمرکز کننده و بدون آن شبیه‌سازی شده است.

شبیه سازی

به منظور بررسی تأثیر متمرکزکننده شار مغناطیسی بر تفکیک‌پذیری فضایی مغناطومتر نیاز به تولید میدان در ابعاد فضایی میکروسکوپی داریم. برای تولید این میدان سه پیچه با یک دور سیم شبیه‌سازی شده است. این پیچه‌ها دارای جریان i = ۵۶ mA می‌باشند و جهت جریان پیچه وسط مخالف دو پیچه دیگر است. قطر پیچه‌ها cm ۰/۰۷۵، قطر سیم جریان آن cm ۰/۰۰۸ و فاصله بین پیچه‌ها ۲۵۰ µm در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است که فاصله جدایی بین پیچه‌ها که در شکل (۱-۱) نمایش داده شده، نشان‌دهنده میزان تفکیک‌پذیری فضایی می‌باشد.

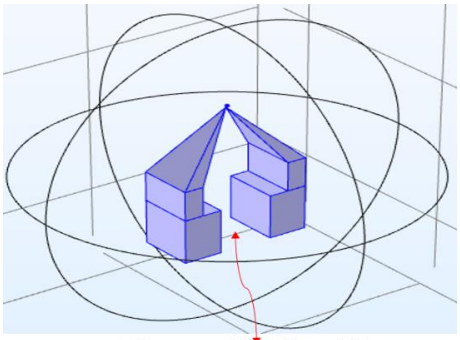


شکل۱-۱: پیچه‌های مولد میدان مغناطیسی

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

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 ۵۰m μ و جایگاه مغناطومتر اتمی با شکاف ۱/۴ cm مشخص شده است. این جایگاه متناسب با ابعاد سلول فلز قلیایی، که ۱ cm در نظر گرفته شده، تعیین شده است.

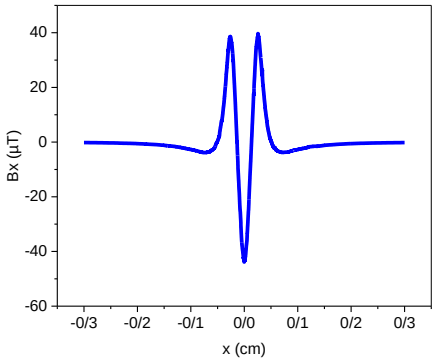


شکل۱-۲: متمرکزکننده شار مغناطیسی

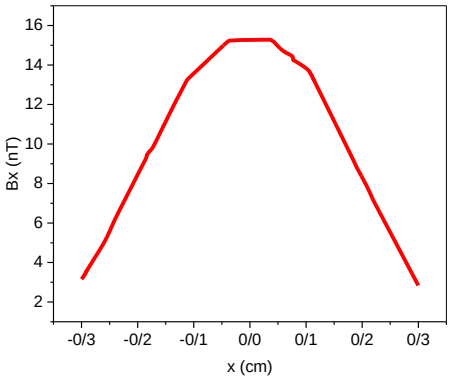
نوک متمرکزکننده شار مغناطیسی در ۰/۰۱ cm زیر پیچه‌ها قرار داده می‌شود. سپس متمرکزکننده شار مغناطیسی در این مکان حرکت کرده و در هر مکان میانگین میدان مغناطیسی در برش خطی ۱ cm (جایگاه مغناطومتر) اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به اینکه سلول فلز قلیایی میانگین میدان مغناطیسی در ابعاد سلول را بدست می‌دهد، مؤلفه x میدان مغناطیسی در برش‌های خطی میانگین‌گیری شده است. در حالت بدون استفاده از متمرکز کننده، با توجه به ابعاد سلول (۱ cm)، نزدیکترین فاصله‌ای که می‌توان تا هدف مغناطیسی در نظر گرفت ۰/۵ cm است.

نتایج

به منظور بررسی تفکیک‌پذیری در صورت استفاده از سلول ۱ cm به همراه و بدون متمرکز کننده، توزیع میدان مغناطیسی پیچه‌ها در ۰/۰۱ cm و ۰/۵ 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 بیشینه‌ها ۲۵۰μm (متناسب با فاصله پیچه‌ها از یکدیگر) می‌باشد. در صورتیکه این کمینه و بیشینه‌ها در شکل ۱-۳ب که فاصله اندازه‌گیری افزایش یافته، مشاهده نمی‌شود.

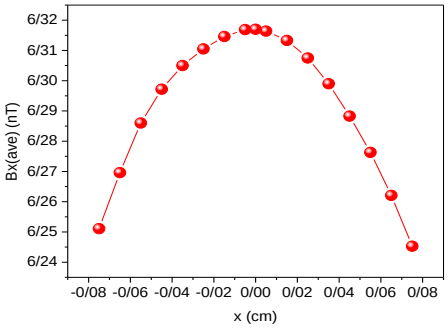


شکل۱-۳ الف : توزیع میدان مغناطیسی در راستای x،۰/۰۱ cm زیر پیچه‌ها



شکل۱-۳ ب : توزیع میدان مغناطیسی درراستای x، ۰/۵ 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 ۱ cm در ۰/۵ cm زیر پیچه‌ها در شکل (۱-۴) آورده شده است.

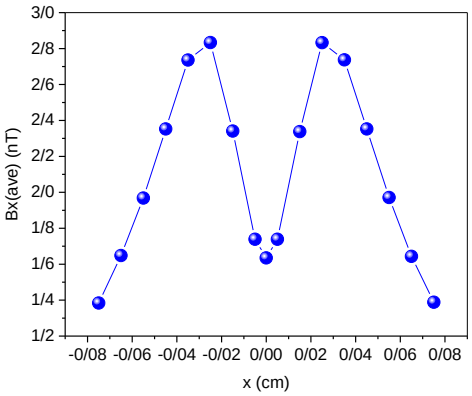


شکل۱-۴: میانگین مؤلفه x میدان مغناطیسی در برش‌های خطی

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

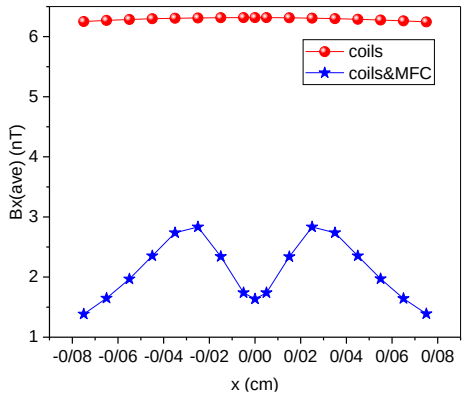
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

با قرار دادن نوک متمرکزکننده در ۰/۰۱ cm زیر پیچه‌ها و محاسبه میانگین مؤلفه x میدان مغناطیسی در محل مغناطومتر شکل ۱-۵ بدست آمده است.



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

در شکل۱-۵ ملاحظه می‌شود که متمرکز کننده تغییرات میدان مغناطیسی در ابعاد میکروسکوپی را همانند توزیع میدان مغناطیسی (شکل۱-۳ الف) به خوبی دنبال کرده است. با مقایسه نتایج با و بدون متمرکز کننده که در شکل (۶-۱) نشان داده شده، نتیجه می‌گیریم که با استفاده از متمرکزکننده شار مغناطیسی نوک تیز، می‌توان به هدف مغناطیسی مورد نظر نزدیک شده، شار مغناطیسی در ابعاد میکروسکوپی را جمع‌آوری نموده و در نتیجه تفکیک‌پذیری فضایی را بهبود بخشید.



نمودار ۱-۶: مقایسه اثر متمرکزکننده شار مغناطیسی بر تفکیک‌پذیری

نتیجه‌گیری

تفکیک‌پذیری فضایی مغناطومترهای اتمی، که از حساس‌ترین حسگرهای مغناطیسی به شمار می‌آیند، در بسیاری از کاربردهای میکروسکوپی مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از روش‌های بهبود تفکیک‌پذیری، به کارگیری متمرکز کننده شار مغناطیسی است. در این مقاله با استفاده ازنرم‌افزار آنالیز المان محدود (کامسول)، عملکرد متمرکزکننده-مغناطومتر بر حساسیت و تفکیک‌پذیری بررسی شده است. نتایج ما نشان داد که متمرکزکننده نوک تیز که از مواد مغناطیسی نرم ساخته می‌شود، می‌تواند به هدف مغناطیسی مورد نظر خیلی نزدیک شده و در نتیجه امکان دستیابی به تفکیک‌پذیری فضایی تا حدود ۲۵۰ µm را فراهم آورد. اما با توجه به رقابت بین حساسیت و تفکیک‌پذیری 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. Kitchinget, Miniature atomic magnetometer integrated with flux concentrators, Applied Physics Letters, 94 (2009) 023502.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]