



تولید میدان کاوشگر مغناطیسی با استفاده از سنسور کوانتومی و مواد فرومغناطیسی برای تشخیص غدد لنفاوی

محمد رضا محمدیان آسیابر^۱

^۱ کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، mohammadrezamohammadiyan28@yahoo.com

چکیده

در این مقاله پروب مغناطیسی را با یک سنسور کوانتومی الماس و کوپل‌های الکترومغناطیسی برای تشخیص غدد لنفاوی شاهد (SLN) ها) به عنوان کاربرد پزشکی سنجش کوانتومی الماس توسعه داده شده است. کاوشگر نانوذرات مغناطیسی (MNP) ها) انباشته شده در SLN ها را مغناطیسی می کند و میدان های مغناطیسی MNP های مغناطیسی را تشخیص می دهد. ما یک هسته فرومغناطیسی طراحی کردیم که یک شکل منحصر به فرد دارد و سیستم تولید میدان مغناطیسی را برای بهبود عملکرد تشخیص، مانند حساسیت مغناطیسی و فاصله قابل تشخیص، بهینه سازی کرد. هسته مغناطیسی پیشنهادی، قدرت میدان مغناطیسی برانگیختگی را در فاصله طولانی تر افزایش می دهد و قدرت میدان بایاس را در محل سنسور کوانتومی الماس سرکوب می کند. افزایش میدان تحریک تقریباً ۳۷۰٪ و کاهش میدان بایاس تقریباً ۴۵٪ است. علاوه بر هسته مغناطیسی پیشنهادی، حتی با اعمال نیروی یک سیم پیچ حذف، قدرت میدان تحریک در مقایسه با ساختار تنها سیم پیچ ده برابر است، که نشان می دهد مغناطیس سازی بیشتر MNP ها، میدان مغناطیسی بزرگی را برای مسافت قابل تشخیص طولانی تر تولید می کند.

واژه های کلیدی: حسگر کوانتومی الماس، هسته مغناطیسی، کاوشگر مغناطیسی، مواد فرومغناطیسی.

۱. مقدمه

این بررسی بیوپسی غده لنفاوی (SLNB) برای بررسی متاستاز (دگرپدیزی) سرطان سینه است. سرطان پستان معمولی قبل از انتشار در بدن به غدد لنفاوی نگهبان (SLN) متاستاز می دهد [۱]. بنابراین، ما می توانیم احتمال متاستاز سرطان سینه را با استخراج SLN ها و بررسی سرطان ارزیابی کنیم [۲]. اگر امکان متاستاز وجود نداشته باشد، می توان از تشریح غدد لنفاوی زیر بغل (ALND) صرف نظر کرد، و بیماران می توانند از خطر عوارض جانبی جدی مانند اختلالات حرکتی، لنف ادم و تورم ناشی از ALND اجتناب کنند [۳]. این کار کیفیت زندگی بیماران را بهبود می بخشد. در حال حاضر، تعدادی از مطالعات و آزمایش های بالینی SLNB در حال انجام است. چندین روش برای تشخیص SLN ها وجود دارد. روش های استاندارد طلایی در این دهه، روش رنگی و رادیوایزوتوپ (RI) است. این روش ها از رنگ آبی (ایزوسولفان یا متیلن بلو) و رادیوایزوتوپ (تکنسیوم) به عنوان ردیاب استفاده می کنند. این ردیاب ها در نزدیکی تومور سرطانی تزریق می شوند و از طریق غدد لنفاوی در SLN ها تجمع می یابند. پس از آن، SLN ها با تشخیص ردیاب تجمع یافته، با بازرسی بصری پس از برش (رنگ) یا تشخیص تابش توسط پروب گاما شناسایی می شوند. روش RI یا روش ترکیبی دو ردیاب به عنوان تکنیک استاندارد برای تشخیص SLN ها در نظر گرفته می شود. در تحقیق قبلی [۴، ۵]، از نانوذرات مغناطیسی (MNP) به عنوان یک ردیاب جایگزین جدید استفاده کرده ایم. MNP ها با استفاده از چندین تکنیک مانند (MRI تصویربرداری رزونانس مغناطیسی)، (MPI تصویربرداری ذره مغناطیسی) و یک پروب مغناطیسی دستی [۴] در کاربردهای پزشکی شناسایی می شوند. در مقایسه با روش RI، روش MNP نیازی به تاسیسات هسته ای ندارد و هیچ گونه نوردهی تابشی ندارد. علاوه بر این، اندازه گیری کمی قدرت میدان مغناطیسی امکان پذیر است و یک پروب مغناطیسی برای نمونه برداری حین عمل مناسب است. برخی محققان پروب مغناطیسی را توسعه دادند و امکان پذیری و دقت تشخیص آن را با روش RI اثبات کردند [۴ - ۹]. مساله باقی مانده مورد انتظار برای کاوشگرهای مغناطیسی، تشخیص SLN های واقع در سمت عمیق تر بدن است. یک محقق گزارش داد که SLN ها در عمق ۱۵ - ۸۵ میلی متر از سطح بدن قرار گرفته اند [۱۰]. برای تشخیص با حداقل تهاجم، مطلوب است که قادر به تشخیص این SLN ها از خارج از بدن باشیم. بنابراین، لازم است که فاصله تشخیص پروب ها افزایش یابد. استفاده از یک سنسور مغناطیسی بسیار حساس راهی موثر برای افزایش حساسیت است. یک سنسور کوانتومی الماسی بر روی آن مورد مطالعه قرار گرفته است و انتظار می رود که تشخیص میدان های مغناطیسی فوق العاده کوچک، به طور بالقوه مرتبه فمتو-تسلا [۱۱] را محقق کند. این سنسور در دمای اتاق کار می کند و به حساسیت بالایی که به یک مغناطیس سنج پمپ شده نوری (OPM) [۱۲] و دستگاه تداخل کوانتومی ابررسانایی (SQUID) با نیتروژن مایع نزدیک می شود، دست می یابد [۱۳، ۱۴]. ما کاوشگر مغناطیسی جدید را با سنسور کوانتومی الماسی برای SLNB توسعه داده ایم. کاوشگر ده ها حساسیت نانو تسلا را نشان داد و فاصله تشخیص چند میلی متر برای ۴۰ گرم [15] MNP بود. برای بهبود فاصله آشکارسازی، در این مقاله، ما سیستم تولید میدان مغناطیسی پروب مغناطیسی را با کوئل الکترومغناطیسی و مواد فرومغناطیسی بهینه کرده ایم. MNP های مغناطیسی شده میدان های مغناطیسی بزرگتری تولید می کند که منجر به افزایش فاصله تشخیص می شود.

۲. حسگر مغناطیسی کوانتومی الماس و پروب مغناطیسی

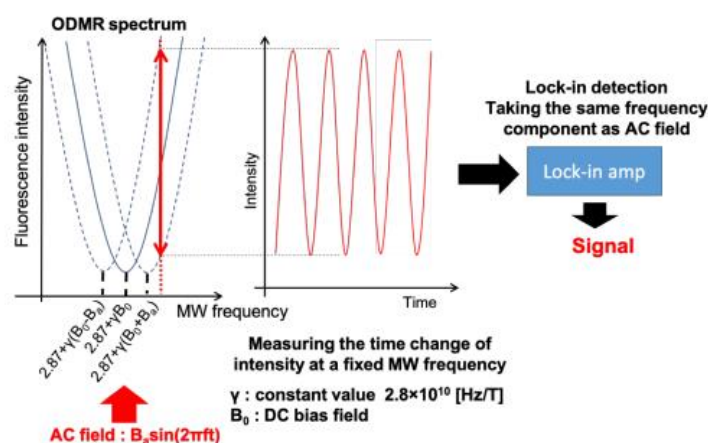
۱.۲. اصل سنجش کوانتومی الماس

حسگر کوانتومی الماس دارای اتم های نیتروژن و جاهای خالی در شبکه الماس به عنوان ناخالصی است. ساختار جفت نیتروژن و جای خالی یک مرکز NV را تشکیل می دهد، و هنگامی که در معرض نور سبز لیزر و تابش مایکروویو قرار می گیرد، فلورسانس قرمز تولید می کند [۱۱، ۱۶ - ۲۰]. مرکز NV با بار منفی به عنوان یک سنسور بسیار حساس برای تشخیص میدان مغناطیسی عمل می کند. مرکز NV سه حالت روی زمین دارد؛ $ms = 0$ و $ms = \pm 1$. هنگامی که مرکز NV در معرض یک موج مایکروویو قرار می گیرد که انرژی آن برابر با اختلاف بین $ms = 0$ و $ms = 1$ است، شدت فلورسانس قرمز به دلیل رزونانس اسپین الکترون کاهش می یابد. در نتیجه، یک نمودار که رابطه بین شدت فلورسانس قرمز و فرکانس تابش

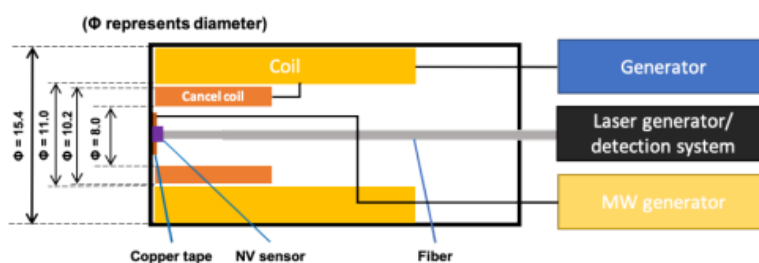
مایکروویو را ترسیم می‌کند، نشان می‌دهد که در آن شدت افت می‌کند. این نمودار یک طیف رزونانس مغناطیسی با تشخیص نوری (ODMR) را فراهم می‌کند. اختلاف انرژی بین $0 \sim 1$ ms با قدرت میدان مغناطیسی خارجی در امتداد محور NV تغییر می‌کند. بنابراین، فرکانس‌های مایکروویو که تغییرات را نشان می‌دهند بر این اساس تغییر می‌کنند، و فرکانس‌ها توسط $(D + \gamma B)$ گیگاهرتز داده می‌شوند. D پارامتر تقسیم میدان صفر محوری است؛ $D = 2.87$ GHz و مقدار ثابتی است که رابطه را نشان می‌دهد. روش تشخیص ما براساس روش ODMR موج پیوسته می‌باشد [۱۰]. در این روش، لیزر برانگیختگی سبز و مایکروویو به طور پیوسته به مراکز NV تابش داده می‌شوند و فرکانس مایکروویو در نقطه شیب تند قفل می‌شود. هنگامی که میدان مغناطیسی خارجی تغییر می‌کند، فلورسانس قرمز در فرکانس مایکروویو قفل‌شده به شدت تغییر می‌کند، ما تغییر شدت فلورسانس قرمز را تشخیص می‌دهیم. ما میدان مغناطیسی جریان متناوب (AC)، فرکانس $f = 10.25$ Hz، را به مراکز NV اعمال کردیم و تکامل زمانی فلورسانس قرمز را اندازه‌گیری کردیم و یک تقویت‌کننده قفل‌شده، اجزای همان فرکانس میدانهای اعمالی را استخراج می‌کند، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲.۲. پروب مغناطیسی با سنسور کوانتومی الماس

شکل ۲ یک پروب مغناطیسی توسعه‌یافته با مراکز الماس NV را نشان می‌دهد. سر پروب از کوپل‌های الکترومغناطیسی، سنسور الماس، آنتن مایکروویو و فیبر نوری تشکیل شده است. مغناطیس ساز کوپل MNP ها را درون بافت زنده قرار می‌دهد، و سنسور الماس میدان‌های مغناطیسی تولید شده توسط MNP های مغناطیسی شده را تشخیص می‌دهد. فلورسانس قرمز تولید شده توسط سیستم تشخیص (یک دیود نوری و تقویت‌کننده ثابت) اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۱- نمودار روش ODMR موج پیوسته. در حین اعمال میدان‌های مغناطیسی لیزر، مایکروویو و AC، شدت فلورسانس قرمز توسط یک تقویت‌کننده قفل در یک دیود نوری تشخیص داده شده است.



شکل ۲- طرح کلی یک پروب مغناطیسی با سنسور کوانتوم الماس. کوپل‌های الکترومغناطیسی برای مغناطیسی کردن نانوذر مغناطیسی، و سنسور کوانتومی الماس، سیگنال میدان مغناطیسی تولید شده توسط نانوذر مغناطیسی را تشخیص می‌دهد. نوار مسی امواج مایکروویو و فیبر متصل به سطح الماس را ساطع می‌کند.

سیستم مایکروویو و ژنراتور جریان، سر پروب را با مایکروویو و جریان الکتریکی تامین می‌کنند. سیستم نوری مبتنی بر فیبر همچنین قسمت سر پروب را با لیزر سبز تامین می‌کند و فلورسانس قرمز را از سنسور الماس دریافت می‌کند. یک سیم‌پیچ تحریک، میدان‌های مغناطیسی را برای MNP های مغناطیسی تولید می‌کند و یک سیم‌پیچ حذف‌کننده، میدان‌های مغناطیسی را برای حذف میدان مغناطیسی در محل مرکز الماس تولید می‌کند. مشخصات یک سیم‌پیچ تحریک (شکل سولنویید) به شرح زیر است. قطر خارجی آن ۱۵.۴ میلی‌متر است. طول سیم‌پیچ ۳ / ۲۹ میلی‌متر، ۸۰۰ دور، ۱۱ و ۲.۷۵ مگاهرتز است. مشخصات یک سیم‌پیچ لغو اتصال (شکل سولنویید) به شرح زیر است. قطر خارجی آن ۱۰.۲ میلی‌متر است. طول سیم‌پیچ ۱۹.۸ میلی‌متر، ۵۸۷ دور، ۱۲ و ۱.۱ مگاهرتز است.

۳. بهینه سازی سیستم تولید میدان مغناطیسی

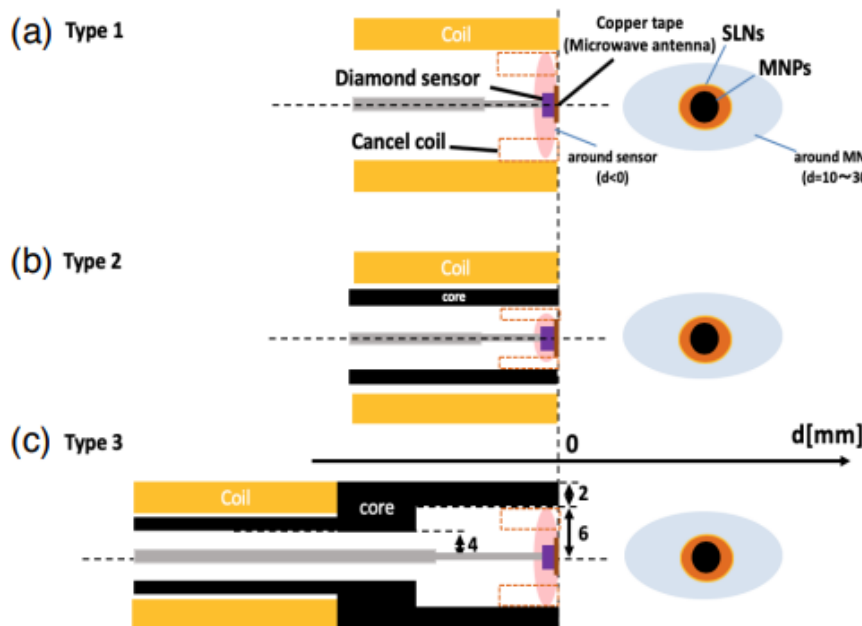
۱.۳. هسته‌های فرومغناطیس برای افزایش گستره‌ی میدان مغناطیسی

برای بهبود عملکرد آشکارسازی، لازم است حساسیت مغناطیسی بالاتر سنسور کوانتومی الماس مشخص شود. در عین حال، ما می‌توانیم سیگنال قابل تشخیص میدان مغناطیسی ناشی از MNP ها را با افزایش قدرت میدان مغناطیسی برای مغناطیسی کردن MNP ها افزایش دهیم. روش‌های متعددی برای افزایش قدرت میدان مغناطیسی تحریک وجود دارد، مانند (۱) بهینه‌سازی شعاع کویل‌ها، (۲) افزایش جریان الکتریکی و (۳) اعمال یک ماده فرومغناطیسی. با این حال، شعاع بزرگتر سیم پیچ برای بدن انسان تهاجمی می‌کند و جریان الکتریکی بزرگتر گرما را برای بدن تولید می‌کند. بنابراین، ما یک هسته مغناطیسی (مواد فرومغناطیسی) را برای افزایش میدان‌های مغناطیسی تحریک اعمال کردیم. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، سنسور، آنتن مایکروویو و فیبر در داخل کویل‌ها واقع شده‌اند. بنابراین، ما از یک هسته لوله‌ای شکل برای حفظ فضایی که آن‌ها در آن واقع شده‌بودند، استفاده کردیم. ما دو الگوی هسته مغناطیسی را همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده طراحی کردیم. در شکل ۳ (a) ساختار معمولی بدون هسته مغناطیسی است؛ شکل ۳ (b) و (c) از یک هسته مغناطیسی تشکیل شده است. نوع ۲ یک هسته لوله شکل ساده است که قطر خارجی، قطر داخلی، ضخامت و طول آن به ترتیب ۱۰ میلی‌متر، ۸ میلی‌متر، ۱ میلی‌متر و ۳۰ میلی‌متر است. این هسته مغناطیسی درون سیم‌پیچ تحریک واقع شده است و قدرت میدان مغناطیسی را افزایش می‌دهد. شکل ۴ شار مغناطیسی محاسبه شده توسط روش المان محدود (COMSOL Multiphysics®) را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که هسته مغناطیسی شار مغناطیسی قوی تری تولید می‌کند شکل ۴ (b) در مقایسه با سیم پیچ الکترومغناطیسی شکل ۴ (a) با این حال، در محل سنسور الماس، سیم پیچ تحریک یک میدان مغناطیسی قوی به سنسور اعمال می‌کند. این میدان مغناطیسی، یعنی میدان بایاس، از تشخیص MNP ها جلوگیری می‌کند. برای حل این مشکل، ما یک شکل پیشرفته از هسته مغناطیسی (نوع ۳) پیشنهاد کردیم. هسته مغناطیسی پیشنهادی ساختاری دارد که در آن چندین هسته مغناطیسی به هم متصل شده‌اند؛ (۱) قطر خارجی، قطر داخلی، ضخامت و طول آن ۱۰، ۸، ۱ و ۳۰ میلی‌متر است؛ (۲) قطر خارجی، قطر داخلی، ضخامت و طول ۱۶ میلی‌متر، ۸ میلی‌متر، ۴ میلی‌متر و ۱۰ میلی‌متر است؛ (۳) قطر خارجی، قطر داخلی، ضخامت و طول ۱۶، ۱۲، ۲ و ۲۰ میلی‌متر است. این ساختار پیشنهادی با افزایش قطر داخلی شکل ۳ (c) و شکل ۴ (c)، سعی در فرونشاندن میدان بایاس در اطراف سنسور الماس دارد.

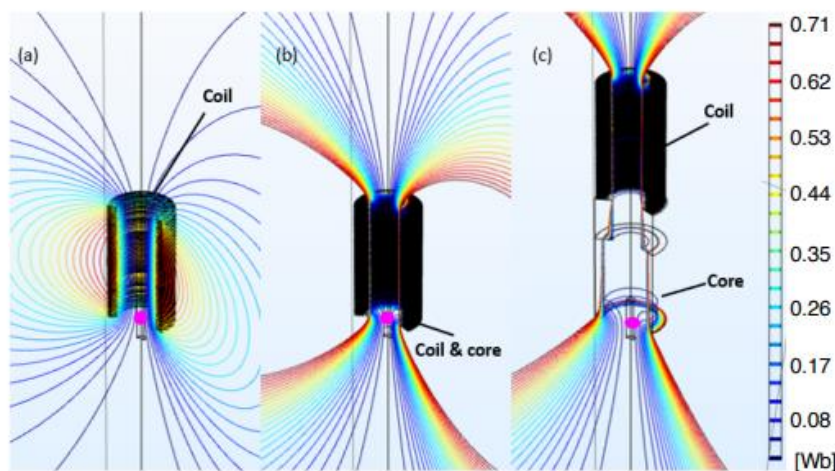
۲.۳. اندازه‌گیری میزان توزیع میدان مغناطیسی

برای ارزیابی اثر هسته‌های مغناطیسی، ما هسته‌های لوله‌ای شکل نوع ۲؛ شکل ۳ (b) ساخته شده از مواد مختلف را ساختیم. مواد عبارتند از فولاد کربنی، پرمالوی، پرمندور و ME1F آهن خالص برش آزاد. شکل ۵ توزیع میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده بر روی محور پروب را نشان می‌دهد. هر چهار ماده مغناطیسی، میدان مغناطیسی را در مقایسه با میدان مغناطیسی بدون هسته مغناطیسی افزایش دادند (نوع ۱). افزایش میدان‌های مغناطیسی تقریباً پنج برابر بزرگ‌تر است. در $D = 20$

میلیمتر (مکان MNP ها)، قدرت میدان مغناطیسی نوع ۲ و نوع ۱ به ترتیب تقریباً $T = 660$ و $T = 130$ است. با مقایسه چهار نوع مختلف مواد مغناطیسی، هسته فولاد کربنی میدان کوچکتری را نسبت به سه نوع دیگر مواد ایجاد کرد. سه ماده باقی مانده، پرمالوی، پرمندور و ME1F، تقریباً همان میدان مغناطیسی بزرگ را تولید کردند. در $D = 0$ میلی متر (محل قرارگیری سنسور الماس)، با این حال، قدرت میدان مغناطیسی نوع ۲ ($6.5 \sim mT$) بزرگتر از نوع ۱ ($3.4 \sim mT$) است که از تشخیص میدان های مغناطیسی جلوگیری می کند. نشات گرفته از MNP ها علاوه بر این، مواد فرومغناطیسی، اعوجاج شکل موج را به دلیل تولید سیگنال های هارمونیک القا می کند. شکل های ۶ (a) و (b) سیگنال هارمونیک دوم و سوم $f_2 = 2050$ و $f_3 = 3075$ هرتز هر ماده از نوع ۲ را نشان می دهند.

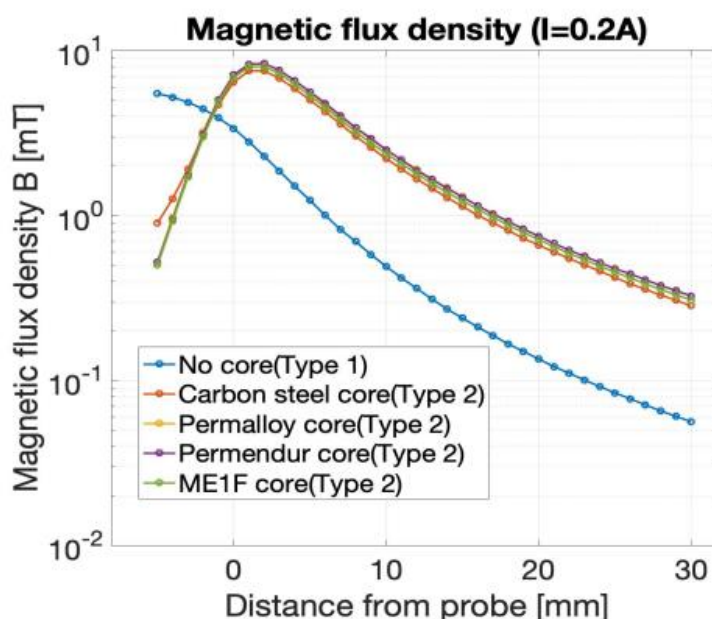


شکل ۳- سه نوع مدل سر پروب. (a) نوع ۱ یک مدل معمولی است (کاوشگر مغناطیسی توسعه یافته قبلی ما [۱۱]). (b) نوع ۲ یک مدل تقویت شده میدان توسط هسته مغناطیسی لوله شکل است. (c) نوع ۳ یک مدل پیشرفته است. هدف از توسعه سیستم تولید، تحقق توزیع میدان مغناطیسی بدون تعصب (میدان ضعیف تر در اطراف حسگر) و افزایش یافته (میدان قوی تر در اطراف نانو ذرات مغناطیسی) برای بهبود حساسیت و فاصله تشخیص است.

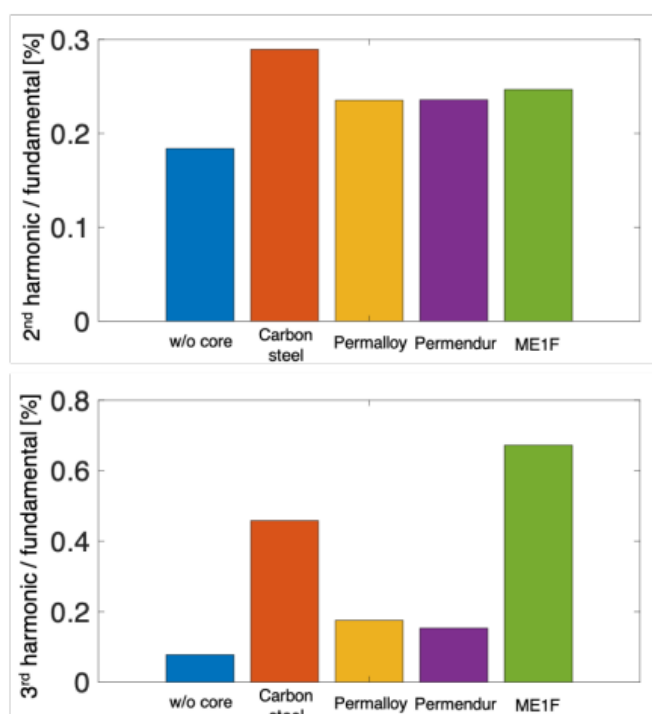


شکل ۴- شار مغناطیسی محاسبه شده با شبیه سازی عددی (روش اجزای محدود). (a) COMCOL Multiphysics® نوع ۱: بدون هسته مغناطیسی (فقط سیم پیچ)، (b) نوع ۲: هسته مغناطیسی لوله ای شکل با یک سیم پیچ، و (c) نوع ۳: هسته مغناطیسی

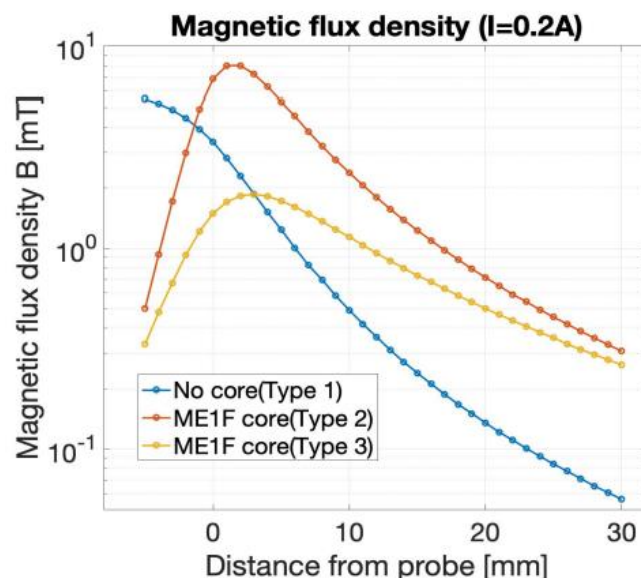
پیشنهادی با یک سیم پیچ. دایره بنفش محل سنسور الماس است. در مقایسه با مدل های نوع ۱، نوع ۲ و نوع ۳ توزیع میدان مغناطیسی افزایش یافته ای برای مغناطیس کردن MNP ها در زیر سیم پیچ ها دارند.



شکل ۵- توزیع میدان مغناطیسی اندازه گیری شده بر روی محور پروب هسته های لوله ای شکل (نوع ۲) و ساختار فقط سیم پیچ (نوع ۱) به عنوان تابعی از فاصله D از پروب.

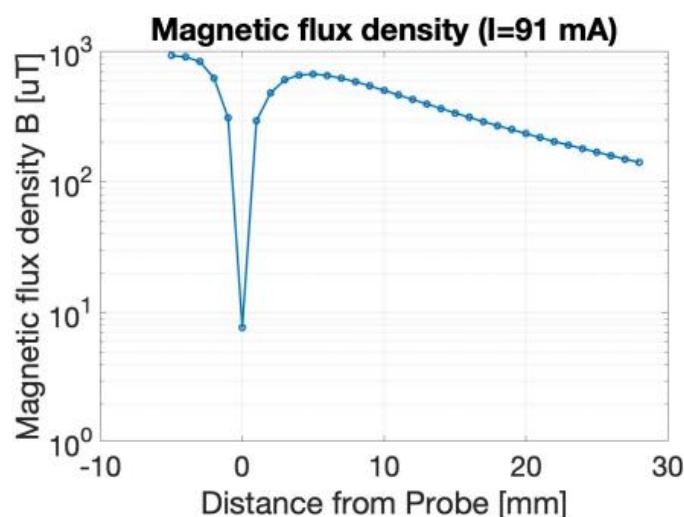


شکل ۶- نسبت مولفه های هارمونیک دوم و سوم (f_2 و f_3) هر سازه (بدون هسته مغناطیسی، فولاد کربنی، پرمالوی، پرمندور و ME1F) ، که توسط مولفه فرکانس اصلی $f_0=1025$ نرمال سازی شده است.



شکل ۷- توزیع میدان مغناطیسی بر روی محور پروب هسته‌های هر نوع با ماده مغناطیسی یک‌سان ME1F

برای سیم‌پیچ تحریک بدون هسته مغناطیسی، دومین شدت سیگنال هارمونیک نرمال شده توسط مولفه فرکانس اصلی $f_0 = 10.25$ تقریباً ۰.۲٪ است. در مورد کاربرد هسته‌های مغناطیسی (فولاد کربنی، پرمالوی، پرمندور و ME1F؛ دومین شدت سیگنال هارمونیک برابر است با ۰.۲-۰.۳٪ که با شدت بدون هسته مغناطیسی سازگار است. از نظر سیگنال هارمونیک سوم، اگرچه شدت در مقایسه با سیگنال بدون هسته مغناطیسی کمی بزرگ‌تر است. شدت سیگنال کم‌تر از ۱٪ مولفه فرکانس پایه است. این نتایج نشان می‌دهند که اعوجاج شکل موج‌های تولید شده توسط هسته‌های مغناطیسی بسیار کوچک است.



شکل ۸- توزیع میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده تولید شده توسط نوع ۲ ME1F و سیم‌پیچ حذف اتصال.

برای ارزیابی شکل مختلف هسته مغناطیسی، ما نوع ۲ و نوع ۳ (شکل پیشنهادی) را با ماده مشابه ME1F به کار می‌بریم، و توزیع میدان مغناطیسی را بر روی محور پروب، همانطور که در شکل نشان داده شده است، اندازه‌گیری کردیم. با مقایسه نوع ۱ و نوع ۳، باعث افزایش قدرت میدان مغناطیسی حول MNP ها (در $D=20$ میلی‌متر) تا حد ۳۷۰٪ و کاهش میدان بایاس حول سنسور الماس (در $D=0$ میلی‌متر) تا حدود ۴۵٪ می‌شود. بایاس پایین (در اطراف سنسور) و شدت بالا (در اطراف

MNP ها) توزیع میدان مغناطیسی توسط ساختار نوع ۳ به دست آمد. برای حذف بیشتر میدان بایاس، سیم پیچ لغو را به هسته مغناطیسی نوع ۳ اعمال کردیم. هر شدت جریان یک تحریک و سیم پیچ حذف برای به حداقل رساندن قدرت میدان مغناطیسی در محل سنسور الماس ($D=0$ میلی متر) تنظیم شد. شکل ۸ توزیع میدان مغناطیسی هسته مغناطیسی نوع ۳ را با سیم پیچ حذف نشان می دهد. میدان با بایاس کم ~ 8 T در اطراف سنسور به دست آمد، و میدان مغناطیسی 230 T در 20 میلی متر جلوتر تولید شد $I=91$ میل آمپر قدرت میدان مغناطیسی پروب مغناطیسی قبلی تقریباً $I=160$ میلی آمپر است [۱۵]. بنابراین، هسته مغناطیسی پیشنهادی، تحت حفظ میدان بایاس پایین، میدان مغناطیسی را به مرتبه بزرگتری افزایش می دهد، که نشان می دهد مغناطش بیشتر MNP ها، میدان مغناطیسی بزرگی را برای فاصله قابل تشخیص طولانی تر تولید می کند. مطالعه قبلی ما نشان داد که حساسیت مغناطیسی پروب مغناطیسی با مراکز NV در حدود 5706 Nt است و فاصله قابل تشخیص نسبت به 5 (140 L میکروگرم آهن) MNP ها تقریباً 5 میلی متر است [۱۵]. در این مطالعه، ما میدان های مغناطیسی تحریک را برای MNP ها تا 370% از طریق کاربرد هسته مغناطیسی افزایش دادیم. ارزیابی عددی براساس مدل ممان دوقطبی مغناطیسی [۱۵] نشان می دهد که فاصله قابل تشخیص تا 9 میلی متر افزایش می یابد، که نشان می دهد فاصله قابل تشخیص از طریق هسته مغناطیسی تقریباً دو برابر پروب مغناطیسی است که قبلاً توسعه دادیم. سپس، برای رسیدن به فاصله قابل تشخیص 20 میلی متر، به یک حساسیت مغناطیسی 800 pT نیاز است. علاوه بر این، همانطور که در مرجع [۱۰]، با توجه به تشخیص 85 MNPs میلی متر از سطح پوست، یک حساسیت مغناطیسی به ترتیب pT و یک میدان مغناطیسی تحریکی چند ده میکرو T در فاصله 85 میلی متری (f از کاوشگر مغناطیسی می تواند مورد نیاز باشد؛ بر اساس واپاشی میدان مغناطیسی دوقطبی با $\sim 1/3$ از نقطه نظر عملی، جابجایی دمایی که بر عملکرد فرومغناطیسی و مراکز NV تاثیر می گذارد، باید مورد بحث قرار گیرد. ضریب نفوذپذیری مغناطیسی هسته مغناطیسی (MEIF؛ نفوذپذیری مغناطیسی نسبی $r=1500$) (که با تغییر دما تغییر می کند، تقریباً 0.1% / K است. به عنوان مثال، تغییر دما 10 کلون منجر به تغییر نفوذپذیری مغناطیسی 1% می شود. تغییرات میدان مغناطیسی بایاس 8 T برابر با 80 nT می باشد. این سیگنال نویز ناشی از رانش دما با حد حساسیت مغناطیسی جریان قابل مقایسه است. بنابراین، ارزیابی نشان می دهد که ما می توانیم انحراف دما را با توجه به هسته فرو مغناطیسی نادیده بگیریم. علاوه بر این، رانش دما در مراکز NV به طور مستقیم بر حالت های کوانتومی مغناطیسی تاثیر می گذارد. برای به حداقل رساندن تخریب سنسور کوانتومی مغناطیسی، چندین (حداقل دو) فرکانس مختلف تابش مایکروویو را می توان برای نظارت بر تفکیک انرژی زمین به کار برد.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله ما سیستم تحریک میدان مغناطیسی را با هسته فرومغناطیس شکل منحصر به فرد توسعه دادیم تا توزیع میدان های مغناطیسی را برای تشخیص MNP ها با استفاده از سنسور الماس بهینه کنیم. این یک روش موثر برای استفاده از هسته مغناطیسی برای افزایش میدان مغناطیسی پروب مغناطیسی است. هسته مغناطیسی نوع ۳ قدرت میدان را در فاصله طولانی تر افزایش می دهد و قدرت میدان را در محل سنسور کوانتومی الماس سرکوب می کند؛ افزایش میدان تحریک تقریباً 370% و کاهش میدان بایاس تقریباً 45% است. علاوه بر هسته مغناطیسی نوع ۳، حتی با اعمال سیم پیچ اکتیواسیون، قدرت میدان تحریک در مقایسه با تنها ساختار سیم پیچ ده برابر است. این توزیع بهینه میدان مغناطیسی منجر به افزایش سیگنال از MNP ها می شود و منجر به تحقق فاصله زیاد، تهاجم کم و دقت زیاد بیوپسی گره لنفاوی شاهد می شود. ما حساسیت مغناطیسی را با یک هسته مغناطیسی منحصر به فرد ارزیابی خواهیم کرد و MNP هایی را که در فاصله طولانی تری قرار می گیرند را شناسایی خواهیم کرد.

۵. منابع و مراجع

- [1] U. Veronesi, F. Rilke, A. Luini, V. Sacchini, V. Galimberti, T. Campa et al., "Distribution of Axillary Node Metastases by Level of Invasion. An analysis of 539 cases," *Cancer*, 59, 682-687, 1987G.
- [2] U. Veronesi, G. Paganelli, G. Viale, V. Galimberti, A. Luini, S. Zurrada et al., "Sentinel Lymph Node Biopsy and Axillary Dissection in Breast Cancer: Results in a Large Series," *Journal of the National Cancer Institute*, Vol. 91, No. 4, 368-373, 1999
- [3] K. K. Swenson, M. J. Nissen, C. Ceronisky, L. Swenson, M. W. Lee, and T. M. Tuttle, "Comparison of Side Effects Between Sentinel Lymph Node and Axillary Lymph Node Dissection for Breast Cancer," *Ann. Surg. Oncol.*, vol.9, No.8, 2002
- [4] M. Sekino, A. Kuwahata, T. Ookubo, M. Shiozawa, K. Ohashi, M. Kaneko et al., "Handheld magnetic probe with permanent magnet and Hall sensor for identifying sentinel lymph nodes in breast cancer patients," *Scientific Reports.*, Vol. 8, No. 1, p.1195, 2018.
- [5] K. Taruno, T. Kurita, A. Kuwahata, K. Yanagihara, K. Enokido, Y. Katayose et al., "Multicenter clinical trial on sentinel lymph node biopsy using superparamagnetic iron oxide nanoparticles and a novel handheld magnetic probe", *J. Surg. Oncol.* 120, 1391-1396, 2019.
- [6] M. Shiozawa, A. T. Lefor, Y. Hozumi, K. Kurihara, N. Sato, Y. Yasuda, and M. Kusakabe, "Sentinel lymph node biopsy in patients with breast cancer using superparamagnetic iron oxide and a magnetometer", *Breast Cancer* 20:223-229, 2013.
- [7] M. Douek, J. Klaase, I. Monypenny, A. Kothari, K. Zechmeister, D. Brown et al., "Sentinel node biopsy using a magnetic tracer versus standard technique: the SentiMAG Multicentre Trial", *Ann. Surg. Oncol.* 21(4): 1237-45 (2014).
- [8] A. Kuwahata, R. Tanaka, S. Matsuda, E. Amada, T. Irino, S. Mayanagi et al., "Development of Magnetic Probe for Sentinel Lymph Node Detection in Laparoscopic Navigation for Gastric Cancer Patients", *Scientific Reports* 10, 1798, 2020.
- [9] S. Waanders, M. Visscher, R. R. Wildeboer, T. O. B. Oderkerk, H.J.G. Krooshoop, and B. ten Haken, "A handheld SPIO-based sentinel lymph node mapping device using differential magnetometry", *Physics in Medicine and Biology* 61, 8120-8134, 2016.
- [10] C. Mathelin, S. Salvador, D. Huss, and J-L. Guyonnet, "Precise Localization of Sentinel Lymph Nodes and Estimation of their Depth Using a Prototype Intraoperative Mini γ -Camera in Patients with Breast Cancer," *J. Nucl. Med.*, 48, 623-629, 2007.
- [11] T. Wolf, P. Neumann, K. Nakamura, H. Sumiya, T. Ohshima, J. Isoya, and J. Wrachtrup, "Subpicotesla Diamond Magnetometry", *Phys. Rev. X*, 5, 041001 (2015).
- [12] S. Colombo, V. Lebedev, A. Tonyushkin, S. Pengue, and A. Weis, "Imaging Magnetic Nanoparticle Distributions by Atomic Magnetometry-based Susceptometry", *IEEE Trans. Medical Imaging* 39(4), 922-933, 2020.
- [13] S. Tanaka, H. Ota, Y. Kondo, Y. Tamaki, S. Kobayashi, and S. Noguchi, "Detection of magnetic nanoparticles in lymph nodes of rat by high Tc SQUID", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 13, 377-380, 2003.
- [14] J. J. Chieh, W. K. Tseng, H. E. Horng, C. Y. Hong, H. C. Yang, and C. C. Wu, "In-vivo and real-time measurement of magnetic-nanoparticles distribution in animals by scanning SQUID biosusceptometry for biomedicine study", *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 58, 2719-2724, 2011.
- [15] A. Kuwahata, T. Kitaizumi, K. Saichi, T. Sato, R. Igarashi, T. Ohshima et al., "Magnetometer with nitrogen-vacancy center in a bulk diamond for detecting magnetic nanoparticles in biomedical applications," *Scientific Reports* 10, 2483, 2020.
- [16] L. Rondin, J-P. Tetienne, T. Hingant, J-F. Roch, P. Maletinsky, and V. Jacques, "Magnetometry with nitrogen-vacancy defects in diamond," *Rep. Prog. Phys.*, 77, 056503, 2014.
- [17] Y. Wu, F. Jelezko, M. B. Plenio, and T. Weil, "Diamond Quantum Devices in Biology," *Angew. Chem. Int. Ed.*, 55, 6586-6598, 2016.
- [18] E. Abe and K. Sasaki, "Tutorial: Magnetic resonance with nitrogenvacancy centers in diamond – microwave engineering, material science, and magnetometry," *J. Appl. Phys.*, 123, 161101, 2018.

- [19] J. F. Barry, J. M. Scholoss, E. Bauch, M. J. Turner, C. A. Hart, L. M. Pham, and R. L. Walsworth, "Sensitivity Optimization for NV-Diamond Magnetometry", *Rev. Mod. Phys.* 92, 015004, 2020.
- [20] R. Schirhagl, K. Chang, M. Loretz, and C. L. Degen, "Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond: Nanoscale Sensors for Physics and Biology," *Annu. Rev. Phys. Chem.* 65, 83 105, 2014.
- [21] J. M. Schloss, J. F. Barry, M. J. Turner, and R. L. Walsworth, "Simultaneous Broadband Vector Magnetometry Using Solid-state Spins", *Phy. Rev. App.* 10, 034044, 2018.

Production of magnetic probe field using quantum sensor and ferromagnetic materials for lymph node detection

Mohammadreza mohammadiyan asiabar¹,

*¹ Master's degree, Islamic Azad University, Karaj Branch,
mohammadrezamohammadiyan28@yahoo.com

Abstract—We have developed a magnetic probe with a diamond quantum sensor and electromagnetic coils for detection of sentinel lymph nodes (SLNs) as a medical application of diamond quantum sensing. The probe magnetizes the magnetic nanoparticles (MNPs) accumulated in the SLNs and detects the magnetic fields of the magnetic MNPs. We designed a ferromagnetic core that has a unique shape and optimized the magnetic field generation system to improve detection performance, such as magnetic sensitivity and detectable distance. The proposed magnetic core increases the excitation magnetic field strength over a longer distance and suppresses the bias field strength at the location of the diamond quantum sensor. The increase of the excitation field is approximately 370% and the decrease of the bias field is approximately 45%. In addition to the proposed magnetic core, even with the application of a removal coil, the excitation field strength is tenfold compared to the single-coil structure, indicating that further magnetization of MNPs produces a large magnetic field for a longer detectable distance.

Keywords: Diamond quantum sensor, magnetic core, magnetic probe, ferromagnetic material