بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

بهینه سازی حساسیت حسگر اتمی دمش اپتیکی با استفاده از معادلات بلاخ

ملیحه رنجبران[۱]، محمد مهدی طهرانچی[۱و۲]، سیده مهری حمیدی[۱] و سید محمد حسین خلخالی[۳]

[۱]پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، ولنجک، تهران
[۲] دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، ولنجک، تهران، ایران
[۳] دانشکده فیزیک، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

چکیده – حسگرهای اتمی دمش اپتیکی یکی از حساسترین حسگرهای مغناطیسی هستند که برای اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی بسیار ضعیف به کار می‌روند. اصول عملکرد این حسگرها بر پایه آشکارسازی پدیده تشدید در یک بخار فلز قلیایی استوار است که توسط دمش اپتیکی در آن قطبش اسپینی تولید شده است. بنابراین عوامل مؤثر بر پهنا و دامنه منحنی تشدید تاثیر چشمگیری بر روی حساسیت اندازه‌گیری این حسگرها دارند. در این مقاله، با بهره‌گیری از منحنی تشدید حاصل از حل معادلات بلاخ، تاثیر شدت لیزر دمش، دامنه میدان نوسانی محرک و دمای سلول حاوی فلز قلیایی روبیدیوم بر روی حساسیت بررسی شده‌اند. نتایج ما نشان می‌دهند که با انتخاب شرایط کارکرد مناسب، می‌توان به بهینه حساسیت حسگر اتمی دست یافت.

کلید واژه- تشدید مغناطیسی، دمش اپتیکی، فلز قلیایی، بهینه سازی حساسیت، معادلات بلاخ.

Sensitivity improvement of optical pumping atomic magnetometers using Bloch equations

Malihe Ranjbaran[1], Mohammad Mehdi Tehranchi[1,2], Seyedeh Mehri Hamidi[1], Seyed Mohammad Hosein Khalkhali[3].
[1] Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
[2] Physics Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
[3] Physics Department, Kharazmi University, Tehran, Iran

Abstract- Optically pumped atomic magnetometers are one the most sensitive sensors introduced for the measurement of the extremely weak magnetic fields. The sensitivity of these magnetometers can be improved by using the optimum operating conditions. In this paper, the influence of laser beam power, cell temperature and rf field strength on the magnetometer sensitivity, using resonance absorption and dispersion of the light beam passing through a rubidium vapor, has been simulated. Our theoretical predictions indicate that a great reduction in the sensitivity can be observed under the best selection of affecting parameters.

Keywords: Magnetic resonance, Optical pumping, Alkali metal, Sensitivity improvement, Bloch equations.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

۱- مقدمه

یکی از مباحث مهم در سال‌های اخیر، اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی بسیار ضعیف است که توجه ویژه‌ای را در علوم مختلف از جمله تست غیرمخرب، بیومغناطیس و ژئوفیزیک به خود معطوف داشته است [۱]. برای اندازه‌گیری چنین میدان مغناطیسی ضعیفی نیاز است که حسگر مغناطیسی از حساسیت بسیار بالایی برخوردار باشد. از جمله حساسترین حسگرهای مغناطیسی، حسگرهای اتمی دمش اپتیکی هستند که حساسیتی مشابه با حسگرهای مغناطیسی تداخل کوانتومی ابررسانا دارند. با توجه به کارکرد حسگرهای اتمی در دمای اتاق، این حسگرها معایب حسگرهای ابررسانا از جمله هزینه ساخت بسیار بالا، نیاز به سردسازهای حجیم و لذا اتاق حفاظت مغناطیسی را ندارند [۱ و ۲].

اصول اندازه‌گیری حسگرهای اتمی، بر پایه اندازه‌گیری بسامد لارمور مربوط به حرکت تقدیمی ($\omega_L = \gamma B$) اسپین اتم‌های یک فلز قلیایی، استوار است. اتم‌ها تحت فرایندی به نام دمش اپتیکی دارای قطبش اسپینی می‌شوند. این فرایند که موجب عدم تعادل جمعیت زیرترازهای زیمان می‌شود، توسط باریکه نور قطبیده دایره‌ای راستگرد (چپگرد)، منطبق بر خط جذبی اتم قلیایی، صورت می‌گیرد که تکانه زاویه‌ای ۱+ (۱-) را به اتم‌ها القا می‌کند. از آنجایی‌که عملکرد حسگر به حرکت تقدیمی همدوس اسپین‌ها نیاز دارد، یک میدان مغناطیسی نوسانی برای ایجاد حرکت تقدیمی اتم‌ها با فاز یکسان اعمال می‌شود. با اعمال میدان مغناطیسی نوسانی در بسامد ω_m، به سامانه‌ای که با دمش اپتیکی قطبیده شده است، بین نزدیکترین زیرترازهای زیمان همسایه گذار صورت گرفته و موجب می‌شود که خواص اپتیکی ماده با این بسامد نوسان کند. در صورت برقراری شرط تشدید ($\omega_L = \omega_m$)، دامنه این نوسان بیشینه شده و منحنی تشدید آشکارسازی می‌شود. با توجه به وابستگی بسامد لارمور به اندازه میدان مغناطیسی اعمالی، این بسامد مبین اندازه میدان است [۲و ۳].

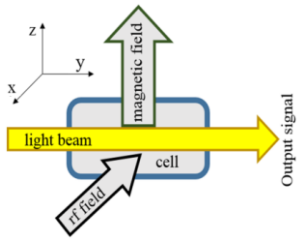
از آنجایی‌که دقت اندازه‌گیری حسگر اتمی به دقت تعیین بسامد لارمور از روی منحنی تشدید وابسته است، پهنا و دامنه‌ی منحنی تشدید بدست آمده، عامل تعیین کننده حساسیت حسگر اتمی است. به منظور بهینه‌سازی حساسیت حسگر، می‌بایست نسبت پهنا به دامنه‌ی منحنی تشدید کمینه گردد. تاکنون تاثیر عواملی چون شدت لیزر دمش، دامنه میدان نوسانی و دمای سلول حاوی فلز قلیایی بر حساسیت حسگر اتمی، به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است [۲ و ۴]. در این مقاله، پارامترهای چیدمان تجربی مربوط به مرجع [۴] شامل دما، ابعاد سلول، شدت دمش در معادلات بلاخ قرار داده شده و مؤلفه‌های هم فاز و ناهم فاز منحنی تشدید شبیه‌سازی شده است. سپس نسبت پهنا به دامنه هر یک از منحنی‌های تشدید با تغییر عوامل مذکور ثبت گردیده است. با بررسی وابستگی حساسیت به این عوامل، مقادیر بهینه هر یک تعیین گردیده است.

۲- نظریه معادلات بلاخ

به منظور دستیابی به تحلیل ماکروسکوپیک حرکت تقدیمی قطبش اسپینی در حضور میدان مغناطیسی ثابت (B_0) و میدان مغناطیسی نوسانی (B_{rf})، معادلات بلاخ معرفی شدند [۵]. اگر B_0 و B_{rf} به ترتیب در راستای z و صفحه xy اعمال شوند، معادلات بلاخ با رابطه

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix}M_x\\M_y\\M_z\end{pmatrix}=\gamma\begin{pmatrix}M_x\\M_y\\M_z\end{pmatrix}\times\begin{pmatrix}B_{rf}\cos(\omega_{rf}t)\\B_{rf}\sin(\omega_{rf}t)\\B_0\end{pmatrix}-\begin{pmatrix}M_x/T_2\\M_y/T_2\\(M_z-M_0)/T_1\end{pmatrix} \quad (۱)$$

بیان می‌شوند. در رابطه (۱)، T_1 و T_2 به ترتیب زمان واهلش طولی و عرضی قطبش اسپینی هستند. بر طبق این معادلات، عبور نور از میان بخار فلز قلیایی با سه مؤلفه قطبش اسپینی یعنی M_x، M_y و M_z کنترل می‌شود. اگرچه سیگنال خروجی حسگر، متناسب با M_n است که n جهت نور دمش نسبت به راستای میدان مغناطیسی اعمالی B_0 است [۲]. شکل ۱، راستای نور دمش، میدان مغناطیسی B_0 و میدان نوسانی را نسبت به سلول حاوی فلز قلیایی نشان می دهد.



شکل ۱. طرحواره عملکرد حسگر اتمی

برای حل معادلات بلاخ، از دستگاه مختصات چرخان استفاده می‌کنیم. در این دستگاه صفحه xy با بسامد لارمور حول محور z می چرخد و لذا بردار قطبش اسپینی در حالت تعادل، ثابت به نظر می‌رسد. در این مختصات، مؤلفه‌های هم

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

فاز (M'_y) و ناهم فاز (M'_x) سیگنال M_x که با عنوان مدهای جذب و پراکندگی شناخته می‌شوند، به صورت

$$M'_x = \frac{\omega_{rf} T_2^{\,2} \delta\omega}{1+\omega_{rf}^{\,2} T_1 T_2 + (T_2\delta\omega)^2} M_0 , \quad (۲)$$

$$M'_y = -\frac{\omega_{rf} T_2}{1+\omega_{rf}^{\,2} T_1 T_2 + (T_2\delta\omega)^2} M_0 ,$$

نمایش داده می‌شوند، که در آن $\delta\omega = \omega - \omega_0$ و $\omega_0 = \gamma B_0$ بسامد لارمور می‌باشد. زمان واهلش طولی و عرضی قطبش اسپینی، T_1 و T_2، روابط

$$\frac{1}{T_1} = \frac{1}{q}(R_{SD} + R_{OP}) + R_{wall} , \quad (۳)$$

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{q_{SE}} R_{SE} ,$$

را برآورده می‌سازند. در رابطه (۳)، q ضریب تضعیف است که در حالت قطبش کامل با q=2I +1 داده می‌شود، R_{SD} نرخ واهلش نابودی اسپینی، R_{SE} نرخ واهلش تبادل اسپینی، R_{wall} نرخ برخورد با دیواره سلول و R_{op} نرخ دمش است. نرخ واهلش تبادل اسپین ($R_{SD} = R_{SD}^{Self} + R_{SD}^{B}$) ناشی از نابودی اسپین در اثر برخورد اتم‌های قلیایی Rb با یکدیگر و با گاز بافری (He) است که جهت کاهش نرخ برخورد با دیواره وارد سلول حاوی فلز قلیایی وارد سلول شده است. نرخ تبادل اسپین ناشی از تبادل اسپین در برخورد اتم‌های قلیایی با یکدیگر و نرخ برخورد با دیواره ناشی از نابودی اسپین در برخورد با دیواره سلول حاوی بخار قلیایی است. به طور کلی نرخ واهلش با رابطه $R = N\sigma\bar{v}$ داده می‌شود که $\bar{v}$ سرعت متوسط گرمایی ($\bar{v} = \sqrt{8k_B T/\pi m}$)، N چگالی بخار قلیایی و σ سطح مقطع برخورد می‌باشد [۲]. سطح مقطع برخوردهای نابودی اسپین برای فلز قلیایی روبیدیوم برابر است با $\sigma_{SD}^{Self} = 1.6\times10^{-17} cm^2$، $\sigma_{SD}^{He} = 9\times10^{-24} cm^2$ و سطح مقطع تبادل اسپین برای این فلز برابر با $\sigma_{SE}^{Self} = 1.9\times10^{-14} cm^2$ است. بنابراین با جایگذاری چگالی بخار قلیایی (که از معادله حالت گاز ایده‌آل بدست می‌آید) و دما (در رابطه سرعت متوسط گرمایی)، نرخ واهلش نابودی اسپین و نرخ واهلش تبادل اسپین بدست می‌آید. نرخ واهلش ناشی از دمش اپتیکی (R_{op}) با ضریب ثابتی متناسب با شدت دمش است و نرخ واهلش از دیواره متناسب با ابعاد سلول حاوی فلز قلیایی ($R_{wall} = D(\pi/R)^2$) است [۲]. با جایگذاری این موارد در روابط (۳) زمان‌های واهلش T_1 و T_2 بدست می‌آیند و با جایگذاری این زمان‌ها در روابط (۲) می‌توان وابستگی بسامدی مؤلفه‌های هم فاز و ناهم فاز را ترسیم کرد.

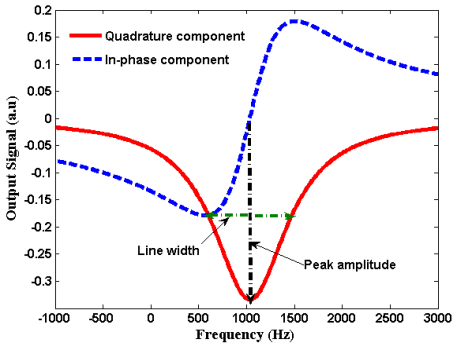
حساسیت یک حسگر اتمی با رابطه

$$\delta B = \frac{1}{\gamma T_2 S/N} , \quad (۴)$$

بیان می‌شود که در آن S/N نسبت سیگنال به نوفه و γ ضریب ژیرومغناطیس است و T_2 با استفاده از پهنای منحنی تشدید ($\Delta\nu_{FWHM} = 1/2\pi T_2$) بدست می‌آید. با توجه به رابطه مذکور می‌توان گفت که هر چه نسبت پهنا به دامنه منحنی تشدید کوچکتر شود، حساسیت کمتر می‌شود و لذا حسگر قابلیت تشخیص تغییرات کوچکتر میدان مغناطیسی اعمالی را خواهد داشت [۲ و ۶].

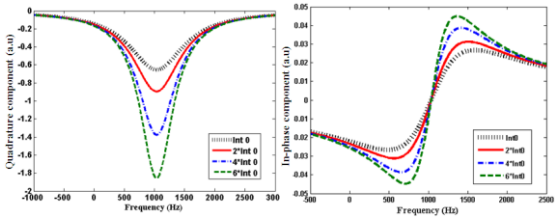
۳- نتایج

شکل (۲) مؤلفه‌های هم‌فاز و ناهم‌فاز بدست آمده از حل معادلات بلاخ را بر حسب بسامد نشان می‌دهد. پهنا و دامنه منحنی تشدید در شکل (۲) مشخص شده‌اند.



شکل ۲. مؤلفه هم فاز و ناهم فاز سیگنال تشدید

شکل ۳ تغییرات مؤلفه‌های هم‌فاز و ناهم‌فاز منحنی تشدید را با افزایش شدت دمش نشان می‌دهد.

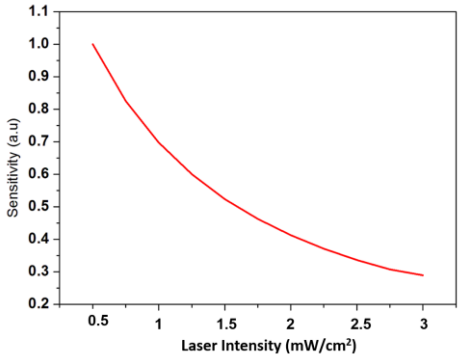


شکل ۳. تغییرات مؤلفه‌های منحنی تشدید با افزایش شدت دمش

نسبت پهنا به دامنه منحنی‌های شکل ۳، در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزایش شدت، حساسیت بهتر (کمتر) می‌شود. اما با توجه به اینکه افزایش شدت، همراه با نابودی اسپین است، طبق شکل ۴، بهینه حساسیت مربوط به شدتی حدود ۳-۲ mW/cm^2 است که شیب تغییرات ملایم شده است و افزایش شدت موجب تغییر چشمگیری در حساسیت نمی‌شود.

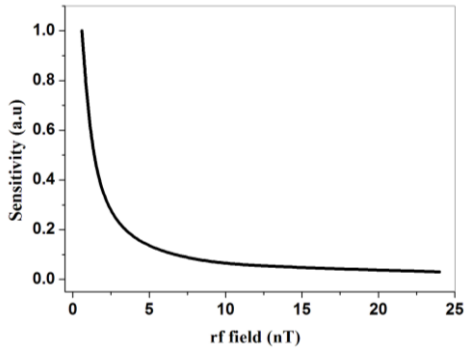
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]



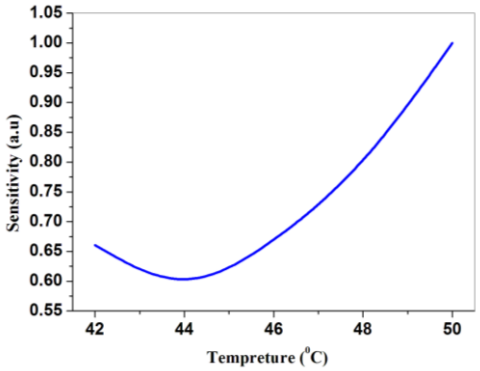
شکل ۴. تغییرات حساسیت بر حسب شدت لیزر دمش

پس از حل معادلات بلاخ و بدست آوردن سیگنال تشدید با تغییر دامنه B_{rf}، وابستگی حساسیت به این دامنه رسم گردیده است (شکل ۵). مشاهده می‌شود که افزایش دامنه B_{rf}، موجب کاهش حساسیت می‌گردد. اما از طرفی افزایش دامنه B_{rf}، موجب تاثیر بر روی بسامد لارمور ناشی از میدان ثابت می‌شود. بنابراین، در حالتی که میدان اعمالی حدود ۲۲۰nT است، میدان نوسانی در حدود ۱۰-۱۵nT مقدار بهینه است.



شکل ۵. تغییرات حساسیت بر حسب دامنه میدان نوسانی

به همین ترتیب، تغییرات حساسیت بدست آمده از حل معادلات بلاخ بر حسب دمای سلول که متناسب با چگالی بخار فلز قلیایی است (شکل ۶)، نشان می‌دهد که کمینه حساسیت در حالتی که دمای سلول حاوی بخار فلز قلیایی حدود ۴۴ °C (معادل چگالی بخار 1×10^{10} cm^{-3}) است، روی می‌دهد. افزایش دما موجب افزایش چگالی بخار، افزایش دامنه سیگنال و لذا کاهش حساسیت می‌شود. اما همزمان، تعداد برخوردهای نابودی و تبادل اسپین نیز افزایش می‌یابند که موجب افزایش حساسیت در دمای بیشتر از ۴۴ °C می‌شود.



شکل ۶. تغییرات حساسیت بر حسب دمای سلول

۴- نتیجه گیری

حسگر اتمی دمش اپتیکی یکی از حساسترین حسگرهای مغناطیسی است که برای آشکارسازی میدان‌های مغناطیسی بسیار ضعیف به کار می‌رود. اساس عملکرد این حسگر بر مبنای اندازه‌گیری بسامد حرکت تقدیمی لارمور با استفاده از آشکارسازی سیگنال تشدید است. بنابراین حساسیت این حسگر، به عوامل مؤثر بر سیگنال تشدید وابسته است.

تاثیر عوامل مؤثر بر حساسیت، با بررسی نسبت پهنا به دامنه مؤلفه‌های هم فاز و ناهم فاز سیگنال تشدید امکان‌پذیر است. در این تحقیق، تغییرات حساسیت بر حسب شدت لیزر دمش، دامنه میدان نوسانی و دمای سلول با استفاده از شبیه‌سازی سیگنال تشدید توسط معادلات بلاخ و اندازه کمیت‌های چیدمان تجربی، مورد بررسی قرار گرفته و مقادیر بهینه بدست آمده‌اند.

مراجع

[1] D. Budker, M. Romalis, “Optical magnetometry”, Nature Physics, Vol.3, pp. 227-234, 2007.

[2] S. J. Seltzer, “Developments in Alkali-Metal Atomic Magnetometry”, Ph.D. Thesis, Princeton University, 2008.

[۳] ملیحه رنجبران، سید محمد حسین خلخالی، سیده مهری حمیدی و محمد مهدی طهرانچی، "آشکارسازی اپتیکی شکافتگی زیمان اتم‌های قلیایی به‌منظور اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی بسیار ضعیف"، بیست و دومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و هشتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، ۱۳۹۴.

[4] M. Ranjbaran, M. M. Tehranchi, S. M. Hamidi, S. M. H. Khalkhali, “Harmonic detection of magnetic resonance for sensitivity improvement of optical atomic magnetometers” J. Magn. Magn. Mater, Vol. 424, PP. 284–290, 2017.

[5] Bloch, “Nuclear Induction”, Phys. Rev. Vol. 70, PP. 460-474, 1946.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]