

نانو نوسانگرهای گشتاور اسپینی

سید مجید محسنی آرمکی

استادیار دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، (m-mohseni@sbu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۹ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۱۶

چکیده

نانونوسانگرهای گشتاور اسپینی قابلیت تبدیل جریان یکنواخت به ولتاژ RF را دارند که بعنوان نسل جدیدی از مولدهای میکروموج کنترل پذیر با جریان و میدان مغناطیسی در ابعاد زیر میکرون معرفی شده‌اند. در این مقاله، ساخت، اندازه‌گیری و مشخصه‌یابی نانونوسانگر گشتاور اسپینی ارائه می‌شود. فرکانس خروجی این نوسانگر به عنوان تابعی از جریان و میدان مغناطیسی مطالعه و نحوه پاسخ آن بررسی و تحلیل می‌شود. نتایج بدست آمده پیش‌بینی رفتار فرکانسی این نوسانگر به خروجی فرکانس زیر تراهرتز را با تغییر مقدار ناهمسانگردی لایه آزاد پیشنهاد می‌دهد. در نهایت، استفاده از این نوسانگرها بعنوان مولدهای میکروموج با پهنای باند وسیع در ادوات مجتمع میکروالکترونیک آینده را می‌توان نوید داد.

کلیدواژه

کلید اسپینی، نانونوسانگر، گشتاور اسپینی، اسپینترونیک، میکروموج.

مقدمه

نوسانگرهای الکترونیکی به نوعی مولدهای جریان متناوب هستند که در مدارهای الکترونیکی استفاده می‌شوند. معمولاً این نوسانگرها از ادوات نیمه‌رسانا شامل ترانزیستورها یا از بلورهای خاصی ساخته می‌شوند و امروزه در بازه فرکانسی بسیار وسیعی در آزمایشگاه‌ها و صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. نوسانگرهای فرکانس بالا یا فرکانس‌های رادیویی و میکروموج از اهمیت ویژه‌ای در صنایع الکترونیک سریع برخوردار هستند، از جمله در رایانه‌ها، گوشی‌های تلفن همراه، ادوات مخابراتی، حسگرها و سایر کاربردهای فراوان دیگر در صنعت ارتباطات. ابعاد بزرگ نوسانگرهای مذکور نسبت به مدارها و ادوات جدید در میکروالکترونیک و همچنین وسیع نبودن پهنای فرکانسی آنها محدودیتهایی را برای کارایی چنین نوسانگرهایی در مدارهای مجتمع میکروالکترونیک ایجاد کرده است. از اینرو نوسانگرهای پهن‌بند با ابعاد چند میکرون مورد استقبال قرار خواهند گرفت.

در این مقاله، نوسانگری با ابعاد زیر میکرون با عملکردی مبتنی بر انتقال گشتاور اسپینی [۶-۱] در ادوات اسپینترونیک معرفی می‌شود. در ابتدا به روش ساخت و مشخصه‌یابی نانونوسانگر گشتاور اسپینی پرداخته و سپس عملکرد فیزیکی نانونوسانگر مذکور نسبت به میدان مغناطیسی و جریان شرح داده می‌شود. همچنین، با بررسی عملکرد این نانونوسانگر نسبت به خواص لایه‌های مغناطیسی، خروجی فرکانس زیر تراهرتز از اینگونه نوسانگرها پیش‌بینی می‌شود.

ساختار نوسانگر

چنین نوسانگرهایی از کلیدهای اسپینی^۱ چندلایه‌ای مغناطومقاومت^۲ (موضوع نوبل فیزیک سال ۲۰۰۷) [۷ و ۸] ساخته می‌شوند. کلیدهای اسپینی متشکل از سه لایه اصلی فلزی شامل دو لایه مغناطیسی متجزا با یک فلز غیرمغناطیسی هستند. یکی از لایه‌های مغناطیسی میدان وادارندگی^۳ یا ناهمسانگردی کمتری از لایه دیگر دارد و با اعمال میدان‌های کمتری نسبت به لایه دیگر تغییر جهت می‌دهد. مغناطومقاومت این ساختار با راستای مغناطش دو لایه مغناطیسی نسبت به یکدیگر، ضخامت لایه میانی، تقابل مغناطیسی دو لایه و قطبش اسپینی لایه‌ها تعیین می‌شود. لایه‌ای که براحتی نسبت به میدان مغناطیسی جهت‌گیری می‌کند را لایه آزاد^۴ و لایه دیگر را لایه مرجع^۵ می‌نامند. لازم به یادآوری است که امروزه این ساختارها بعنوان حسگر اصلی حافظه‌های مغناطیسی در اغلب رایانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹ و ۱۰].

در نوسانگر مورد مطالعه در این مقاله از کلید اسپینی با مغناطش متعامد استفاده شده است. از لایه کبالت بعنوان لایه مرجع و از لایه نیکل-کبالت بعنوان لایه آزاد استفاده شده است. می‌توان برای

1. Spin valves
2. Magnetoresistance
3. Coercivity
4. Free layer
5. Reference layer

فازی^۹ چند نوسانگر بطور سری و موازی استفاده کرد [۱۱] و-۲۰
۱۱۸.

ساخت نوسانگر

لایه‌نشانی

لایه‌نشانی بر روی یک زیرلایه سیلیکونی پوشش داده شده با لایه اکسید سیلیکون انجام می‌شود. ساخت این چند لایه‌ای بدین‌گونه است که در ابتدا به روش کندوپاش چند لایه‌ای بستر^{۱۱} فلزی جهت فراهم‌سازی یک زیر ساخت نانومتری هموار رسانا متشکل از تانتالیوم (۵ نانومتر) / مس (۱۵ نانومتر) / تانتالیوم (۵ نانومتر) ساخته می‌شود. سپس سه لایه‌ای اصلی کلید اسپینی متشکل از کبالت (۸ نانومتر) / مس (۶ نانومتر) / نیکل-کبالت (۴ نانومتر) ساخته می‌شود. در نهایت، کل ساختار با لایه‌های مس (۲ نانومتر) / پالادیوم (۳ نانومتر) جهت جلوگیری از اکسایش و مقاوم در فرآیندهای ساخت پوشیده می‌شود. همه لایه‌ها در یک محفظه لایه‌نشانی و پشت سر هم انجام می‌شوند. فشار گاز آرگون در حین لایه‌نشانی حدود ۲ تا ۵ میلی‌تور، فشار زمینه 2×10^{-8} تور و نرخ رشد لایه‌ها حدود ۰/۱ تا ۱ آنگستروم بر ثانیه لحاظ شده‌اند.

کلیدهای اسپینی ساخته‌شده در ابتدا با مغناطوسنج و مغناطومقاومت سنجیده می‌شوند. در صورت دستیابی به کلیدهای اسپینی متشکل از لایه‌های مغناطیسی واجتیده با مغناطومقاومت بالا می‌توان آنها را برای ساخت نانونوسانگر مورد استفاده قرار داد. نهایتاً کلید اسپینی مورد مطالعه در این مقاله بصورت $\text{Si/SiO}_2/\text{Ta/Cu/Ta/Co/Cu/Co-Ni/Cu/Pd}$ است که لایه کبالت با ناهمسانگردی در صفحه و لایه کبالت-نیکل با ناهمسانگردی عمود بر صفحه، یک ساختار کلید اسپینی متعادل را تشکیل می‌دهند.

ساخت قطعه

بعد از سنجش‌های مغناطیسی جهت دست‌یابی به کلید اسپینی مناسب، فرآیند ساخت نوسانگر انجام می‌شود. بدین صورت که در ابتدا یک لایه اکسید سیلیکون بعنوان پوشش سخت عایق توسط روش روش‌نشستی بخار شیمیائی^{۱۱} لایه‌نشانی می‌شود. سپس بر روی نمونه لایه پلیمری مخصوص حکاکی^{۱۲} یا مقاوم اپتیکی^{۱۳} پوشش داده شده و توسط دستگاه حکاکی بیم الکترونی محل‌هایی که نیاز به ایجاد حفره است تحت تابش بیم الکترونی قرار می‌گیرد.

لایه آزاد، از آلیاژ نرم مغناطیسی نیکل-آهن (پرمالوی) نیز استفاده نمود، همچنانکه در بسیاری از نوسانگرهای مطالعه‌شده از این ماده استفاده کرده‌اند [۱۲ و ۱۵]. بطور کلی این لایه باید اتلاف^۶ میکروموج کم داشته باشد و میدان مغناطیسی زیادی جهت روشن شدن نوسانگر نیاز نداشته باشد. لایه نیکل-آهن میدان مغناطیسی زیادی در راستای عمود بر صفحه نیاز دارد تا در نوسانگر بکار آید [۱۲ و ۱۱]. هدف استفاده از لایه نیکل-کبالت در این مقاله دستیابی به ناهمسانگردی عمود بر صفحه آن است که مقدار میدان مغناطیسی برای روشن کردن این نوسانگرها را بشدت کاهش می‌دهد. از طرفی جریان مورد نیاز برای روشن شدن نوسانگر نیز با استفاده از لایه آزاد ناهمسانگرد به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد [۱۳-۱۵]. با افزایش مقدار ناهمسانگردی لایه آزاد و در میدانهای مغناطیسی نسبتاً زیاد، بعلت ظهور نانوقطره مغناطیسی در این لایه، توان نوسانگر افزایش قابل توجهی خواهد داشت و پهنای باند نوسانگر تغییر می‌کند [۱۴] که البته بررسی آن خارج از هدف تحقیق در این مقاله است. در این مقاله دینامیک نوسانگر در میدانهای مغناطیسی کم مطالعه می‌شود.

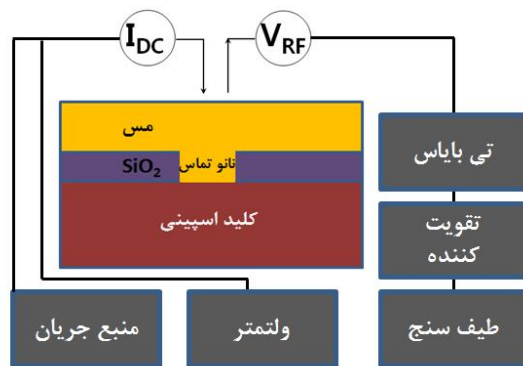
ساختارهای دیگری نیز با استفاده از ادوات مغناطومقاومت تونلی^۷ مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگر بجای لایه مس بین دو لایه مغناطیسی از لایه فوق نازک اکسید منیزیوم یا اکسید آلومینیوم با ضخامت حدود ۱ نانومتر استفاده شود بعلت تونل زنی اسپین، مغناطومقاومت بسیار بیشتری نسبت به کلید اسپینی بدست می‌آید. در این حالت توان خروجی نوسانگر که به طور مستقیم تابعی از مغناطومقاومت است به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد [۱۶ و ۱۷]. اما کنترل دقیق ضخامت لایه میانی فوق نازک و محدود شدن شکل این نوسانگرها بصورت نانومیل^۸ ساخت آنها را دشوار کرده‌است. از طرفی ایجاد ناهمسانگردی شکلی بعلت نانومیله بودن، فرکانس خروجی این نوسانگرها و پهنای باند آنها کمتر از نوسانگرهای ساخته‌شده نانوتماسی-کلید اسپینی است که در این مقاله مطرح می‌شوند.

در عوض توان خروجی نوسانگر را با بهینه‌سازی ساختار نانوتماسی-کلید اسپینی می‌توان افزایش داد. بعنوان مثال در کلید اسپینی متعادل مطرح شده در این مقاله، با اعمال جریان و انتقال گشتاور اسپینی لایه آزاد بطور تمام موازی یا پادموازی با لایه مرجع قرار می‌گیرد و انتظار مغناطومقاومت زیاد و لذا توان خروجی زیادی از نانونوسانگر می‌رود [۱۵]. همچنین، می‌توان جهت افزایش توان خروجی این نوسانگرها از روش جفت کردن

9. Phase locking
10. Seed layer
11. Chemical vapor deposition
12. Lithography
13. Photo resist

6. Damping
7. Tunneling Magnetoresistance
8. Nano-pillar

چیدمان اندازه‌گیری این نوسانگر در شکل (۲) نشان داده شده است. بعلت توان ضعیف خروجی این نوسانگر باید از تقویت کننده جهت افزایش سیگنال خروجی استفاده نمود. از قطعه تی‌بایاس^{۱۵} جهت ممانعت ارسال جریان ورودی به سایر ادوات استفاده می‌شود. دامنه خروجی نوسانگر در دستگاه طیف سنج^{۱۶} قابل مشاهده است. با استفاده از اتصال مخصوص GPIB^{۱۷} علاوه بر کنترل کل فرآیند اندازه‌گیری با رایانه، اطلاعات بدست آمده (با حجم بسیار زیاد) را می‌توان ذخیره و متعاقباً تحلیل کرد. لازم به یادآوری است که میدان مغناطیسی همزمان به نمونه اعمال می‌شود تا لایه آزاد به اشباع برسد. راستای اعمال میدان در این مقاله عمود بر صفحه است. یعنی لایه آزاد را اشباع کرده و لایه مرجع را کمی به سمت عمود بر صفحه سوق می‌دهد.



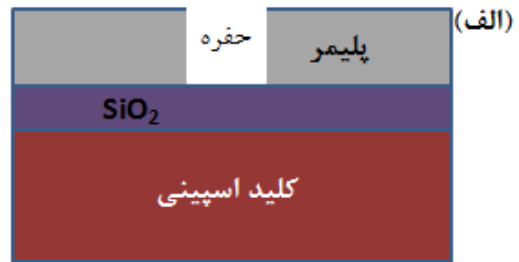
شکل ۲. چیدمان اندازه‌گیری نوسانگر گشتاور اسپینی

دینامیک مغناطش: فیزیک حاکم بر نوسانگر

فیزیک حاکم بر این نوسانگر بر مبنای معادله لاندائو-لیفیشیتز، با در نظر گرفتن جملات اتلاف و همچنین جمله گشتاور اسپینی بصورت زیر است (نمادهای پررنگ بردار هستند).

$$\frac{dM}{dt} = \gamma M \times H_{eff} - \alpha M \times (M \times H_{eff}) + \beta(I) M \times (M \times m_F)$$

که M و m_F بترتیب بردارهای مغناطش لایه‌های آزاد و مرجع هستند و H_{eff} هرگونه میدان مغناطیسی موجود در سیستم، شامل میدان اعمالی، میدان ناهمسانگردی لایه آزاد، میدان ناشی از جریان و ... می‌باشد. در حقیقت جمله اتلاف (جمله دوم سمت راست و ناشی از رفتار ذاتی ماده) و گشتاور اسپینی (جمله سوم سمت راست که ناشی از اعمال جریان، I ، به نانوتماس) با یکدیگر مقابله می‌کنند. در این تقابل، مغناطش لایه آزاد با دینامیک حاکم از جمله اول که مختل شده از دو جمله دیگر است نوسان می‌کند. به نوعی اتلاف لایه آزاد در ناحیه زیر نانوتماس با اعمال گشتاور



شکل ۱. فرآیند ساخت نانوسانگر گشتاور اسپینی

در ادامه با قرار دادن نمونه در محلول، قسمت‌های مورد تابش قرار گرفته شسته می‌شوند، شکل (۱-الف). در ادامه با استفاده از زدایش خشک یونی^{۱۴}، لایه اکسید سیلیکون زیر حفره برداشته می‌شود و حفره‌ای به ابعاد مورد نظر (در این مقاله با قطر حدوداً ۵۰ نانومتر) برای تماس با کلید اسپینی بدست می‌آید، شکل (۱-ب). در نهایت پلیمر باقیمانده برداشته شده و مس بعنوان رسانای الکتریکی بر روی نمونه لایه‌نشانی می‌شود، شکل (۱-ج). مشابه همین فرآیند، اما با روش حکاکی اپتیکی، اتصال میکرونی زمین در چند میکرومتری نانوتماس ساخته می‌شود.

اندازه‌گیری و مشخصه‌یابی

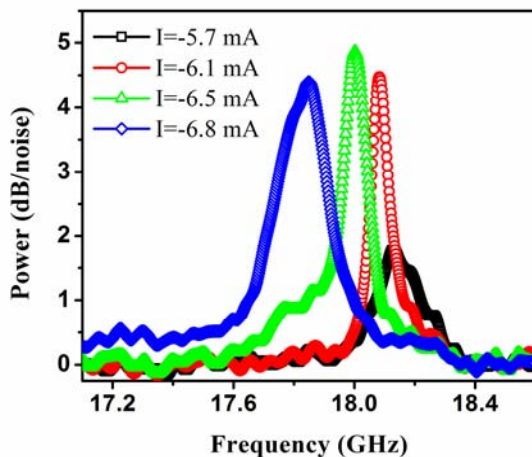
همانطور که در ابتدا مطرح شد، با ارسال جریان یکنواخت به این نوع نوسانگرها می‌توان خروجی RF دریافت کرد. با ارسال جریان (از اتصال زمین به نانوتماس) مغناطش بخشی از لایه آزاد واقع در زیر نانوتماس تغییر می‌کند. از طرفی گشتاور اسپینی لایه مرجع به لایه آزاد انتقال می‌یابد و بعلت از بین رفتن تعادل این لایه و کاهش اتلاف آن به صفر شروع به نوسان می‌کند. در نتیجه، مغناطس مقاومت کل ساختار تابعیت زمانی پیدا کرده و ولتاژ خروجی RF بدست می‌آید.

15. Tee bias

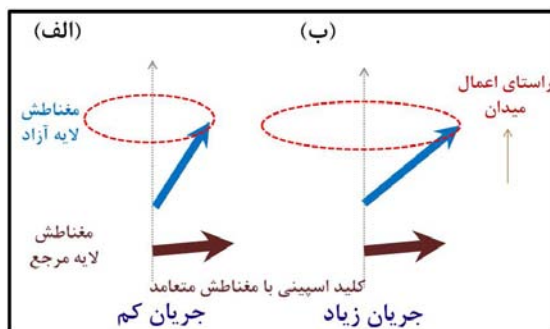
16. Spectrum analyzer

17. General purpose interface bus

14. Reactive ion etching



شکل ۳. فرکانس خروجی نوسانگر در جریانهای متفاوت



شکل ۴. طرحواره مغناطش نوسانگر در جریانهای متفاوت

تشدید مغناطیسی لایه آزاد را می‌توان با رابطه $f = \gamma \mu_0 / 2\pi [H + (H_k - M_S) \cos(\theta)]$ شرح داد. نمادهای H ، H_k ، M_S ، θ و μ_0 به ترتیب میدان خارجی، میدان ناهمسانگردی، زاویه چرخش، مغناطش اشباع لایه آزاد و تراوانی مغناطیسی خلأ می‌باشند. در اینجا زاویه چرخش با تقریب خوبی صفر فرض می‌شود. مقدار γ در اینجا ۲۸ GHz/T در نظر گرفته شده است [۱۵-۱۳]. مطابق با این معادله، فرکانس نوسانگر با میدان رابطه خطی دارد. نتایج تجربی ارائه شده در شکل (۵) نشان دهنده رفتار فرکانسی نوسانگر با میدان مغناطیسی در جریان ثابت (۶- میلی آمپر) است. مشاهده می‌شود که نتایج تجربی فرکانس نوسانگر با میدان اعمالی بطور خطی رفتار می‌کند که با تئوری تشدید مغناطیسی مطرح شده سازگار است.

اسپینی به کاهش می‌یابد و این لایه آزادانه حرکت فرره‌ای^{۱۸} می‌کند. در حین چرخش لایه آزاد و تغییر جهت مغناطش این لایه با زمان در حالیکه مغناطش لایه مرجع ثابت باقی می‌ماند (مطابق با شکل (۴))، مقاومت ساختار با زمان تغییر می‌کند که منجر به ایجاد اختلاف پتانسیل می‌شود. تغییرات زمانی کسری از نانوثانیه است لذا فرکانس خروجی در ناحیه RF قرار می‌گیرد و چنین ساختاری مولد سیگنال RF می‌شود.

نتایج و تحلیل

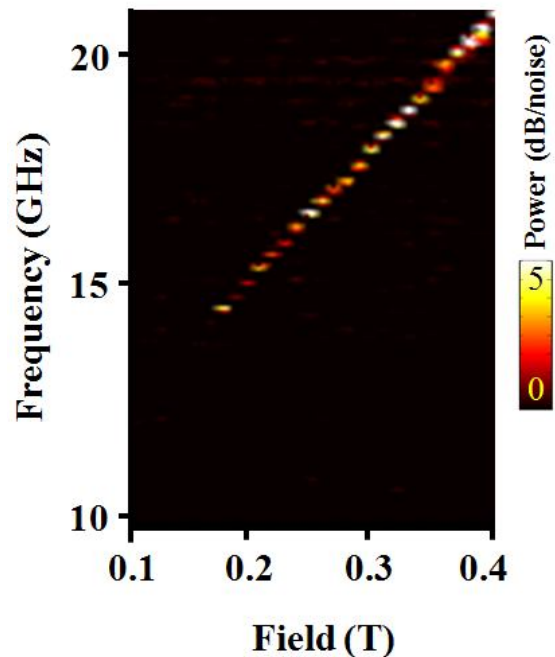
شکل (۳) طیف فرکانسی این نوسانگر در جریانهای مختلف را نشان می‌دهد. میدان اعمال شده در این اندازه گیری ۰/۳ تسلا می‌باشد. با توجه به شکل فوق می‌توان مشاهده کرد که با افزایش جریان، فرکانس خروجی نوسانگر کاهش می‌یابد. با توجه به مطالعات انجام شده در این ساختار [۱۳-۱۵]، در جریانهای کم لایه آزاد شروع به حرکت فرره‌ای حول محور اعمال میدان (عمود بر صفحه) می‌کند. شعاع چرخش کم و سرعت چرخش و لذا فرکانس نوسانگر زیاد است، مطابق شکل (۴-الف). با افزایش جریان، گشتاور اسپینی لایه مرجع (که مؤلفه متمایل به صفحه دارد) با مقدار بیشتری به لایه آزاد اعمال می‌شود. شعاع چرخش لایه آزاد افزایش و سرعت و فرکانس آن کاهش می‌یابد. چنانکه، مغناطش این لایه با مؤلفه‌های درون صفحه برهمکنش بیشتری می‌کند تا یک چرخش کامل انجام دهد. در این حالت مغناطش لایه آزاد لختی بیشتری پیدا کرده و با سرعت کمتری چرخش را کامل می‌کند و فرکانس کاهش می‌یابد، مطابق با شکل (۴-ب).

دینامیک این نوسانگر ناشی از چرخش مغناطش لایه آزاد (همچنانکه بطور تجربی و تئوری اثبات شده است) [۱۳ و ۱۵] را می‌توان مشابه شرایط فرکانس تشدید مغناطیسی ^{۱۹}FMR بررسی کرد. با افزایش میدان مغناطیسی، مغناطش لایه مرجع به سمت عمود بر صفحه متمایل شده و گشتاور اسپینی عمود به صفحه بیشتری (داخل صفحه کمتری) به لایه آزاد انتقال می‌دهد. در این حالت شعاع چرخش مغناطش لایه آزاد کم می‌شود و فرکانس خروجی نوسانگر افزایش می‌یابد.

18. Precession
19. Ferromagnetic resonance

مرجع ها

- [1] J. Slonczewski, "Current-driven excitation of magnetic multilayers," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol 159, pp. L1-L7, 1996.
- [2] L. Berge, "Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current," *Phys. Rev. B*, vol 54, pp. 9353-9358, 1996.
- [3] M. Tsoi, A. Jansen, J. Bass, W. Chiang, V. Tsoi, P. Wyder, "Generation and detection of phase-coherent current-driven magnons in magnetic multilayers," *Nature*, vol 406, pp. 46-48, 2000.
- [4] S.I. Kiselev, J.C. Sankey, I.N. Krivorotov, N.C. Emley, R.J. Schoelkopf, R.A. Buhrman, D.C. Ralph, "Microwave oscillations of a nanomagnet driven by a spin-polarized current," *Nature*, vol 425, pp. 380-383, 2003.
- [5] W. Rippard, M. Pufall, S. Kaka, S. Russek, T. Silva, "direct-current induced dynamics in $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ point contacts," *Phys. Rev. Lett.*, vol 92, pp. 027201-05, 2004.
- [6] P. Villard, U. Ebels, D. Houssameddine, J. Katine, D. Mauri, B. Delaet, P. Vincent, M.C. Cyrille, B. Viala, J. P. Michel, J. Prouvée, F. Badets, "A GHz Spintronic-Based RF Oscillator," *IEEE J. Solid-St. Circ.*, vol. 45, pp. 214-223, 2010.
- [7] M. Baibich, J. Broto, A. Fert, F. Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, J. Chazelas, "Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices," *Phys. Rev. Lett.*, vol 61, pp. 2472-2475, 1988.
- [8] G. Binash, P. Grünberg, F. Saurenbach, W. Zinn, "Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange," *Phys. Rev. B*, vol 39, pp. 4828-4830, 1989.
- [9] A. Fert, "Nobel Lecture: Origin, development, and future of spintronics," *Rev. Mod. Phys.*, vol 80, pp. 1517-1530, 2008.
- [10] P. Grünberg, "Nobel Lecture: From spin waves to giant magnetoresistance and beyond," *Rev. Mod. Phys.*, vol 80, pp. 1531-1540, 2008.
- [11] S.R. Sani, J. Persson, S.M. Mohseni, Ye. Pogoryelov, P.K. Muduli, A. Eklund, G. Malm, M. Käll, A. Dmitriev, J. Åkerman, "Mutually synchronized bottom-up multi-nano-contact spin-torque oscillators," *Nat. Commun.*, vol 4, pp. 2731-7, 2013.
- [12] R.K. Dumas, E. Iacocca, S. Bonetti, S.R. Sani, S.M. Mohseni, A. Eklund, J. Persson, O. Heinonen, J. Åkerman, "Spin-wave-mode coexistence on the nanoscale: A consequence of the Oersted-field-induced asymmetric energy landscape," *Phys. Rev. Lett.*, vol 110, pp. 257202-5, 2013.
- [13] S.M. Mohseni, S.R. Sani, J. Persson, T.N. Anh Nguyen, S. Chung, Ye. Pogoryelov, J. Åkerman, "High frequency operation of a spin-torque oscillator at low field," *Phys. Status Solidi-RRL*, vol 5, pp. 432-434, 2011.
- [14] S.M. Mohseni, S.R. Sani, J. Persson, T.N. Anh Nguyen, S. Chung, Ye. Pogoryelov, P.K. Muduli, E.



شکل ۵. فرکانس نوسانگر تابعی از میدان مغناطیسی

می‌توان انتظار داشت که با افزایش ناهمسانگردی یا کاهش مغناطش اشباع لایه آزاد به فرکانسهای بیشتری دست یافت. با فرض $\mu_0(H_k - M_S) > 1 \text{ T}$ که بطور تجربی امکان پذیر است، با استفاده از میدان مغناطیسی اعمالی حدود ۲ تسلا که براحتی در دسترس است، می‌توان به فرکانس بیش از ۱۰۰ گیگاهرتز دست یافت.

نتیجه‌گیری

در این مقاله نحوه ساخت نانوسانگر گشتاور اسپینی، شامل لایه‌نشانی، ساخت نوسانگر و همچنین چیدمان اندازه‌گیری آن مطرح شد. فرکانس خروجی این نوسانگر تابعی از جریان ورودی و میدان مغناطیسی اعمالی می‌باشد. تحلیل رفتار فرکانس این نوسانگر با جریان و میدان مغناطیسی ارائه شد. دستیابی به فرکانسهای بسیار بالا و در ناحیه زیر تراهرتز با استفاده از اینگونه نوسانگرها پیش‌بینی شد. در نهایت کاربرد این نانوقطعه در ادوات میکرو و نانوالکترونیک نسل آینده را می‌توان نوید داد.

تشکر و قدردانی

از آقایان دکتر سهراب ثانی و پروفسور یوهان اُگرمَن که در ساخت، مشاوره و راهنمایی در نتایج بدست آمده کمک نمودند و همچنین بخش نانو و مواد فیزیک انستیتوی تکنولوژی رویال و شرکت نانوس در سوئد سپاسگزاری می‌شود.

- [17] J.-V. Kim, "Spin-Torque Oscillators," *Solid State Physics*, vol 63, pp 217–294, 2012.
- [18] F. B. Mancoff, N. D. Rizzo, B. N. Engel, S. Tehrani, "Phase-locking in double-point-contact spin-transfer devices," *Nature*, vol 437, pp 393-395, 2005.
- [19] S. Kaka, M. R. Pufall, W. H. Rippard, T. J. Silva, S. E. Russek, J. A. Katine, "Mutual phase-locking of microwave spin torque nano-oscillators," *Nature*, vol 437, pp 389-392, 2005.
- [20] B. Georges, J. Grollier, V. Cros, A. Fert, "Impact of the electrical connection of spin transfer nano-oscillators on their synchronization: an analytical study," *Appl. Phys. Lett.*, vol 92, pp 232504-232506, 2008.
- Iacocca, A. Eklund, R.K. Dumas, S. Bonetti, A. Deac, M. Hoefer, J. Åkerman, "Spin torque-generated magnetic droplet solitons," *Science*, vol 339, pp. 1295-1298, 2013.
- [15] W.H. Rippard, A. Deac, M. Pufall, J. Shaw, M. Keller, S. Russek, C. Serpico, G. Bauer, "Spin-transfer dynamics in spin valves with out-of-plane magnetized CoNi free layers," *Phys. Rev. B*, vol 81, pp. 014426(1-8), 2010.
- [16] A. M. Deac, A. Fukushima, H. Kubota, H. Maehara, Y. Suzuki, S. Yuasa, Y. Nagamine, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, and N. Watanabe, "Bias-driven high-power microwave emission from MgO-based tunnel magnetoresistance devices," *Nat. Phys.*, vol 4, pp 803-809, 2008.