بررسی اثر هال در صفحه گرافین برای نانو سنسورهای مغناطیسی در تکنولوژی CMOS

غلامیان،محمد حسین[۱] ؛ حسینی،سید ابراهیم[۲]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد برق-الکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی، پردیس علوم وتحقیقات، خراسان شمالی-ایران

[۲] گروه برق-الکترونیک، دانشگاه فردوسی، مشهد

چکیده

در این مقاله به بررسی و شبیه سازی یک نانو سنسور اثر هال پرداخته ایم و آن را با سیلیسین (شکل دو بعدی سیلیکن) مقایسه می‌کنیم . در این سنسور از گرافین استفاده شده است دارای ویژگیهای شگرفی می‌باشد و موجب می‌شود که پاسخ های خوبی حاصل شود .در نهایت با بررسی پارامترهای مختلف ساختار آن به یک سنسور بهینه شده دست یافته‌ایم .

Analysis of Hall Effect in graphene plane for magnetic Nano_Sensors in CMOS technology

gholamyan, mohammad hossein[1]; hosseini, Seyed Ebrahim[2]

[1] Department of Electronic Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, North Khorasan, Iran
[2] Department of Electronic Engineering, ferdosi University, mashhad

Abstract

This thesis deals with Hall-effect nano-sensors. Hall sensors can detect and measure magnetic fields. Hall sensors have enormous applications in the industry and research activities.
Graphene is a two-dimensional sheet of Carbon atoms, i.e. one layer crystal of Carbon atoms. Due to special features like high electron mobility and near zero band-gap, Graphene has attracted interests in the electronics research community. In this research a Hall effect nano sensor based on Graphene is investigated and compared with silicon counterpart. Using extensive simulations, an optimized Graphene-based Hall sensor is designed. In order to gain highest sensitivity, sensor dimensions and contacts are optimized. The proposed sensor has linear output up to 0.5 Tesla of magnetic field. Due to nano-scale dimensions, this sensor has many potential applications. Moreover, it can be integrated with electronic devices in a single chip.
PACS No.85

مقدمه

سنسور اثر هال،از یک صفحه هادی یا نیمه هادی ساخته شده که اگر از یک طرف جریان الکتریکی اعمال شود(شمال به جنوب) و میدان مغناطیسی به صورت عمود به آن اعمال گردد ، از طرف دیگر نیز جریان الکتریکی برقرار می‌شود(شرق به غرب) که متناسب با میدان مغناطیسی می‌باشد که این پدیده برگرفته از نیروی لرنتس می‌باشد که باعث انحراف الکترون ها می‌گردد. در رابطه (۱) عوامل موثر در ولتاژ هال نشان داده شده است که (V_H) ولتاژ هال ، (R_H) مقاومت هال است که به جنس ماده بستگی دارد ، (I) جریان تغذیه ، (B) میدان مغناطیسی اعمالی و (d) قطر صفحه هال می‌باشد (۲و۸و۱۰).

در این مقاله ما از یک صفحه گرافین استفاده کرده‌ایم.گرافین به یک تک لایه اتم از کربن می‌گویند که فضایی دوبعدی شکل می‌دهد و دارای گاف انرژی صفر و موبیلیتیی الکترون و حفره $\frac{cm^2}{Vs}$ ۱۰۰۰۰ می‌باشد(تا $\frac{cm^2}{Vs}$ ۲۷۰۰۰نیز گزارش شده است) (۱و۹و۱۱و۱۲).

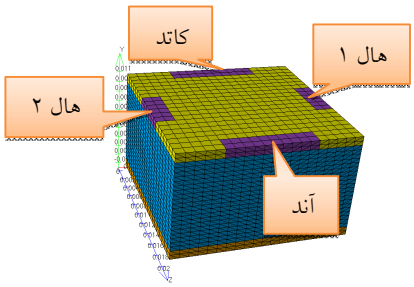
$$V_H = \frac{R_H IB}{d} \qquad (۱)$$

این ساختار در اصل یک سنسور مغناطیسی می‌باشد و اهمیت مطالعه روی چنین ساختارهایی در کاربرد آن در عکس برداری های مغناطیسی (۷)و همچنین اندازه گیری میدان های ضعیف می‌باشد(٤).در مقاله (۱۳)یک نانو سنسور اثر هال با استفاده از یک صفحه گرافین معرفی شده است که روی آن نانو ذره‌های پلادیوم قرار گرفته است. پلادیوم نه برابر حجم خود در اطرافش هیدروژن جذب می‌کند که منجر به یک ترکیب دو قطبی می‌شود . سپس نانو سنسور مغناطیسی این میدان‌های ضعیف را اندازه گیری کرده و بعد پردازش میزان هیدرژن را تشخیص می‌دهد .

مراحل شبیه سازی

عملکرد گرافین به عنوان سنسور هال به صورت پدیده شناختی بررسی شده است . همچنین صفحه هال در سنسور به صورت تعدادی لایه گرافین روی هم در نظر گرفته می‌شود به طوری که ضخامت این صفحه در سنسور تا۱۰ نانو متر نیز می‌تواند برسد .در این پژوهش کیفیت و ضخامت گرافین نیز مورد توجه است .

ابتدا یک نانو سنسور اثر هال در تکنولوژی CMOS با طول و عرض۲۰ نانومتر در ۲۰ نانومتر و ارتفاع گرافین۱نانومتر وضخامت لایه اکساید ۱۰نانومتر و ضخامت زیرلایه سیلیکن ۱ نانومتر طراحی می کنیم(شکل۱) .

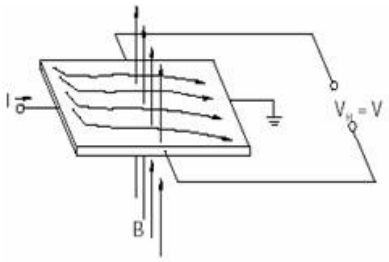


شکل۱: ساختار اولیه نانو سنسور اثر هال

ولتاژ تغذیه را ۰/٤ ولت و میدان مغناطیسی را ۰/۵ تسلا اعمال می‌کنیم .ولتاژ هال ۱۰/۳ میلی ولت بدست می‌آید. با مقایسه این ولتاژ با حالت مشابه در ساختار سیلیسین(ساختار دو بعدی سیلیکن که ویژگی‌هایی شبیه به گرافین دارد) ولتاژ هال ٤/٦ میلی ولت بدست می‌آید .حال با ایجاد تغییر در ساختار ، ولتاژ هال‌ها را بررسی می‌کنیم .

الف) تغییر طول الکترود هال: با افزایش طول الکترود هال ولتاژ هال کاهش می‌یابد و افزایش طول الکترود های آند و کاتد ولتاژ هال افزایش می‌یابد ، که این افزایش طول نباید الکترود های هال را دربر گیرد.

ب) تغییر مکان الکترود هال: با تغییر مکان الکترودهای هال ولتاژ هال نیز تغییر می‌کنید . با در نظر گرفتن طول ۵ نانومتری برای الکترود های هال ، اگر هردو الکترود را بالا ببریم ولتاژ هال ۲۲/۲ میلی ولت(در حالت مشابه سیلیسین ۳/۳ میلی ولت) و اگر الکترود های هال را پایین بیاوریم ولتاژ هال ٤۲/۱ میلی ولت(در حالت سیلیسین ٦/۳ میلی ولت) بدست می آید . پس تا به اینجا بهترین حالت هردو الکترود هال پایین می‌باشد که ولتاژ هال بدست آمده ٦/۵ برابر سیلیسین است . انحراف الکترون‌ها بر اثر میدان در شکل۲ نمایش داده شده است (۳) که این رفتار در گرافین که دوبعدی است ، دارای انحنای بیشتری می‌باشد. تغییر زیاد ولتاژها نیز از همین مسئله ناشی می‌شود .



شکل۲: انحراف الکترون ها به دلیل اعمال میدان مغناطیسی در سنسور اثر هال

با تغییر عرض همه الکتردها روی سطح گرافین ، ولتاژ هال افزایش می‌یابد . البته این افزایش به دلیل کوچک شدن سطح موثر گرافین می‌باشد که به جای آن می‌توان طول و عرض سنسور را کاهش داد.

ج) تغییر ضخامت لایه گرافین: با افزایش لایه گرافین از ۱ نانو متر به ۵ نانو متر، ولتاژ هال به ۳۰ میلی ولت کاهش یافت. البته این در حالی است که تا ۵ نانو متر را نیز گرافین می‌دانیم . انتخاب حداقل لایه گرافین به اندازه ۱ نانو متر به دلیل ابعاد اتم کربن می‌باشد . لذا این لایه را نمی‌توان از این مقدار کمتر درنظر

گرفت . بسیاری از مطالعات و طراحی‌هایی که در رابطه با گرافین صورت می‌گیرد ، ارتفاع این لایه را از ۱ نانو متر تا ۳ نانو متر در نظر می‌گیرند(۵و۶) .

د) تغییر طول و عرض سنسور: طول سنسور را به ۲۵ نانو متر افزایش می‌دهیم(الکترودهای آند و کاتد را نیز از ۱۰ به ۱۶ نانو متر) و ولتاژ هال به ۴۵/۳ میلی ولت افزایش می‌یابد . این افزایش از افزایش الکترود های آند و کاتد می‌باشد.

با افزایش عرض سنسور به ۲۵ نانو متر(الکترود های هال به ۱۰ نانو متر افزایش می‌یابد) ولتاژ هال به ۳۴ میلی ولت کاهش می‌یابد .

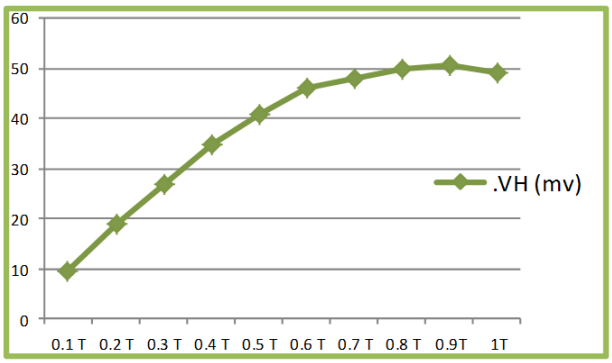
لذا بهترین ساختار برای این نانو سنسور مربعی می‌باشد بخصوص در کاربرد هایی که به عنوان یک پیکسل استفاده می‌شود.

ه) بررسی کیفیت گرافین : در این مقاله ما حداقل کیفیت را برای گرافین در نظر گرفته‌ایم. گاف انرژی را (۰) ، چگالی حالت سطحی در نوار هدایت(۲/۱ e۲۰)، چگالی حالت سطحی در نوار ظرفیت(۲/۶e۲۰)، ثابت دی الکتریک(۲۵)، موبیلیتی الکترون($\frac{cm^2}{Vs}$ ۱۰۰۰۰) ، موبیلیتی حفره($\frac{cm^2}{Vs}$ ۱۰۰۰۰)، چگالی حامل های ذاتی(۴/۵e۱۰) می باشد . اگر موبیلیتی الکترون و حفره را به $\frac{cm^2}{Vs}$ ۲۰۰۰۰ افزایش دهیم ولتاژ هال به ۵۰/۲ میلی ولت افزایش می‌یابد .

و)تغییر ضخامت لایه اکساید: معمولا این چنین نانو سنسور های اثر هالی بر روی یک لایه اکساید (SiO_2) که روی یک لایه سیلیکن می‌باشد ، سوار است و قطر لایه اکساید حدود ۳۰۰ نانو متر می باشد. لایه سیلیکن در مواجهه با میدان مغناطیسی بازگشت مغناطیسی خواهد داشت. این واکنش باعث کاهش ولتاژهال می‌شود . در این بررسی با کاهش لایه اکساید از ۱۰ نانو متر به ۱ نانو متر ولتاژ هال به ۳۵/۹ میلی ولت کاهش می‌یابد .

ز) بررسی خطی بودن : در این قسمت خطی بودن ولتاژ هال برای سنسور اثر هال در ولتاژ بایاس ثابت و با تغییر میدان مغناطیسی بررسی می‌شود.

به این منظور با ولتاژ ثابت ۰/۴ ولت میدان مغناطیسی از ۰/۱ تسلا تا ۱ تسلا تغییر می‌کند. در شکل۳ مشاهده می شود پاسخ سنسور تا میدان مغاطیسی حدود ۰/۷ تسلا خطی می‌باشد و تا ۱ تسلا به اشباع می‌رود . همانگونه که مشخص است ، نانو سنسور اثر هال برای اندازه گیری میدانهای مغناطیسی ضعیف طراحی می‌شود و هر چه ولتاژ بایاس افزایش یابد ، ولتاژ هال بزرگ تر بدست می‌آید . البته شاید برای کاربرد های دیجیتال این مسئله مهم نباشد .



شکل۳: بررسی خطی بودن نانو سنسور اثر هال

ح)ساختار بهینه : با بررسی‌هایی که صورت گرفت ، نانو سنسور اثر هال بهینه شده با مشخصات زیر بهترین پاسخ را دارد. طول و عرض آن ۲۰×۲۰ نانو متر و حداقل ارتفاع لایه اکساید آن ۱۰ نانو متر می‌باشد . هرچه لایه اکساید بیشتر شود ، ساختار ما نیز بزرگ تر و در شبیه سازی ها زمان بیشتری را می‌گیرد ؛ پس از این بیشتر تاثیری جز افزایش مدت زمان شبیه سازی نخواهد داشت. لایه گرافین ۱ نانو متر می‌باشد و لایه سیلیکن مسئله خیلی مهمی نیست و فقط به این دلیل در شبیه سازی‌ها لحاظ گردیده است که تکنولوژی CMOS همخوانی داشته باشد . الکترود های هال ۵ نانو متری هردو در پایین و الکترود های آند و کاتد هر دو در وسط و اندازه ۱۰ نانو متری می‌باشد. در انتها باید گفت کیفیت لایه گرافین بستگی به تکنولوژی ساخت دارد و هرچه کیفیت لایه ساخته شده بهتر باشد موبیلیتی حامل بیشتری به دست می‌آید که می تواند پاسخ بهتر سنسور را سبب شود.

در جدول۱ پاسخ شبیه سازی ها را در کنار هم بررسی میکنیم .

جدول۱: بررسی شبیه سازی‌ها

ساختار	ولتاژ هال در گرافین (mv)	ولتاژ هال در سیلیسین(شکل دوبعدی سیلیکن)(mv)

ساختار معمولی الکترودهای هال در وسط	۱۰/۳	٤/٦
افزایش طول الکترودهای هال	اندکی کاهش ولتاژ	اندکی کاهش ولتاژ
افزایش الکترود های آند و کاتد	اندکی افزایش ولتاژ	اندکی افزایش ولتاژ
بالا تر بردن الکترود های هال	۲۲/۲	۳/۳
پایین تر آوردن الکترود های هال	٤۲/۱	۳/٦
افزایش لایه گرافین به ۵ نانو متر	۳۰	
افزایش طول سنسور به ۲۵ نانو متر(آند و کاتد از ۱۰ به ۱٦ نانو متر)	٤۵/۳	
افزایش عرض سنسور به ۲۵ نانو متر(الکترود هال از ۵ به ۱۰ نانو متر)	۳٤	
دوبرابر کردن موبیلیتی الکترون و حفره در گرافین	۵۰/۲	
کاهش لایه اکساید به ۱ نانو متر	۳۵/۹	
ساختار بهینه	٤۲/۱	۳/٦

نتیجه گیری

در این تحقیق یک سنسور هال در ابعاد نانو متر و بر پایه گرافین بررسی و شبیه سازی شد. شبیه سازی‌ها نشان می‌دهد که سنسور مورد بررسی نسبت به سیلیکن پاسخ بهتری دارد. ابعاد نانومتری سنسور مورد بررسی آن را برای استفاده بصورت شبکه‌ای از سنسورها (برای اندازه گیری یا عکس برداری مغناطیسی) با تفکیک بالا مناسب می‌سازد. گذشته از آن ساختار این سنسور با فناوری CMOS سازگاری دارد و امکان مجتمع سازی در تراشه‌ها را میسر می‌نماید .

مرجع‌ها

[۱] m.Belete;*" Fabrication and Characterization of Tunneling Oxides on Graphene"*; Master's Thesis Submitted as a Partial Fulfillment for MSc Degree in Nanotechnology; Department of Integrated Devices and Circuits (IDC) The Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm, Sweden; (2013).
[۲] G.Bradley Armen; *"Hall Effect Experiment";* Department of Physics and Astronomy 401 Nielsen Physics Building The University of Tennessee Knoxville, Tennessee 37996-1200; (2007).
[۳] J.A.Brunton; *"TCAD ANALYSIS OF HEATING AND MAXIMUM CURRENT DENSITY IN CARBON NANOFIBER INTERCONNECTS";* THESIS; Naval Postgraduate School ,Monterey, CALIFORNIA, CA 93943–5000; (2011).
[۴] C.H.Lo.Chester;*"CHARACTERIZATION OF RESIDUAL STRESSES IN FERROUS COMPONENTS BY MAGNETIC ANISOTROPY MEASUREMENTS USING A HALL EFFECT SENSOR ARRAY PROBE";* AIP Conf. Proc. 1335. doi: 10.1063/1.3592077.1249,1255;(2011).
[5] M.C.Lemme and *et al. A "Graphene Field-Effect Device*"; IEEE Electron Device ;Letters vol. 28 no. 4;282-284;(2007)
[6]Li .D and Kaner R. B.*"Graphene-Based Materials"*; Material Science;vol. 320; 1170-1171;(2008)
[۷] p.Liu; et al; *"A CMOS Hall-Effect Sensor for the Characterization and Detection of Magnetic Nanoparticles for Biomedical Applications";* IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS; VOL, 47. NO, 10.3449,9451; (2011).
[۸] D.B.Pengra and et al. "The Hall Effect"; UW Courses Web Server;http://courses.washington.edu/;(2014).
[۹] f.Schwierz ; *"Graphene Transistors – A New Contender for Future Electronics"*;ieee.978. 978-1-4244-5798-4/10;(2010).
[۱۰] w.Sriratana and r.Murayama; *"Measurement of the Lubricant Properties Using Hall Effect Sensor: A Study on Contamination and Viscosity";* scientific research; 5. 386-393 ;(2013).
[۱۱] r.k.Tiwari and et al ; *"Graphene Review: A Future for Electronics Applications"; G.H.Raisoni College of Engineering, Nagpu;*(2007)
[۱۲] s.Vaziri; *"Fabrication and Characterization of Graphene Field Effect Transistors"*; Master Thesis; Integrated Devices and Circuits Royal Institute of Technology (KTH); (2011).
[۱۳] W.Wu and et al; *"Wafer-scale synthesis of graphene by chemical vapor deposition and its application in hydrogen sensing"*; Elsevier Sensors and Actuators B: Chemical ; doi:10.1016/j;snb. 2010.06.070; (2010).