

مدل مداری و ماتریس انتقال خطوط ارتباطی نانولوله‌های کربنی چندلایه ناهمسان باندل شده

سید سعید حاجی نصیری^{۱*}، محمد کاظم مروج فرشی^۲ و رحیم فائز^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۲۸ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۲۱	
واژگان کلیدی: نانولوله های کربنی چندلایه، ناهمسان باندل شده، مدل مداری، مدل ماتریس انتقال، پاسخ حوزه زمان، دیاگرام نایکوئیست.	با استفاده از مدل خط انتقال چندگانه، مدل مداری جامعی برای استفاده در خطوط ارتباطی نانولوله‌های کربنی چندلایه ناهمسان باندل شده پیشنهاد می‌شود. با بهره گیری از مدل مداری پیشنهادی، یک مدل الگوریتمی نیز جهت محاسبه ماتریس انتقال این نوع خطوط ارتباطی ارائه می‌گردد. در مدل مداری و به تبع آن مدل الگوریتمی ماتریس انتقال، اثرات سلفی و خازنی و همچنین تونل زنی بین لایه‌های کربنی لحاظ شده است. برای هر چه دقیقتر شدن نتایج محاسبات، پارامتر تعداد بلوکهای توزیع شده برای این نوع خط ارتباطی ارائه می‌شود. جامع و الگوریتمی بودن مدل فوق به این معناست که می‌توان از آن در کلیه ابعاد و تکنولوژیهای خطوط ارتباطی استفاده کرد. در ضمن هر گونه تغییر در پارامترهای فیزیکی نانولوله ها به سادگی در مدل مداری و روابط ماتریس انتقال وارد می‌شود و می‌توان اثرات ناشی از آنها را بررسی کرد. با استفاده از مدل مداری و مدل الگوریتمی ماتریس انتقال استخراج شده می‌توان انواع تحلیل‌های پایداری نظیر نایکوئیست، بد، نیکولز و پاسخهای حوزه زمان خطوط ارتباطی نانولوله‌های کربنی چندلایه ناهمسان باندل شده مورد استفاده در مدارات با مقیاس بزرگ را بررسی کرد. در این مقاله پس از معرفی مدل مداری پیشنهادی برای خطوط ارتباطی نانولوله‌های کربنی چندلایه ناهمسان باندل شده و استخراج مدل الگوریتمی ماتریس انتقال، به صورت موردی به استخراج نمودارهای خروجی این نوع خطوط ارتباطی در حوزه زمان و نایکوئیست می‌پردازیم. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش طول یا قطر نانولوله ها، تاخیر خطوط ارتباطی افزایش یافته ولی پایداری نسبی آنها بیشتر می‌شود.

۱-مقدمه

چگالی جریان نانولوله کربنی می‌تواند 10^{10} آمپر در هر سانتیمتر مربع باشد و هیچگونه مشکلی نظیر نقص یا افزایش دما یا پدیده مهاجرت الکترونی در چنین شرایطی اتفاق نمی‌افتد [۴ و ۵]. به لحاظ استحکام کششی نیز نانولوله‌های کربنی ۱۰۰ برابر قویتر از سیمهای مسی هستند [۶]. در ضمن ساخت خطوط ارتباطی نانولوله‌های کربنی چندلایه بسیار ساده تر از ساخت خطوط ارتباطی نانولوله‌های کربنی تک لایه است [۷ و ۸]. روشهای مختلفی نظیر روش تخلیه

نانولوله‌های کربنی به دلیل خواص ویژه الکترونیکی، مکانیکی، شیمیایی، نوری و گرمایی توجه بسیار زیادی را در سالهای اخیر به سوی خود جلب کرده اند [۱-۵]. نانولوله‌های کربنی چند لایه از لوله‌های کربنی هم مرکز تشکیل شده اند و قطر خارجی آنها از ۱ نانومتر تا ۵۰ نانومتر می‌رسد [۴ و ۵]. طول پیمایش آزاد حامل در این مواد در حد یک میکرومتر است، در حالیکه در مس این پارامتر ۴۰ نانومتر است [۴ و ۵].

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: s.nasiri@qiau.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی برق، پزشکی و مکاترونیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

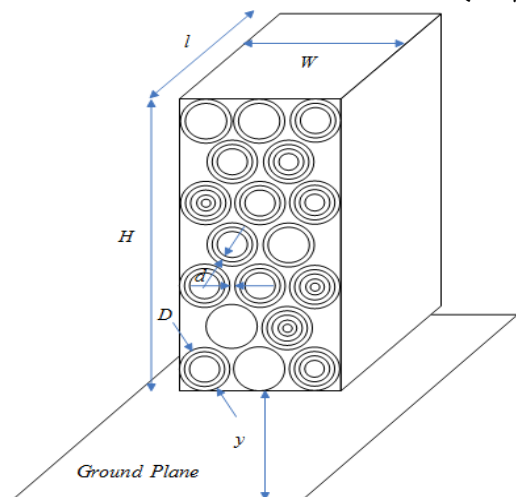
۲. استاد دانشکده فنی و مهندسی (دانشکده برق) دانشگاه تربیت مدرس

۳. دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف

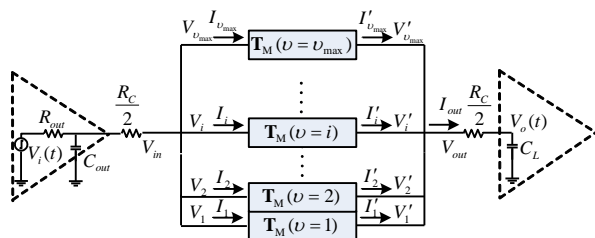
آرک، لایه نشانی بخار شیمیایی، بخار با لیزر، استفاده از الکتروکاتالیست و روشهای هیدروترمال برای سنتز نانولوله های کربنی استفاده می شود. به عنوان مثال آندریو و همکاران در مرجع ۹ با استفاده از لایه نشانی بخار شیمیایی به تولید نانولوله های کربنی چندلایه پرداختند [۹]. همچنین تانگ و همکاران در مرجع ۱۰ با استفاده از احتراق کاتالیستی پلی پروپیلن، نانولوله های کربنی چندلایه را سنتز کردند [۱۰]. چاودری و همکاران نیز در مرجع ۱۱ با استفاده از تخلیه آرک با هیدروکربن به عنوان منبع به سنتز نانولوله های کربنی چندلایه پرداختند. خلوص نانولوله های به دست آمده در این روش قابل ملاحظه است [۱۱]. اخیراً اوپومی و همکاران نیز در مرجع ۱۲ با استفاده از لایه نشانی گاز استیلن روی کاتالیست کبالت-آهن/کاولین با روش لایه نشانی گاز شیمیایی اقدام به تولید نانولوله های کربنی چندلایه کردند [۱۲]. از نانولوله های کربنی تک لایه و چندلایه می توان در اتصال بین قطعات مدارات مجتمع بهره گرفت [۱۷-۱۳]. قابلیت حمل جریان در خطوط ارتباطی نانولوله های کربنی چندلایه چندین برابر نانولوله های کربنی تک لایه است و هدایت گرمایی خطوط ارتباطی نانولوله های کربنی چندلایه در ابعاد یکسان ۱۰ برابر خطوط ارتباطی مسی است و مقدار آن به 50 W/m-K می رسد [۱۷-۱۵]. مدلسازی خطوط ارتباطی تک لایه بسیار ساده تر از مدلسازی خطوط ارتباطی نانولوله های کربنی چندلایه است و در نتیجه اکثر فعالیتهای تحقیقاتی شبیه سازی، در زمینه خطوط ارتباطی نانولوله های کربنی تک لایه است و بیشتر فعالیتهای تحقیقاتی ساخت، در زمینه خطوط ارتباطی نانولوله های کربنی چند لایه متمرکز شده است [۲۱-۱۸]. در واقع بدلیل پیچیدگی فیزیکی، مداری و محاسباتی بالا، تحقیقات کمی در زمینه مدلسازی خطوط ارتباطی نانولوله های کربنی چندلایه انجام شده است. برخی مدلهای مداری در سالهای اخیر برای خطوط ارتباطی نانولوله کربنی تک لایه و چندلایه پیشنهاد شده اند و مورد استفاده قرار گرفته اند [۲۵-۱۸]. مرجع ۱۸ مدل خط انتقال توزیع شده را برای خطوط ارتباطی نانولوله کربنی تک لایه و چندلایه ارائه داده است و رفتار تاخیری این نوع خطوط را بررسی کرده است. در این مقاله کلیه نانولوله های داخل باندل یکسان فرض شده اند. در مرجع ۱۹ به بررسی پایداری نسبی خطوط ارتباطی نانولوله کربنی تک لایه با استفاده از مدل تک خط پرداخته شده و اثر افزایش طول و قطر نانولوله ها روی

پایداری نسبی این نوع خطوط ارتباطی بررسی شده است. در مرجع ۲۰ مدل خط انتقال چندگانه برای خطوط ارتباطی نانولوله کربنی چندلایه ارائه داده شده است که نسبت به مدلهای مشابه کاملتر است. مرجع ۲۱ به بررسی پایداری نسبی خطوط ارتباطی نانولوله کربنی چندلایه پرداخته است و اثر تعداد دیواره ها و ابعاد نانولوله ها روی پایداری و پاسخ زمانی خطوط ارتباطی را بررسی کرده است. ایرادی که به مراجع ۲۰ و ۲۱ می توان گرفت، همسان گرفتن کلیه نانولوله ها در داخل باندل است. در عمل هیچگاه نمی توان نانولوله های همسان داخل باندل در نظر گرفت زیرا تعداد دیواره های نانولوله های چندلایه کنار هم در باندل می تواند متفاوت باشد. در مرجع ۲۲ هدایت الکتریکی نانولوله های کربنی تک لایه و چندلایه مورد استفاده در خطوط ارتباطی مدلسازی و تحلیل شده است. در این مقاله کوپلینگ بین لایه های کربنی در نظر گرفته نشده است. در مرجع ۲۳ کارایی و راندمان نانولوله های ناهمسان در خطوط ارتباطی مدارات با مقیاس بزرگ مورد بحث و تحلیل قرار گرفته است. مدل مداری مورد استفاده در این مقاله به صورت تک خط در نظر گرفته شده است و دقت بسیار پایینی دارد زیرا اثرات تونل زنی بین لایه های کربنی و همچنین اثرات سلفی و خازنی بین لایه ها در نظر گرفته نشده است. مرجع ۲۴ به ارائه مدلی ساده و سریع برای شبیه سازی خطوط ارتباطی نانولوله های کربنی چندلایه پرداخته است. این مدل پیشنهادی زمان شبیه سازی را سریعتر می کند ولی دقت محاسبات بدلیل حذف بسیاری از الزامات فیزیکی به شدت کاهش می یابد. مرجع ۲۵ به بررسی اثر نویز همشنوایی در خطوط ارتباطی نانولوله های کربنی چندلایه پرداخته است و از مدل مداری توزیع شده و از روش محاسباتی تفاضل محدود برای استخراج نتایج استفاده کرده است. مشکل عمده این تحقیق این است که روش تفاضل محدود حجم و زمان محاسباتی بسیار بالایی لازم دارد. همان گونه که ملاحظه شد در کنار مدل مداری دقیق، تحلیل پایداری و حوزه زمان مدارات مبتنی بر خطوط ارتباطی نانولوله کربنی در مدارات با مقیاس بزرگ اهمیت ویژه ای دارد. خطوط ارتباطی شاهراه مواصلاتی در سیستمهای حلقه باز و حلقه بسته هستند و ناپایداری در این خطوط، سیستمهای حلقه باز و حلقه بسته را به شدت دچار اختلال خواهد کرد. هر گونه نوسان و ناپایداری در این نوع خطوط ارتباطی و خطوط ارتباطی ساخته شده از مواد مشابه نظیر گرافن می تواند به

نیستند و ممکن است انواع مختلفی از تعداد لایه ها را در داخل باندل داشته باشیم (شکل ۱)، لذا مدل مداری شکل (۲-الف) برای حالتی که ترکیبی از نانولوله‌های کربنی چند لایه و یا عبارتی نانولوله‌های چندلایه ناهمسان داریم پیشنهاد شد.

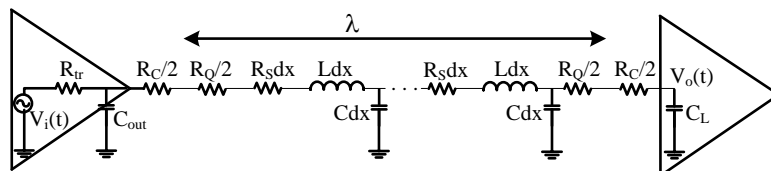


شکل ۱- نمایی از خط ارتباطی نانولوله‌های کربنی چندلایه ناهمسان باندل شده



شکل ۲- (الف) مدل مداری پیشنهادی برای خط ارتباطی نانولوله‌های کربنی چندلایه ناهمسان باندل شده

در شکل (۲-الف) برای هر T_M که بیانگر نانولوله‌های چندلایه همسان باندل شده با U دیواره است، مدل مداری شکل (۲-ج) را که در اصل مدل مداری نانولوله کربنی چندلایه همسان باندل شده است تا قبل از R_C در نظر می‌گیریم.



شکل ۲- (ب) مدل خط انتقال برای سیستمی متشکل از درایور - خط ارتباطی نانولوله کربنی تک لایه تک باندل - بار

بالا باعث تمایل حاملها به حرکت در سطح خط ارتباطی می‌گردد و این امر منجر به افزایش مقاومت خط ارتباطی می‌شود. در واقع عمق و سطح عبور موثر حامل در این

مدارات و المانهای بعدی که به آنها متصل هستند آسیب وارد کرده و یا در مدارات دیجیتال متصل بعدی نوعی سردرگمی منطقی به وجود آید [۱۹ و ۲۱ و ۲۶ و ۲۷]. در مرجع ۲۶ و ۲۷ پایداری نسبی و پاسخ حوزه زمان خطوط ارتباطی گرافنی بررسی شده است. نشان داده شده که با افزایش طول و پهنای نوار گرافنی پایداری و تاخیر سیستم افزایش می‌یابد. در مرجع ۲۸ پایداری نسبی خطوط گرافنی چندلایه با مدل خط انتقال چندگانه بررسی شده است و اثر تغییرات انرژی فرمی لایه‌های گرافن در روابط ماتریس انتقال لحاظ شده است. همچنین پایداری نسبی برای ادواتی نظیر ترانزیستورهای اثر میدان نانولوله کربنی و نانونوار گرافنی نیز بررسی شده است [۲۹ و ۳۰]. در این ترانزیستورها نیز اثر افزایش ابعاد ترانزیستور روی پایداری، پهنای باند و پاسخ زمانی ترانزیستور بررسی شده است.

در این مقاله پس از پیشنهاد مدل مداری برای خطوط ارتباطی نانولوله‌های کربنی چندلایه ناهمسان باندل شده، مدل ماتریس انتقال آن استخراج می‌شود. ناهمسان فرض کردن نانولوله‌های چندلایه نتایج به دست آمده را به واقعیت نزدیکتر می‌سازد. ابتدا با استفاده از مفهوم بلوکهای مداری توزیع شده تعداد مناسب بلوک مداری جهت همگرا شدن پاسخهای خروجی را استخراج می‌کنیم. با استفاده از تعداد مناسب بلوک بدست آمده و بهره‌گیری از ماتریس تابع انتقال استخراج شده به صورت موردی به بررسی اثر افزایش قطر و طول نانولوله‌ها روی پایداری نسبی و پاسخ حوزه زمان می‌پردازیم.

۲- مدل مداری خط ارتباطی نانولوله‌های کربنی

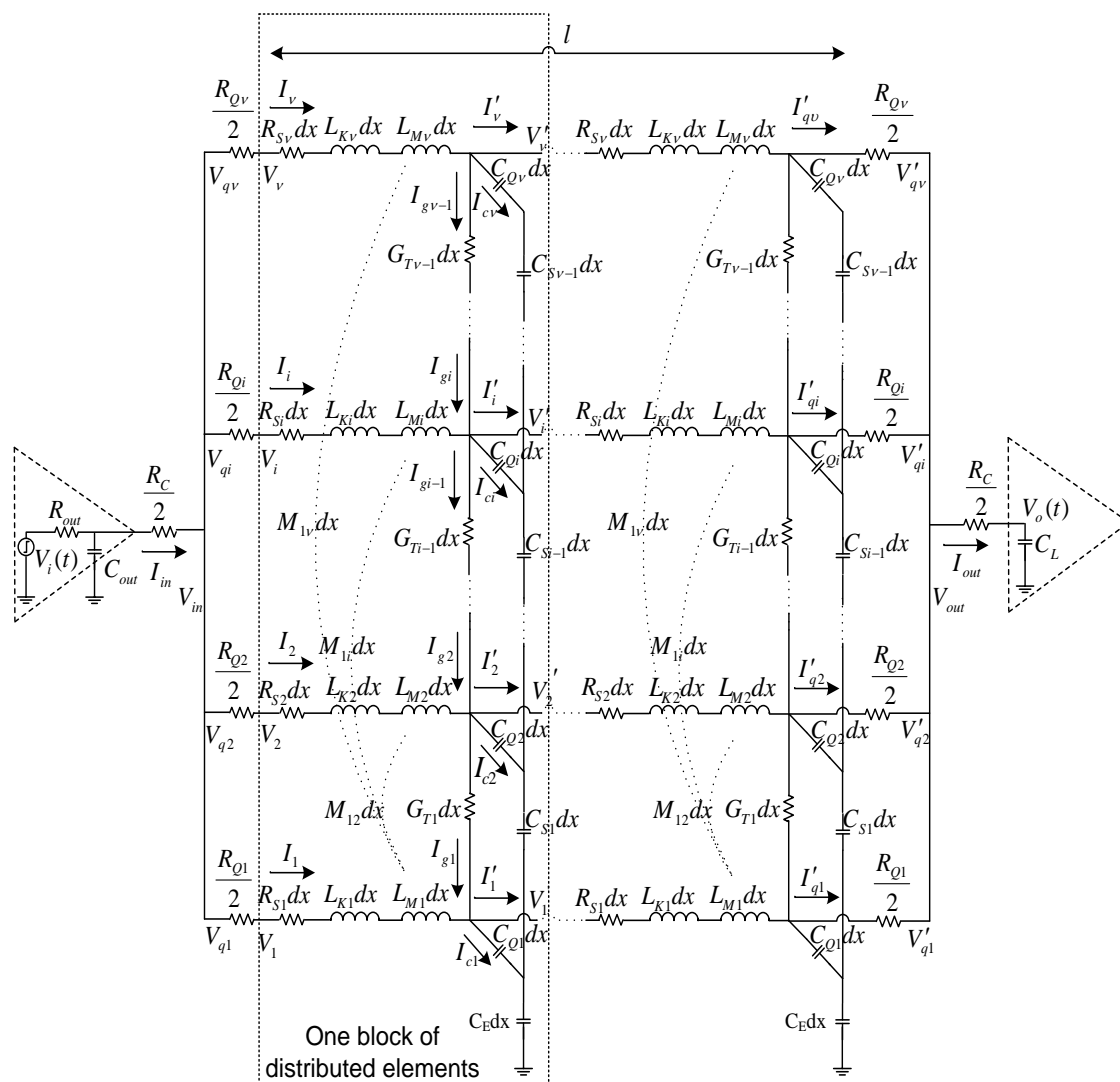
چندلایه ناهمسان باندل شده

با توجه به اینکه در حالت واقعی همه نانولوله‌های چندلایه موجود در یک باندل به لحاظ تعداد دیواره‌ها مانند هم

یکی از دلایل باندل کردن کاهش اثر پوستی در خط ارتباطی است. زمانی که فقط از یک کانال برای انتقال در خط ارتباطی استفاده می‌شود، اثر پوستی در فرکانسهای

خط ارتباطی استفاده می‌کنیم حتی با فرض وجود اثر پوستی در فرکانسهای بالا نیز چندین مسیر عبور جریان داریم و این امر باعث کاهش مقاومت خط ارتباطی می‌شود. به بیان ساده تر باندل کردن باعث افزایش پهنای باند فرکانسی خط ارتباطی مورد استفاده خواهد شد.

حالت کاهش می‌یابد و در نتیجه از کل ظرفیت خط ارتباطی استفاده نمی‌شود. به وسیله باندل کردن می‌توان مسیرهای موازی برای انتقال پدید آورد و سطح موثر عبور در خط ارتباطی را حتی در فرکانسهای بالا به میزان زیادی افزایش داد. در واقع هنگامی که چند کانال باندل شده در



شکل ۲- (ج) مدل خط انتقال برای سیستمی متشکل از درایور - خط ارتباطی نانولوله کربنی چندلایه همسان باندل شده - بار. قسمتی که در داخل خط چین قرار گرفته یک بلوک از عناصر توزیع شده را نشان می‌دهد [۲۱]

محاسبات می‌بایست میزان توزیع شدگی المانهای مداری را بیشتر در نظر گرفت. در این مدل L برآیند سلف جنبشی و سلف مغناطیسی و C برآیند خازن کوانتومی و خازن الکتروستاتیک است.

در مدار شکل (۲-ج) که مدل خط انتقال برای سیستمی متشکل از درایور - خط ارتباطی مبتنی بر نانولوله‌های کربنی چندلایه همسان باندل شده - بار است، R_C مقاومت اتصال بین نانولوله و فلز است و حداکثر مقدار آن ۱۰٪

در شکل (۲-ب) مدل خط انتقال برای سیستمی متشکل از درایور - خط ارتباطی نانولوله کربنی تک لایه تک باندل - بار ترسیم شده است. خاصیت توزیع شده خط ارتباطی در این مدل به صورت نقطه چین نشان داده شده است. پارامتر dx که در هر المان ضرب شده نیز خاصیت توزیع شدگی المانهای مداری را توصیف می‌کند. طول خط ارتباطی در این شکل با حرف l مشخص شده است. هر چقدر طول خط ارتباطی بیشتر باشد، برای دقیقتر شدن

$$L_K = \frac{h}{2e^2 v_F} / (N_{ch} N) \quad (۶)$$

در واقع القاگر جنبشی به نوعی بیانگر میزان انرژی جنبشی کوانتومی ذخیره شده در نانولوله کربنی هنگام عبور جریان از آن است [۲۵].

در محاسبه L_K نیز مانند مقاومت‌های کوانتومی و R_S ، مقدار اندوکتانس بر تعداد کل کانالها تقسیم می‌شود.

در واقع با تغییر ولتاژ، حاملها در سرتاسر نانولوله جابجا می‌شوند و از آنجایی که در برخی ترازها ممکن است حاملی با مشخصات یکسان با حامل جابجا شده وجود داشته باشد، از اینرو حامل جابجا شده مجبور به حرکت به سمت تراز بالاتر می‌شود زیرا ترازهای پایینتر پر هستند. با توجه به اینکه در ابعاد نانومتر فاصله ترازهای انرژی از هم نسبتاً قابل توجه می‌باشد یا به عبارتی باندهای انرژی پیوستار نیستند، بنابراین حامل دارای انرژی بیشتری خواهد شد که این انرژی به صورت ذخیره شده در سلف جنبشی تعریف می‌شود. به عبارت دیگر در ساختارهایی که در ابعاد بالاتر از نانومتر قرار دارند، حامل انرژی جنبشی خود را بدلیل پراکندگی‌ها و برخوردهای متوالی از دست خواهد داد و به آرامش خواهد رسید. لکن در ابعاد نانومتری مسافت طی شده توسط حامل در حدی نیست که منجر به از بین رفتن انرژی جنبشی آن شود و بنابراین این انرژی جنبشی با المانی بنام سلف جنبشی مدل می‌گردد. مقدار تقریبی این سلف در رابطه زیر محاسبه شده است:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \times \frac{h}{2e^2 v_F} \times I^2$$

$$\Rightarrow \frac{h}{2e^2 v_F} = L_k \approx 16 \text{ nH} / \mu\text{m} \quad (۷)$$

L_M اندوکتانس مغناطیسی نانولوله کربنی در واحد طول است و به شکل هندسی آن بستگی دارد [۲۱]. این مقدار برای نانولوله کربنی برابر است با:

$$L_{Mi} = \frac{\mu}{2\pi N} \cosh^{-1}(2d/D) \approx \frac{\mu}{2\pi N} \ln(4d/D) \quad (۸)$$

است که در اینجا D قطر نانولوله کربنی است و μ نیز نفوذپذیری مغناطیسی^۲ است.

C_Q خازن کوانتومی ناشی از هر کانال بر واحد طول است و مقدار آن برای نانولوله کربنی برابر با رابطه زیر است:

مقاومت ذاتی^۱ نانولوله در نظر گرفته شده است [۲۱].

R_Q مقاومت کوانتومی هر نانولوله کربنی است و مقدار آن برای هر خط ارتباطی نانولوله‌های کربنی باندل شده برابر است با:

$$R_Q = \left(\frac{h}{2e^2} \right) / (N_{ch} v) = \left(\frac{h}{2e^2} \right) / (N_{ch} N) \quad (۱)$$

که h ثابت پلانک و e بار الکترون است. N_{ch} نیز تعداد کانالهای هدایت برای هر لوله است. همچنین N تعداد نانولوله‌های موجود در باندل است. کل کانالهای در دسترس برای حاملها برابر $N_{ch} N$ است و از آنجایی که مقاومت کوانتومی هر کانال برابر $h/2e^2$ است بنابراین این مقدار در کل تقسیم بر تعداد کل کانالها می‌شود [۲۱].

$$N = N_W \cdot N_H - \|N_H/2\| \quad (۲)$$

$$N_W = \|(W-D)/(D+d)\| + 1 \quad (۳)$$

$$N_H = \|(H-D)/\sqrt{3/2}(D+d)\| + 1 \quad (۴)$$

N_W و N_H به ترتیب تعداد لوله‌ها در جهت ارتفاع و پهناي باندل هستند. W و H پهنا و ارتفاع باندل هستند و D نیز قطر خارجی نانولوله است. همچنین d فاصله خط ارتباطی از زمین است.

R_S مقاومت اهمی ناشی از انواع مختلف پراکندگی‌ها و برخوردها نظیر بی‌نظمی‌های موجود در شبکه، ناخالصی‌های موجود در زیرلایه، برخورد حاملها با یکدیگر، برخورد حاملها با ناخالصیهای یونی و پراکندگی ناشی از زبری لبه در واحد طول است. این مقاومت در طولهای بیشتر از مسافت آزاد میانگین یا ($\lambda > \lambda_{GNR}$) خودنمایی می‌کند و مقدار آن در واحد طول برابر است با:

$$R_S = \frac{R_Q}{\lambda_{CNT}} = \left(\frac{h}{2e^2} \right) \frac{1}{\lambda_{CNT}} / (N_{ch} N) \quad (۵)$$

مطلب مذکور در خصوص تعداد کانالهای هدایت برای حاملها که در محاسبه R_Q بیان شد در محاسبه R_S نیز لحاظ می‌گردد. در واقع با افزایش تعداد کانالها، مقاومت ناشی از برخوردها نیز بر تعداد کل کانالها تقسیم می‌شود. عبارتی به تعداد $N_{ch} N$ مقاومت R_S موازی داریم [۲۱].

L_K اندوکتانس جنبشی نانولوله‌ها در واحد طول است و مقدار آن در واحد طول برابر با رابطه زیر است:

² Permeability

1-Intrinsic resistance

M_{ii} کوپلینگ مغناطیسی بین لایه‌های نانولوله است و از رابطه زیر استخراج می‌شود:

$$\frac{\mu}{2\pi N} (\ln(4l/D_i)) - 1 + (D_i + D_{i'})/\pi l, i > i' \quad (14)$$

همچنین رسانایی الکتریکی بین لایه‌های مجاور ناشی از تونل زنی است و به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$G_{Ti} = \sigma \pi D_i N \quad (15)$$

در ضمن C_{Si} خازن الکترواستاتیک بین دو لایه است و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_{Si} = 2\pi\epsilon_0 N / \ln(D_i / D_{i+1})$$

$$for i \leq v-1 and C_{Sv} = 0 \quad (16)$$

R_L ، R_{out} و C_{out} نیز مقاومت‌های خروجی و مقاومت و خازن دراپور هستند و منطبق بر تکنولوژی ITRS در نظر گرفته شدند [۳۱]. ذکر این نکته ضروریست که اثر کلیه نقص‌های موجود در نانولوله‌ها در مقاومت پراکندگی R_s لحاظ شده است. بعبارت ساده تر وجود نقص باعث کاهش طول پیمایش آزاد و در نتیجه افزایش مقاومت پراکندگی می‌شود. همچنین وجود نقص سرعت فرمی را تغییر می‌دهد و تغییر سرعت فرمی باعث تغییر سلف جنبشی L_K و همچنین خازن کوانتومی C_Q می‌شود. همچنین با توجه به متالیک بودن خط ارتباطی تراز فرمی روی صفر در نظر گرفته شد. در ضمن طبق مرجع ۲۱ سرعت فرمی m/s 8×10^5 و طول پیمایش آزاد الکترون نیز یک میکرومتر در نظر گرفته شد.

۳- استخراج تابع انتقال خط ارتباطی نانولوله‌های کربنی چندلایه ناهمسان باندل شده

در ابتدا با استفاده از شکل (۲-ج) برای نانولوله‌های باندل شده با تعداد U لایه می‌توان رابطه ای برای ولتاژها و جریانهای ورودی و خروجی به شکل زیر تعریف کرد:

$$\begin{bmatrix} V_{qv} \\ M \\ V_{qi} \\ M \\ V_{q1} \\ I_v \\ M \\ I_i \\ M \\ I_1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{MWCNT(v)} \begin{bmatrix} V'_{qv} \\ M \\ V'_{qi} \\ M \\ V'_{q1} \\ I'_{qv} \\ M \\ I'_{qi} \\ M \\ I'_{q1} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$C_Q = \frac{2e^2}{h\nu_F} (N_{ch} N) \quad (9)$$

در واقع خازن کوانتومی به نوعی بیانگر میزان انرژی الکتروستاتیک کوانتومی ذخیره شده در نانولوله کربنی هنگام عبور جریان از آن است [۲۱]. از آنجایی که تمامی $N_{ch}N$ کانال با هم موازی هستند لذا مقدار کل خازن کوانتومی ناشی از موازی شدن این کانالها در این مقدار ضرب می‌شود. برای توضیح بیشتر راجع به خازن کوانتومی می‌بایست به این نکته دقت کرد که هنگام تزریق بار تراز فرمی به سمت بالا حرکت می‌کند و حاملهایی که جدیداً اضافه شده اند می‌بایست در زیر تراز فرمی قرار بگیرند. در واقع تراز یا انرژی فرمی همان پتانسیل الکتروشیمیایی ماده است. هنگام تزریق الکترون‌ها تراز فرمی از سطح صفر جابجا می‌شود و به سمت تراز هدایت حرکت می‌کند. لکن در این مقاله، نانولوله خط ارتباطی دارای خاصیت متالیک است و تراز فرمی در آن صفر قرار داده شده است. از آنجایی که این ترازها نسبت به ترازهای قبلی (قبل از تزریق بار) در سطح بالاتر انرژی قرار دارند (بدلیل افزایش انرژی تراز فرمی)، لذا این حاملها دارای انرژی بیشتری می‌شوند که این انرژی افزایش یافته توسط خازن کوانتومی مدل می‌شود. مقدار تقریبی خازن کوانتومی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta Q = e \int dE D(E) \left\{ \begin{matrix} f(E - E_F) \\ -f[E - (E_F + e\delta V)] \end{matrix} \right\} = e^2 D(E\delta V) \quad (10)$$

$$C_Q = \frac{\delta Q}{\delta V} = \frac{2e^2}{h\nu_F} \approx 97 \text{ aF} / \mu m \quad (11)$$

C_E خازن الکتروستاتیک نانولوله کربنی در واحد طول است و به شکل هندسی آن بستگی دارد.

این مقدار برای نانولوله کربنی برابر است با:

$$C_E = \frac{2\pi\epsilon}{\cosh^{-1} \frac{2d}{D}} \approx \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{d}{D}} \quad (12)$$

است که در اینجا D قطر نانولوله کربنی است و ϵ نیز نفوذپذیری الکتریکی^۱ است.

بطور دقیق در حالت باندل شده نانولوله‌ها با توجه به مرجع ۲۱ بایستی از رابطه زیر استفاده کرد.

$$C_E = 2(3N_H + 4)\pi\epsilon \{\ln(W/D_i)\}^{-1} / 5$$

$$+ (N_W - 2)\pi\epsilon \{\ln(2W/D_1)\}^{-1} \quad (13)$$

¹ Permittivity

که برای آن عناصر ماتریس \mathbf{T}_M بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} (\mathbf{T}'^{-1}_M)_{11} &= \sum_{i'=1}^{v_{\max}} (\mathbf{P}'^{-1})_{i'i'} \\ (\mathbf{T}'^{-1}_M)_{12} &= (\mathbf{P}'^{-1})_{1(v_{\max}+1)} \\ (\mathbf{T}'^{-1}_M)_{21} &= \sum_{i=2}^{v_{\max}+1} \sum_{i'=1}^{v_{\max}} (\mathbf{P}'^{-1})_{i'i'} \\ (\mathbf{T}'^{-1}_M)_{22} &= \sum_{i=2}^{v_{\max}+1} (\mathbf{P}'^{-1})_{i(v_{\max}+1)} \end{aligned} \quad (24)$$

عناصر ماتریس \mathbf{P}' نیز بصورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$\mathbf{P}'_{ii'} = \begin{cases} \sum_{i'=1}^{v_{\max}} (\mathbf{T}_{Mix})_{ii'} & i \leq v_{\max} \text{ and } i' = 1 \\ \sum_{i=v+1}^{2v_{\max}} \sum_{i'=1}^{v_{\max}} (\mathbf{T}_{Mix})_{ii'} & i = v_{\max} + 1 \text{ and } i' = 1 \\ \sum_{i=v_{\max}+1}^{2v_{\max}} (\mathbf{T}_{Mix})_{i(i'+1)} & i = v_{\max} + 1 \text{ and } i' > 1 \\ (\mathbf{T}_{Mix})_{i(i'+v_{\max}-1)} & i < v_{\max} + 1 \text{ and } i' > 1 \end{cases} \quad (25)$$

با افزودن کنتاکتها به دو طرف خط ارتباطی داریم:

$$\mathbf{T}_{CC} = \mathbf{R}_C \cdot \mathbf{T}'_M \cdot \mathbf{R}_C \quad (26)$$

که در آن

$$\mathbf{R}_C = \begin{bmatrix} 1 & R_C/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

با اضافه نمودن درایور به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\mathbf{T}_T = \mathbf{R}_{out} \cdot \mathbf{C}_{out} \cdot \mathbf{T}_{CC} \quad (28)$$

که در آن

$$\mathbf{R}_{out} = \begin{bmatrix} 1 & R_{out} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\mathbf{C}_{out} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ sC_{out} & 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

با استفاده از ماتریس \mathbf{T}_T و رابطه

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{(\mathbf{T}_T)_{11} + sC_L(\mathbf{T}_T)_{12}} \quad (31)$$

می‌توان تابع انتقال کلی مدل مداری موجود در شکل ۲-۲ الف) را استخراج کرد. جهت بررسی دقیقتر، جزئیات بیشتر محاسبات ماتریسی فوق در پیوست ۱ درج شده است.

۴- نتایج شبیه سازی

با استفاده از مدل ماتریسی استخراج شده ابتدا مفهوم بلوک توزیع شده مداری و تعداد بلوک انتخابی مناسب جهت

و در ادامه درایه‌های ماتریس $\mathbf{T}_{M(v)2 \times 2}$ (ماتریس ساده شده

$\mathbf{T}_{MWCNT(v)}$) بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} (\mathbf{T}'^{-1}_{M(v)})_{11} &= \sum_{i'=1}^v (\mathbf{P}'^{-1}_{(v)})_{i'i'} \\ (\mathbf{T}'^{-1}_{M(v)})_{12} &= (\mathbf{P}'^{-1}_{(v)})_{1(v+1)} \\ (\mathbf{T}'^{-1}_{M(v)})_{21} &= \sum_{i=2}^{v+1} \sum_{i'=1}^v (\mathbf{P}'^{-1}_{(v)})_{i'i'} \\ (\mathbf{T}'^{-1}_{M(v)})_{22} &= \sum_{i=2}^{v+1} (\mathbf{P}'^{-1}_{(v)})_{i(v+1)} \end{aligned} \quad (18)$$

در واقع ماتریس $\mathbf{T}_{M(v)2 \times 2}$ با قرار دادن روابط ۱۹ و ۲۰ در رابطه ۱۷ بدست می‌آید.

$$I_{in} = \sum_{i=1}^v I_i \quad (19)$$

و

$$I_{out} = \sum_{i=1}^v I'_{qi} \quad (20)$$

و در رابطه ۱۸ درایه‌های ماتریس \mathbf{P} بصورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\mathbf{P}_{ii'(v)} = \begin{cases} \sum_{i'=1}^v (\mathbf{T}_{MWCNT(v)})_{ii'} & i \leq v \text{ and } i' = 1 \\ \sum_{i=v+1}^{2v} \sum_{i'=1}^v (\mathbf{T}_{MWCNT(v)})_{ii'} & i = v + 1 \text{ and } i' = 1 \\ \sum_{i=v+1}^{2v} (\mathbf{T}_{MWCNT(v)})_{i(i'+1)} & i = v + 1 \text{ and } i' > 1 \\ (\mathbf{T}_{MWCNT(v)})_{i(i'+v-1)} & i < v + 1 \text{ and } i' > 1 \end{cases} \quad (21)$$

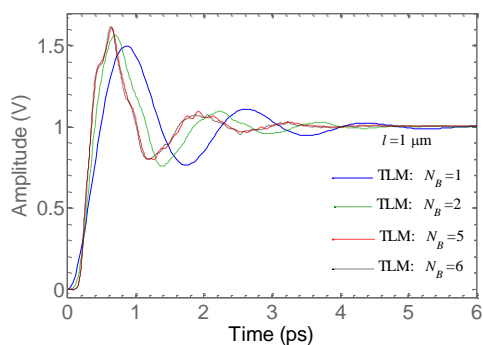
در ادامه با توجه به شکل ۲ الف) رابطه زیر را تعریف می‌کنیم:

$$\begin{bmatrix} V_{v_{\max}} \\ M \\ V_i \\ M \\ V_1 \\ I_{v_{\max}} \\ M \\ I_i \\ M \\ I_1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{Mix} \begin{bmatrix} V'_{v_{\max}} \\ M \\ V'_i \\ M \\ V'_1 \\ I'_{v_{\max}} \\ M \\ I'_i \\ M \\ I'_1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

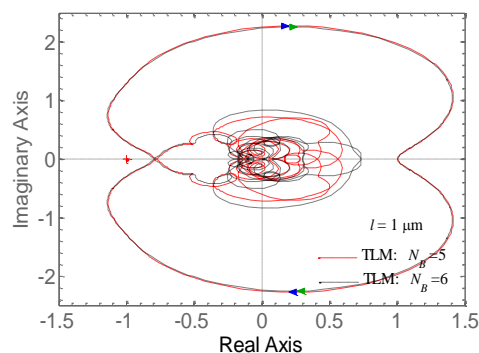
ماتریس انتقال برای خط ارتباطی قبل از اتصال کنتاکتها بصورت زیر در می‌آید:

$$\begin{bmatrix} V_{in} \\ I_{in} \end{bmatrix} = \mathbf{T}'_M \begin{bmatrix} V_{out} \\ I_{out} \end{bmatrix} \quad (23)$$

پایدارتر خواهد بود و عبارتی پیک بالازدگی پاسخ پله آن کمتر می‌شود. همچنین کاهش نمودار در جهت محور موهومی (یا به نوعی افزایش حد فاز) نیز به معنی کاهش زمان میرایی برای پیک پاسخ پله است و کاهش زمان میرایی نیز به نوبه خود نوعی افزایش پایداری نسبی را به همراه خواهد داشت [۳۲].



(الف)



(ب)

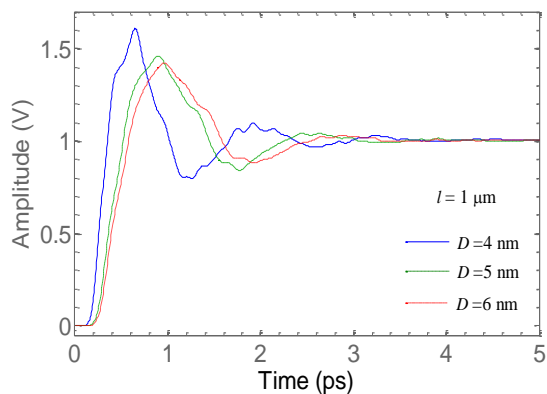
شکل ۳- اثر افزایش تعداد بلوک مداری توزیع شده انتخابی در محدوده ۱ میکرومتر (به روی الف) پاسخ پله و (ب) پاسخ نایکوئیست

بایستی به این نکته توجه کرد که در طولهای بالاتر می‌بایست از تعداد بلوک مداری بیشتری استفاده شود. بعنوان مثال در شکل ۴ (الف) که عیناً شرایط (۳-الف) را دارد و تنها تفاوت طول ۱۰ میکرومتر خط ارتباطی می‌باشد، اختلاف جواب بین تعداد بلوک ۱ و ۲ در حد ۲۹٪ و اختلاف جواب بین تعداد بلوک ۵ و ۶ در حد ۲۶٪ است. میزان تاخیر در طول ۱۰ میکرومتر و برای تعداد بلوک ۱ در نصف ارتفاع پیک پاسخ پله برابر است با ۴٫۲۳ پیکوثانیه، برای تعداد بلوک ۲ در نصف ارتفاع پیک پاسخ پله برابر است با ۳٫۶۳ پیکوثانیه، برای تعداد بلوک ۵ در نصف ارتفاع پیک پاسخ پله برابر است با ۳٫۱۴ پیکوثانیه و برای تعداد بلوک ۶ در نصف ارتفاع پیک پاسخ پله برابر است با ۳٫۱۰ پیکوثانیه.

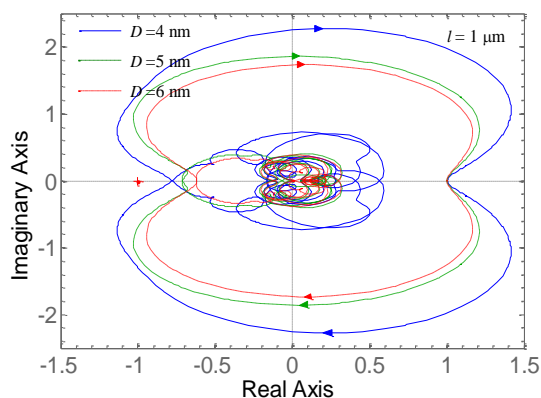
دستیابی به دقیقترین جواب را نشان می‌دهیم. سپس به بررسی اثر افزایش طول به روی پایداری خط ارتباطی نانولوله‌های کربنی چندلایه ناهمسان باندل شده می‌پردازیم. همچنین اثر افزایش قطر خارجی هر یک از نانولوله‌های موجود در باندل را بررسی می‌کنیم. در شبیه‌سازی این قسمت تکنولوژی مورد بررسی ۲۲ نانومتر بوده و ارتفاع خط ارتباطی نیز ۴۴ نانومتر در نظر گرفته شد. تمامی پارامترهای موجود در شبیه‌سازیهای این قسمت بر اساس استاندارد ITRS می‌باشد [۳۱]. بصورت موردی داخل باندل ترکیبی از نانولوله‌های یک تا پنج لایه در نظر گرفته شد (۱۸٪ تک دیواره، ۱۶٪ دو دیواره، ۱۶٪ سه دیواره، ۲۳٪ چهار دیواره و ۲۷٪ پنج دیواره). در ابتدا قطر خارجی همه لوله‌ها ۴ نانومتر در نظر گرفته شد. تعداد بلوکهای مداری توزیع شده نیز در شرایط مختلف از یک تا شش در نظر گرفته شد که در ادامه به ذکر جزئیات آن می‌پردازیم.

در شکل (۳-الف) به بررسی اثر افزایش تعداد بلوکهای مداری توزیع شده در پاسخ پله و انتخاب تعداد بلوک مناسب با کمترین خطا برای شبیه‌سازی در محدوده ۱ میکرومتر پرداخته ایم. همانگونه که در شکل (۳-الف) نشان داده شده است اختلاف نتیجه برای تعداد بلوک ۱ و ۲ در حد ۱۶٪ است و اختلاف بین تعداد بلوک ۵ و ۶ در حد ۱۲٪ است. میزان تاخیر در طول ۱ میکرومتر و برای تعداد بلوک ۱ در نصف ارتفاع پیک پاسخ پله که برابر با ۱/۳۱۱ ولت است برابر است با ۰/۳۸ پیکوثانیه، برای تعداد بلوک ۲ در نصف ارتفاع پیک پاسخ پله که برابر با ۱/۶۲ ولت است برابر است با ۰/۳۳ پیکوثانیه، برای تعداد بلوک ۵ در نصف ارتفاع پیک پاسخ پله که برابر با ۱/۶۲ ولت است برابر است با ۰/۳۱۳ پیکوثانیه و برای تعداد بلوک ۶ در نصف ارتفاع پیک پاسخ پله که برابر با ۱/۶۲ ولت است برابر است با ۰/۳۱۱ پیکوثانیه. در شکل (۳-ب) نمودار نایکوئیست متناظر شکل (۳-الف) نمایش داده شده است. اکثر سیستم‌های عملی حلقه- باز پایدار هستند و معیار پایداری نایکوئیست برای این دسته از سیستم‌ها بدین صورت بیان می‌شود که یک سیستم حلقه- بسته با سیستم حلقه باز پایدار، پایدار خواهد بود اگر و فقط اگر نمودار نایکوئیست حلقه- باز دورانی حول نقطه (-۱) نداشته باشد. با توجه به این مورد در حالت کلی هرچه نمودار نایکوئیست نسبت به نقطه (-۱) فاصله بیشتری داشته باشد سیستم مورد نظر

در شکل (۵-الف) پیک پاسخ پله به ازای $D = 4, 5, 6$ nm بترتیب برابر است با $1/60$ و $1/46$ و $1/41$ ولت. همچنین تاخیر در نصف پیک نوسان برای $D = 4, 5, 6$ nm به ترتیب برابر است با $0/31$ و $0/41$ و $0/46$ پیکوثانیه. همچنین نسبت پیک نوسان به مقدار حالت پایدار در قطر ۴ نانومتر و طول ۱ میکرومتر $1/62$ و برای قطر ۴ نانومتر و طول ۱۰ میکرومتر $1/05$ است. در شکل (۵-ب) نمودار نایکوئیست متناظر شکل (۵-الف) نشان داده شده است.



(الف)

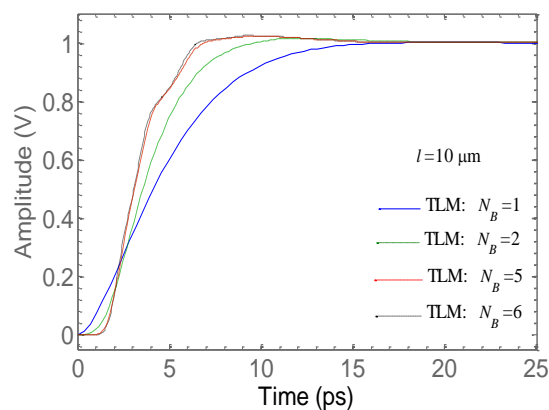


(ب)

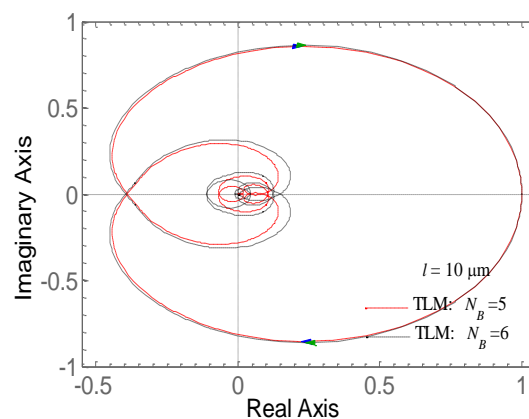
شکل ۵- اثر افزایش قطر در خطوط ارتباطی مبتنی بر نانولوله‌های کربنی چندلایه ناهمسان باندل شده (الف) پاسخ پله و (ب) پاسخ نایکوئیست

در واقع با افزایش قطر نانولوله‌های کربنی نمودارهای نایکوئیست از نقطه بحرانی (۰ و -۱) دورتر می‌شوند و پیک پاسخ پله نیز با افزایش قطر کاهش می‌یابد. با افزایش قطر نانولوله‌ها در ابعاد ثابت خط ارتباطی، تعداد کل لوله‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه رسانایی کل کم می‌شود و در نتیجه پایداری بیشتر و همچنین تاخیر بالاتری خواهیم داشت. در این حالت نیز رفتاری مشابه نانولوله‌های کربنی چندلایه همسان باندل شده مشاهده می‌شود [۲۱].

نکته دیگری که در مقایسه دو شکل (۳) و شکل (۴) وجود دارد افزایش پایداری در ازای افزایش طول است که پاسخ نایکوئیست و نیز پاسخ پله موید این امر هستند. در واقع با افزایش طول نمودارهای نایکوئیست از نقطه بحرانی (۰ و -۱) دورتر می‌شوند و در نتیجه سیستم پایدارتر می‌شود [۳۲] و پیک پاسخ پله نیز با افزایش طول کاهش می‌یابد. دلیل این امر افزایش امپدانس خط با افزایش طول است.



(الف)



(ب)

شکل ۴- اثر افزایش تعداد بلوک انتخابی در محدوده ۱۰ میکرومتر بروی (الف) پاسخ پله و (ب) پاسخ نایکوئیست

در شکل (۵) به بررسی اثر افزایش قطر خارجی نانولوله‌های کربنی چندلایه ناهمسان باندل شده پرداخته ایم. طول خط ارتباطی ۱ میکرومتر در نظر گرفته شد و سایر شرایط فیزیکی غیر از قطر خارجی نانولوله‌ها مانند شکل (۳) است. همچنین تعداد بلوکها در اینجا با پذیرش خطایی به اندازه $1/2$ برابر با شش در نظر گرفته شد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش قطر بیرونی نانولوله‌ها پایداری نسبی افزایش می‌یابد و رفتاری مشابه نانولوله‌های کربنی چندلایه همسان باندل شده داریم [۲۱].

۵- نتیجه گیری

همانگونه که ذکر شد بررسی رفتار حوزه زمان و پایداری نسبی از مهمترین مواردی است که می‌بایست در کنار انواع مختلف پایداری نظیر پایداری ساختار اتمی، پایداری حرارت و یا پایداری در برابر نویز در قطعات الکترونیکی مورد بررسی قرار گیرد. اگر نوسانات ولتاژ خروجی از یک قطعه الکترونیکی اگر از حد معمول بالاتر باشد می‌تواند به قطعه الکترونیکی بعدی که به آن متصل است آسیب وارد کند و یا در مدارات دیجیتال باعث نوعی سردرگمی منطقی شود. این مساله برای خطوط ارتباطی و بویژه خطوط ارتباطی محلی که در هر ساختار الکترونیکی به وفور یافت می‌شود اهمیت بسیار بالاتری دارد.

پیوست ۱: جزئیات محاسبات ماتریسی

با توجه به مدل مداری موجود در شکل (۲-ج) جریان ورودی را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$I_i = I_{ci} + I'_i - I_{gi} + I_{g(i-1)} \quad (\text{پ-۱})$$

که در آن

$$I_{gi} = \begin{cases} G_{Ti}(V'_{i+1} - V_i) \\ 0 \end{cases} \quad \text{for } i = v \quad (\text{پ-۲})$$

توجه داشته باشیم که برای $i=1, I_{g0}=0$ است.

ولتاژ ورودی را نیز می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$V_i = Z_i I_i + V'_i + s \sum_{i' \neq i=1}^v M_{ii'} I_{i'} \quad (\text{پ-۳})$$

که در آن $s=j\omega$ و همچنین

$$Z_i = R_{Si} + s(L_{Ki} + L_{Mi}) \quad (\text{پ-۴})$$

توجه داشته باشیم که ضریب dx برای سادگی حذف شده است. با مجزا نمودن ورودیها و خروجیها خواهیم داشت:

$$\begin{pmatrix} V_v \\ M \\ V_i \\ M \\ V_1 \\ I_v \\ M \\ I_i \\ M \\ I_1 \end{pmatrix} = \mathbf{T} \times \begin{pmatrix} V'_v \\ M \\ V'_i \\ M \\ V'_1 \\ I'_v \\ M \\ I'_i \\ M \\ I'_1 \end{pmatrix} \quad (\text{پ-۵})$$

که در آن \mathbf{T} یک ماتریس $2v \times 2v$ است که از چهار ماتریس $v \times v$ تشکیل یافته است که شامل $\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \mathbf{T}_3$ و یک

با توجه به مزایای بیشمار استفاده از نانولوله‌های کربنی نسبت به فلز مس در ساخت خطوط ارتباطی، این نوع مواد الکترونیکی در کانون توجه موارد تحقیقاتی در طراحی مدارات مجتمع با مقیاس بسیار بزرگ قرار گرفته است. در این میان نانولوله‌های کربنی چندلایه بدلیل خواص منحصر به فرد و به ویژه راحتی ساخت نامزد مناسبی جهت ایجاد خطوط ارتباطی هستند. وجود مدل مداری دقیق برای این نوع خطوط ارتباطی در کنار مدل ماتریس انتقال آن کمک شایانی جهت شناخت ابعاد مختلف مداری آنها خواهد داشت. در مدل مداری پیشنهادی در این مقاله در کنار ناهمسان گرفتن نانولوله‌های کربنی چندلایه در داخل باندل، اثرات کوپلینگ بین لایه‌ها و همچنین تونل زنی بین لایه‌ها در نظر گرفته شد. همچنین مفهوم توزیع شدگی مداری با انتخاب تعداد بلوک مناسب محقق شد. خصوصیت ویژه ماتریس انتقال استخراج شده در این مقاله الگوریتمی بودن آن است و این بدان معنی است که هر گونه تغییر در ابعاد و مشخصات فیزیکی نانولوله‌ها، به راحتی در این مدل لحاظ می‌شوند و می‌توان اثرات آن را در خروجی به راحتی مشاهده کرد.

به صورت موردی بحث تاخیر و پایداری نسبی برای خطوط ارتباطی نانولوله‌های کربنی چندلایه ناهمسان باندل شده بررسی شد. در ابتدا اثر افزایش تعداد بلوکهای توزیعی انتخابی نشان داد، در محدوده طول ۱ میکرومتر برای خط ارتباطی، اختلاف نتیجه در تاخیر محاسبه شده برای تعداد بلوک ۱ و ۲ در حد ۰.۱۶٪ است و اختلاف بین تعداد بلوک ۵ و ۶ در حد ۰.۱۲٪ است. لکن در طول ۱۰ میکرومتر اختلاف بین تعداد بلوک ۱ و ۲ در حد ۰.۲۹٪ و اختلاف بین تعداد بلوک ۵ و ۶ در حد ۰.۲۶٪ است. این مورد موید این نکته است که در طولهای بالاتر ملزم به استفاده از تعداد بلوکهای توزیعی بیشتری جهت احراز دقیقتر شرط توزیع شدگی می‌باشیم. در ادامه نتایج افزایش تاخیر و پایداری با افزایش طول در نانولوله‌های کربنی ناهمسان باندل شده مشاهده شد زیرا در این شرایط امپدانس خط افزایش می‌یافت. همچنین با افزایش قطر نانولوله‌ها در حالت باندل شده و در ابعاد ثابت خط ارتباطی، تعداد کل لوله‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه رسانایی کم می‌شود که به نوبه خود باعث افزایش تاخیر و پایداری نسبی خواهد شد.

نیز یک ماتریس است که درایه های آن به شکل زیر قابل محاسبه هستند:

$$\mathbf{Z}_{Q,ii'} = \begin{cases} Z_{Q,i'} & \text{for } i' = v - i + 1 \\ 0 & \text{for } i' \neq v - i + 1 \end{cases} \quad (13\text{-پ})$$

که در آن $Z_{Q,i} = 1/sC_{Qi}$ و Z_{Sj} نیز یک ماتریس به فرم زیر است:

$$\left(\mathbf{Z}_{Sj}\right)_{ii'} = \begin{cases} Z_{Sj} & \text{for } i < v - j + 1 \text{ \& } i' > j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14\text{-پ})$$

$$Z_{S,j} = (sC_{Sj})^{-1} \text{ که}$$

معادلات پ-۱ تا پ-۱۴ تابع انتقال یک بلوک از بلوکهای توزیع شده در شکل ۲(ج) را محاسبه می کند. در ادامه تابع انتقال کلی تمامی بلوکهای توزیع شده به شکل زیر محاسبه می شود:

$$\mathbf{T}_{NB} = (\mathbf{T})^{N_B} \quad (15\text{-پ})$$

که N_B در آن تعداد بلوکهای توزیع شده است. برای لحاظ نمودن مقاومت کوانتومی $R_Q/2$ (که خاصیت توزیع شده ندارد) بصورت سری به قسمتهای توزیع شده مدار در ابتدا بایستی آنرا به فرم ماتریسی \mathbf{T}_Q با ابعاد $2v \times 2v$ تعریف کرد که درایه های این ماتریس را بایستی به فرم زیر نوشت:

$$\mathbf{T}_{Q,ii'} = \begin{cases} 1 & i' = i \\ R_{Q(v-i+1)}/2 & i' = i + v \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16\text{-پ})$$

تابع انتقال نانولوله کربنی چندلایه با ضرب \mathbf{T}_Q در دو طرف \mathbf{T}_{NB} بصورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\mathbf{T}_{MWCNT} = \mathbf{T}_Q \mathbf{T}_{NB} \mathbf{T}_Q = \mathbf{T}_Q (\mathbf{T})^{N_B} \mathbf{T}_Q \quad (17\text{-پ})$$

در واقع داریم:

$$\begin{bmatrix} V_{qv} \\ M \\ V_{qi} \\ M \\ V_{q1} \\ I_v \\ M \\ I_i \\ M \\ I_1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{MWCNT(\omega)} \begin{bmatrix} V'_{qv} \\ M \\ V'_{qi} \\ M \\ V'_{q1} \\ I'_{qv} \\ M \\ I'_{qi} \\ M \\ I'_{q1} \end{bmatrix} \quad (18\text{-پ})$$

ماتریس واحد (\mathbf{I}) است. در واقع ماتریس \mathbf{T} را می توان بصورت زیر نوشت:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{T1} & \mathbf{T2} \\ \mathbf{T3} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (6\text{-پ})$$

برای محاسبه $\mathbf{T1}$ تا $\mathbf{T3}$ می توان از رابطه پ-۵ بهره برد. پس از کمی ساده سازی ریاضی می توان نشان داد که ماتریس $\mathbf{T1}$ بر حسب سه ماتریس دیگر به فرم زیر بدست می آید:

$$\mathbf{T1} = \mathbf{T2} \times \mathbf{T3} + \mathbf{I} \quad (7\text{-پ})$$

همچنین $\mathbf{T2}$ ماتریسی متقارن است که درایه های آن به فرم زیر بدست می آیند:

$$\left(\mathbf{T2}\right)_{ii'} = \begin{cases} Z_{v-(i-1)} & \text{for } i' = i \\ M_{v-(i-1), v-(i'-1)} & \text{for } i' \neq i \end{cases} \quad (8\text{-پ})$$

و در واقع درایه های قطری و غیر قطری آن از روابط پ-۴ بدست می آیند.

بطور مشابه می توان نشان داد که $\mathbf{T3}$ شامل دو مولفه بصورت زیر است:

$$\mathbf{T3} = \mathbf{T31} + \mathbf{T32} \quad (9\text{-پ})$$

که $\mathbf{T31}$ یک ماتریس سه قطری است که درایه های آن را می توان به فرم زیر نوشت:

$$\left(\mathbf{T31}\right)_{ii'} = \begin{cases} G_{T(v-i+1)} + G_{T(v-i)} & \text{for } i' = i \\ -G_{T(v-i)} & \text{for } i' = i \pm 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10\text{-پ})$$

همچنین $\mathbf{T32}$ را می توان به فرم زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} I_{Cv} \\ M \\ I_{Ci} \\ M \\ I_{C2} \\ I_{C1} \end{bmatrix} = \mathbf{T32} \begin{bmatrix} V'_v \\ M \\ V'_i \\ M \\ V'_2 \\ V'_1 \end{bmatrix} \quad (11\text{-پ})$$

پس از کمی ساده سازی ریاضی می توان دید که معکوس ماتریس $\mathbf{T32}$ را می توان به فرم زیر و بصورت جمع $v+1$ جمله نوشت:

$$\left(\mathbf{T32}\right)^{-1} = Z_E \mathbf{J} + \mathbf{Z}_Q + \sum_{j=1}^{v-1} \mathbf{Z}_{Sj} \quad (12\text{-پ})$$

که در آن $Z_E = 1/sC_E$ و \mathbf{J} نیز ماتریس واحد می باشد. \mathbf{Z}_Q

$$I_{in} = \sum_{i=1}^v I_i \quad (\text{پ-۲۱})$$

و

$$I_{out} = \sum_{i=1}^v I'_{qi} \quad (\text{پ-۲۲})$$

و \mathbf{T}_M نیز یک ماتریس 2×2 به فرم زیر است:

$$\begin{bmatrix} V_{in} \\ I_{in} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_M \begin{bmatrix} V_{out} \\ I_{out} \end{bmatrix} \quad (\text{پ-۲۳})$$

همچنین با معکوس کردن رابطه پ-۲۴ خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} V_{out} \\ I'_{qv} \\ \mathbf{M} \\ I'_{qi} \\ \mathbf{M} \\ I'_{q1} \end{bmatrix} = \mathbf{P}^{-1} \begin{bmatrix} V_{qv} \\ \mathbf{M} \\ V_{qi} \\ \mathbf{M} \\ V_{q1} \\ I_{in} \end{bmatrix} \quad (\text{پ-۲۶})$$

و با کمی ساده سازی ریاضی به رابطه زیر می رسیم:

$$\begin{aligned} (\mathbf{T}_M^{-1})_{11} &= \sum_{i'=1}^v (\mathbf{P}^{-1})_{i'} \\ (\mathbf{T}_M^{-1})_{12} &= (\mathbf{P}^{-1})_{1(v+1)} \\ (\mathbf{T}_M^{-1})_{21} &= \sum_{i=2}^{v+1} \sum_{i'=1}^v (\mathbf{P}^{-1})_{ii'} \\ (\mathbf{T}_M^{-1})_{22} &= \sum_{i=2}^{v+1} (\mathbf{P}^{-1})_{i(v+1)} \end{aligned} \quad (\text{پ-۲۷})$$

که ماتریس \mathbf{T}_M را در اختیار ما قرار می دهد.

همانگونه که در شکل (۲-ج) مشاهده می شود با اتصال کنتاکتهای فلزی در دو طرف، نانولوله ها هم پتانسیل می شوند. در شرایط هم پتانسیلی خواهیم داشت:

$$V_{in} = V_{q1} = \dots = V_{qv} \quad (\text{پ-۱۹})$$

و

$$V_{out} = V'_{q1} = \dots = V'_{qv} \quad (\text{پ-۲۰})$$

همچنین جریانهای ورودی و خروجی در دو کنتاکت بصورت زیر بدست می آیند:

در واقع \mathbf{T}_M ساده شده ماتریس \mathbf{T}_{MWCNT} با ابعاد $2v \times 2v$ است. برای محاسبه \mathbf{T}_M بایستی عبارتهای پ-۲۱ و پ-۲۲ را در عبارت پ-۱۸ قرار داد. پس از این کار خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} V_{qv} \\ \mathbf{M} \\ V_{qi} \\ \mathbf{M} \\ V_{q1} \\ I_{in} \end{bmatrix} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} V_{out} \\ I'_{qv} \\ \mathbf{M} \\ I'_{qi} \\ \mathbf{M} \\ I'_{q1} \end{bmatrix} \quad (\text{پ-۲۴})$$

که در آن \mathbf{P} یک ماتریس با ابعاد $(v+1) \times (v+1)$ است که درایه های آن بصورت زیر قابل محاسبه هستند:

$$\mathbf{P}_{ii'(\nu)} = \begin{cases} \sum_{i'=1}^v (\mathbf{T}_{MWCNT(\nu)})_{ii'} & i \leq v \text{ and } i' = 1 \\ \sum_{i=v+1}^{2v} \sum_{i'=1}^v (\mathbf{T}_{MWCNT(\nu)})_{ii'} & i = v+1 \text{ and } i' = 1 \\ \sum_{i=v+1}^{2v} (\mathbf{T}_{MWCNT(\nu)})_{i(i'+1)} & i = v+1 \text{ and } i' > 1 \\ (\mathbf{T}_{MWCNT(\nu)})_{i(i'+v-1)} & i < v+1 \text{ and } i' > 1 \end{cases} \quad (\text{پ-۲۵})$$

مراجع

- [۱] مهناز ذاکری و امید افضل نژاد، "بررسی اثر زاویه کایرال بر کماتش محوری و پیچشی نانولوله های کربنی تک جداره به کمک روش اجزا محدود"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۴۸، بهار ۱۳۹۶، صفحه ۶۱.
- [۲] بهروز عبدی تهنه و علی نادری، "ساختار جدید ترانزیستور اثر میدانی نانو لوله کربنی تونل زنی با دوپینگ خطی در ناحیه درین: شبیه سازی عددی کوانتومی"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۲، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۱۰.

[۳] سعید روحی، یونس علیزاده و رضا انصاری، "بررسی خواص مکانیکی پلی وینیل پیرولیدون تقویت شده با نانولوله های کربنی تک جداره با استفاده از روش شبیه سازی دینامیک مولکولی و مدلسازی المان محدود"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۲، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۳۰.

[4] P. Songjie, Zh. ZhongliangPan, "Bandwidth expanding technology for dynamic crosstalk aware single-walled and multi-walled carbon nanotube bundle interconnects" *Microelectronics Journal*, Vol. 78, August 2018, pp. 101-113.

[5] A. Todri Sanial, J. Dijon, A. Maffucci, *Carbon nanotubes for interconnects, process, design and applications*, 1st ed., Springer, CNRS-LIRMM/University of Montpellier, France, 2016.

[6] R. S. Ruoff, "Strong bundles based on carbon nanotubes", *Nature Nanotechnology*, Vol. 13, 2018, pp. 533–534.

[7] M. A. Salama, R. Burkb, "Synthesis and characterization of multi-walled carbon nanotubes modified with octadecylamine and polyethylene glycol", *Arabian Journal of Chemistry*, Vol. 10, No. 1, February 2017, pp. S921-S927.

[8] P. K. Tripathi, Sh. Durbach, and N. J. Coville, "Synthesis of multi-walled carbon nanotubes from plastic waste using a stainless-steel CVD reactor as catalyst" *Nanomaterials*, Vol. 7, No. 10, 2017.

[9] R. Andrews, D. Jacques, D. Qian, and T. Rantell, "Multiwall Carbon Nanotubes: Synthesis and Application", *Acc. Chem. Res.*, Vol 35, No. 12, 2002, pp. 1008-1017.

[10] T. Tang, X. Chen, X. Meng, H. Chen, Y. Ding, "Synthesis of Multiwalled Carbon Nanotubes by Catalytic Combustion of Polypropylene", *Angew. Chem.*, Vol. 117, 2005, pp. 1541–1544.

[11] K. T. Chaudhary, Z. H. Rizvi, K. A. Bhatti, J. Ali, and P. P. Yupapin, "Multiwalled Carbon Nanotube Synthesis Using Arc Discharge with Hydrocarbon as Feedstock", *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2013, 2013, No. 105145, pp. 1-13.

[12] A. Oyewemi, A. S. Abdulkareem, J. O. Tijani, M. T. Bankole, O. K. Abubakre, A. S. Afolabi, W. D. Roos, "Controlled Syntheses of Multi-walled Carbon Nanotubes from Bimetallic Fe–Co Catalyst Supported on Kaolin by Chemical Vapour Deposition Method" *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 2019, 2019, pp 1–22.

[13] A. A. Vyas, Ch. Zhou, P. Wilhite, Ph. Wang, C. Y. Yang, "Electrical properties of carbon nanotube via interconnects for 30 nm linewidth and beyond" *Microelectronics Reliability*, Vol. 61, June 2016, pp. 35-42.

[14] Zh. Xiao, J. Elie, A. Reynolds, R. Moten, X. Zhao, "The fabrication of carbon nanotube electronic circuits with dielectrophoresis" *Microelectronic Engineering*, Vol. 164, October 2016, pp. 123-127.

[15] K. Singh, B. Raj, "Influence of temperature on MWCNT bundle, SWCNT bundle and copper interconnects for nanoscaled technology nodes" *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol. 26, August 2015, pp. 6134–6142.

[16] Y. Feng, T. Inoue, H. An, R. Xiang, Sh. Chiashi, and Sh. Maruyama, "Quantitative study of bundle size effect on thermal conductivity of single-walled carbon nanotubes" *Applied Physics Letters*, Vol. 112, Issue 19, 2018.

[17] M. K. Samani, N. Khosravian, G. C. K. Chen, M. Shakerzadeh, D. Baillargeat, B.K. Tay, "Thermal conductivity of individual multiwalled carbon nanotubes" *International journal of thermal sciences*, Vol. 62, December 2012, pp. 40-43.

[18] A. Naeemi A, J. Meindl "Performance modeling for single- and multiwall carbon nanotubes as signal and power interconnects in gigascale systems," *IEEE Trans Electron Dev.*, Vol. 55, No. 10, 2008 , pp. 2574–82.

[19] D. Fathi, B. Forouzandeh "A novel approach for stability analysis in carbon nanotube interconnects," *IEEE Electron Dev. Lett*, Vol. 30, No. 5, 2009, pp. 475–477.

[20] H. Li, W. Y. Yin, K. Banerjee, JF. Mao, "Circuit modeling and performance analysis of multi-walled carbon nanotube interconnects," *IEEE Transaction on Electron Dev.*, Vol. 55, Issue 6, June 2008, pp. 1328 - 1337.

[21] S. Haji-Nasiri, R. Faez, M. K. Moravvej-Farshi, "Stability analysis in multiwall carbon nanotube bundle interconnects", *Microelectronics Reliability*, Vol. 52, Issue 12, 2012, pp. 3026–3034.

[22] A. Maffucci, S. A. Maksimenko, G. Mian, G. Ya. Slepyan, "Electrical Conductivity of Carbon Nanotubes: Modeling and Characterization" 1st ed., Springer, Cham, USA, 2016.

- [23] M. Sharma, M. Kumar Rai and R. Khanna, "Performance Analysis of Mixed Carbon Nano Tubes as VLSI Interconnects", *Indian Journal of Science and Technology*, Vol 10, Issue 16, April 2017.
- [24] M. Tang, J. Mao, "Modeling and Fast Simulation of Multiwalled Carbon Nanotube Interconnects", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 57, Issue 2, April 2015, pp. 232 – 240.
- [25] V. Ramesh Kumar, B. Kumar Kaushik, A. Patnaik, "Crosstalk noise modeling of multiwall carbon nanotube (MWCNT) interconnects using finite-difference time-domain (FDTD) technique" *Microelectronics Reliability*, Vol. 55, January 2015, pp. 155-163.
- [26] S. H. Nasiri, M. K. Moravvej-Farshi, and R. Faez, "Stability Analysis in Graphene Nanoribbon Interconnects," *IEEE Electron Device Lett*, Vol. 31, No. 12, 2010, pp. 1458-1460.
- [27] S. Haji Nasiri, M. K. Moravvej-Farshi and R. Faez, "Time Domain Analysis of Graphene Nanoribbon Interconnects Based on Transmission Line Model," *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, Vol. 8, No. 1, 2012, pp 37-44.
- [28] S. Fotoohi, S. Haji-Nasiri, "Transfer matrix model of multilayer graphene nanoribbon interconnects", *Microelectronics Reliability*, Vol. 79, 2017, pp. 193–200.
- [29] S. Haji-Nasiri, M.K. Moravvej-Farshi, R. Faez, A seamless-pitched graphene nanoribbon field effect transistor, *Physica E*, Vol.74, 2015, pp. 414–418.
- [30] S. Haji-Nasiri and M. K. Moravvej-Farshi, "Stability Analysis in CNTFETs", *IEEE Electron Device Lett*, Vol. 34, No. 2, 2013, pp. 301-303.
- [31] International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), 2015, <http://www.itrs.net>.
- [32] R. C. Dorf, R. H. Bishop, *Modern Control System*, 13th ed., Pearson Education, Inc, USA, 2017.