

## تحلیل پاسخ زمانی و نایکوئیست لیزر خودسامانده نقطه کوانتومی GaAs-InGaAs با استفاده از مدل تابع انتقال

سید سعید حاجی نصیری<sup>۱\*</sup>

### اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۹۰

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۳۱

### واژگان کلیدی:

لیزر خود سامانده،  
نقطه کوانتومی،  
تابع انتقال،  
پایداری.

### چکیده

با استفاده از معادلات نرخ لیزر خود سامانده نقطه کوانتومی ایندیم گالیم آرسناید - گالیم آرسناید، تابع انتقال این نوع لیزر استخراج و ارائه می شود بطوریکه با بهره گیری از آن می توان انواع تحلیلهای حوزه زمان و پایداری در حوزه فرکانس را انجام داد. در حوزه زمان، تابع انتقال ارائه شده رفتار حالت گذرا و دائمی لیزر را به صورت یکجا محاسبه می کند. همچنین این تابع انتقال می تواند در شبیه سازهای مدارهای نظیر اسپایس جهت شبیه سازی مدارات الکترواپتیکی با مقیاس بزرگ استفاده شود. پس از استخراج تابع انتقال مذکور، پاسخ حوزه زمان لیزر خود سامانده نقطه کوانتومی و دیاگرامهای پایداری نایکوئیستی آن محاسبه شدند. در این دیاگرامها اثر تغییر رفتار دینامیک حاملها بر روی پاسخ خروجی لیزر بررسی شده است. نتایج حاصل از تابع انتقال ارائه شده نشان می دهد افزایش طول عمر آرامش حاملها باعث کاهش دامنه نوسانات گذرا و پایداری نایکوئیستی بیشتر و افزایش زمان بازترکیب در نقطه و چاه کوانتومی لیزر باعث افزایش دامنه نوسانات و پایداری نایکوئیستی کمتر در توان خروجی آن می شود. بر خلاف سیستمهایی نظیر خطوط ارتباطی و ترانزیستورها که پاسخ حوزه زمان و پایداری نایکوئیستی در آنها قبلاً بررسی شده است، نتایج به دست آمده نشان می دهد در لیزر خود سامانده نقطه کوانتومی نسبت پیک توان خروجی در حالت گذرا به توان حالت پایدار بسیار بزرگ است. هر یک از این پیکها در توان خروجی لیزر می تواند ورودی مدار بعدی متصل به لیزر را دچار آسیب و یا سردرگمی منطقی کند.

### ۱- مقدمه

در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰ گیگاهرتز است [۹-۱۰]، جریان آستانه نیز در حد ۱۰ تا ۱۰۰ میلی آمپر است [۱۱-۱۲]. هدایت گرمایی این نوع لیزر هم در حد  $21 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$  گزارش شده است [۱۳]. علیرغم تمامی این مزایا، نقاط کوانتومی دارای نقصهای سطحی هستند که این موضوع می تواند احتمال ترکیب الکترونها و حفره ها را از طریق ترازهای تله افزایش دهد و در اصطلاح باز ترکیب غیر تشعشعی را زیاد کند و در نتیجه در کارکرد ادواتی نظیر

افزاره‌های الکترونیکی نانومتری اخیراً مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته اند [۱-۳]. لیزرهای خودسامانده نقطه کوانتومی<sup>۲</sup> (SAQD) نیز در حوزه ادوات نانومتری در سالهای اخیر توجه بسیار زیادی را به سوی خود جلب کرده‌اند. دلیل این توجه جریان آستانه پایین، پایداری حرارتی بالا و پهنای باند فرکانسی بالا در مقایسه با لیزرهای چاه کوانتومی<sup>۳</sup> متداول است [۴-۸]. پهنای باند لیزرهای نقطه کوانتومی

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

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

<sup>۲</sup> Self Assembled Quantum Dot (SAQD)

<sup>۳</sup> Quantum Well (QW)

می‌دهد که یک آستانه پمپ برای لیزر وجود دارد که وابسته به غلظت آرایش نقاط کوانتومی آن است.

در مرجع ۲۷ یک مدل تاخیری مبتنی بر معادلات دیفرانسیل برای مد غیرفعال لیزرهای نیمه هادی ارائه شده است تا یک چارچوب ریاضی برای شبیه‌سازی لیزرهای نقطه کوانتومی ارائه دهد. نتایج این مدل با نتایج آزمایشگاهی مشاهده شده که متعلق به اینگونه سیستمها است مقایسه شده است.

در مرجع ۲۸ مدل نامتقارن الکترون-حفره لیزرهای نقطه کوانتومی نیمه هادی در نرخ آرامشهای مختلف انتقال بین سطوح حاوی الکترون و حفره تحلیل شده است. مدل پیشنهادی در حالتی که نرخ آرامش بین سطوح حاوی حفره از نرخ آرامش بین سطوح حاوی الکترون بیشتر است می‌تواند ساده‌تر شود.

در مرجع ۲۹ مدل مداری لیزر VCSE نقطه کوانتومی ایندیم گالیم آرسناید-گالیم آرسناید با احتساب اثرات دما ارائه شده است. همچنین اثرات دینامیک حاملها در راندمان لیزر شبیه‌سازی شده است.

علیرغم تمامی تحقیقات ارزشمندی که تا کنون در لیزرهای SAQD انجام شده، در حال حاضر تابع انتقالی برای این نوع لیزر ارائه نشده است تا بتوانیم پایداری لیزرهای SADQ را در حوزه زمان و یا فرکانس بررسی کنیم. در واقع مدل‌سازی سیستمهای الکترونیکی کمک شایانی در تحلیل رفتار این سیستمها می‌کند [۳۰-۳۲] و در این مقاله نیز هدف ارائه یک مدل تابع انتقال برای لیزر نقطه کوانتومی خود سامانده ایندیم گالیم آرسناید-گالیم آرسناید و تحلیل رفتار آن است. بطور کلی در هر سیستم الکترونیکی یا الکترونیکی ناپایداری‌های گذرا می‌تواند بر روی سیستم اثر منفی گذاشته و کارایی سیستم را کاهش دهد [۳۳-۳۴]. در لیزر SAQD نیز اگر حاشیه پایداری مطمئنی در توان خروجی وجود نداشته باشد، اینگونه لیزرها قابل استفاده عملی در تراشه‌های الکترواپتیکی نخواهند بود. به بیان دیگر در مدارات مجتمع الکترواپتیکی که از لیزرهای SADQ استفاده می‌کنند پیک نوسانات احتمالی شدید لحظات شروع توان در خروجی لیزر می‌تواند قسمتهای مداری بعدی متصل به لیزر را تخریب و یا دچار اختلال کند و کارایی تراشه الکترواپتیکی را به شدت کاهش دهد. در خوشبینانه‌ترین حالت، این نوسانات می‌توانند به نوعی باعث سردرگمی و بروز خطای

لیزر نقطه کوانتومی اختلال به وجود می‌آید. به دلیل این باز ترکیب غیر تشعشعی، بازده کوانتومی لیزر نیز افت می‌کند [۱۴]. همچنین دمای کار نقاط کوانتومی بسیار پایین است که این امر نیاز به استفاده از تجهیزات خاص برای برقراری دمای بسیار پایین در لیزر را اجتناب ناپذیر می‌کند [۱۵]. در ضمن فرآیند ساخت نقاط کوانتومی بسیار مشکل است و چالشهای فراوانی در ساخت این ماده وجود دارد [۱۶]. در عوض لیزرهای سیم کوانتومی و چاه کوانتومی می‌توانند در دماهای بالاتری کار کنند [۱۷-۱۸] و پروسه ساخت راحت‌تری دارند [۱۹-۲۱]. روش کار لیزر بدین صورت است که الکترونهای ناحیه فعال لیزر به نحوی برانگیخته می‌شوند که همزمان تعداد زیادی از آنها در یک تراز انرژی برانگیختگی قرارگیرند و به اصطلاح نوعی وارونگی جمعیتی در تراز هدایت صورت می‌گیرد. آنگاه با تابش فوتونی که انرژی آن مساوی اختلاف انرژی تراز برانگیخته و تراز پایه برای الکترونهای فوق است، باعث می‌شود که یک الکترون بلافاصله به تراز پایین سقوط کند و یک فوتون جدید تولید شود. این فوتون را فوتون القایی یا تحریکی می‌نامند. آنگاه با دو فوتون پدید آمده تکرار می‌شود و در مدت زمان و مسافت کوتاهی تعداد بسیار زیادی فوتون با فرکانس و انرژی یکسان تولید می‌شوند. در واقع تولید نور لیزر براساس گسیل القایی صورت می‌گیرد. اگر جایی که باز ترکیب حاملها انجام می‌پذیرد دارای تحدید سه بعدی باشد لیزر نقطه کوانتومی خواهیم داشت [۲۲-۲۵]. در حال حاضر تمرکز بسیاری از کارهای انجام شده، بر روی مدل‌سازی عددی و تئوری لیزر SAQD است و در اغلب آنها مکانیسمهای فیزیک داخلی این نوع لیزر تشریح شده است [۲۶-۲۹].

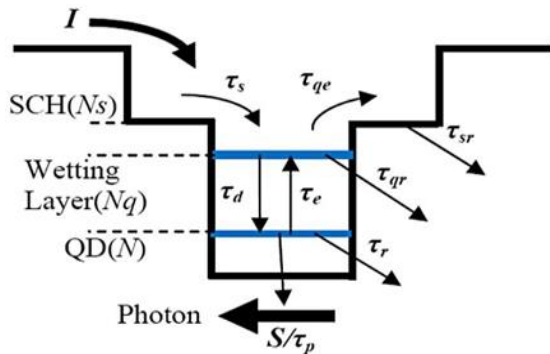
در مرجع ۸ با ترکیب معادلات نرخ چند جمعیتی<sup>۴</sup> لیزرهای کوانتومی و شبیه‌سازی مدار معادل لیزرهای چاه کوانتومی چندتایی، مدار معادل لیزر نقطه کوانتومی چند جمعیتی (MPQDLs-ECM) ارائه شده تا میزان نوردی، دما و مشخصات تاخیر در زمان روشن شدن این نوع لیزر شبیه‌سازی و مشخص شود.

در مرجع ۲۶ نویسندگان یک مدل تولیدی-تلفاتی غیراشباع برای لیزرهای فیبری آرایش شده با نقاط کوانتومی کلونیدی PbSE ارائه داده‌اند. شبیه‌سازی عددی این مدل نشان

<sup>4</sup> Multi-Population Rate Equations (MPREs)

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\beta n}{\tau_r} - \frac{S}{\tau_p} + \frac{(c/n_r)g_m^{(1)}\Gamma}{1 + \varepsilon_m \Gamma S/V_a} S \quad (۴)$$

تمامی پارامترها موجود در معادلات ۱-۴ در جدول ۱ لیست شده‌اند.



شکل ۱- دیگرام باند انرژی ناحیه فعال لیزر نقطه کوانتومی نیمه هادی خودسامانده ایندیم گالیم آرسناید- گالیم آرسناید [۴-۵]

با تبدیل معادلات ۱ تا ۴ از حوزه زمان به حوزه فرکانس خواهیم داشت:

$$n_s \left( j\omega + \frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_{sr}} \right) - n_q \left( \frac{1}{\tau_{qe}} \right) = \frac{i}{q} \quad (۵)$$

$$-n \left( \frac{1}{\tau_e} \right) - n_s \left( \frac{1}{\tau_s} \right) + n_q \left( j\omega + \frac{1}{\tau_{qr}} + \frac{1}{\tau_{qe}} + \frac{1}{\tau_d} \right) = 0 \quad (۶)$$

$$n_s \left( j\omega + \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_e} \right) + \frac{(c/n_r)g_m^{(1)}\Gamma}{1 + \varepsilon_m \Gamma S/V_a} S - n_q \left( \frac{1}{\tau_d} \right) = 0 \quad (۷)$$

$$\left( j\omega + \frac{1}{\tau_p} - \frac{(c/n_r)g_m^{(1)}\Gamma}{(1 + \varepsilon_m \Gamma S/V_a)^2} \right) S - \frac{\beta n}{\tau_r} = 0 \quad (۸)$$

در معادلات ۵ تا ۸ می‌توان نسبت تعداد فوتون خروجی به جریان تزریق شده را استخراج کرد.

$$\frac{S}{i} = \frac{1/e}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3 + a_4 s^4} \quad (۹)$$

در کلیه روابط فوق  $s = j\omega$  است. همچنین ضرایب  $a_4$  تا  $a_0$  بصورت زیر محاسبه و استخراج می‌شوند:

$$a_0 = s_0 \left( \frac{s_2 s_8}{s_7 s_3} + \frac{s_4 s_8 s_5}{s_3 s_7 s_6} \right) - s_1 \frac{s_8 s_5}{s_7 s_6} \quad (۱۰)$$

$$a_1 = \left( \frac{s_2 s_8}{s_7 s_3} + \frac{s_4 s_8 s_5}{s_3 s_7 s_6} \right) + s_0 \left( \frac{s_2}{s_7 s_3} - \frac{s_8 s_5 + 2s_4 (s_8 + s_5)}{s_3 s_7 s_6} \right) - s_1 \frac{2(s_8 + s_5)}{s_7 s_6} \quad (۱۱)$$

منطقی در ورودی مدارات منطقی نوری بعدی که متصل به لیزر هستند شوند. به منظور تحلیل کارایی لیزرهای SAQD که برای کاربردهای مدارات مجتمع نوری طراحی می‌شوند نیاز است که پاسخ حوزه زمان و پایداری نایکوئیستی به راحتی و توسط یک تابع انتقال ساده محاسبه شود.

## ۲- مدل تابع انتقال

در شکل (۱) دیگرام باند انرژی ناحیه فعال لیزر نقطه کوانتومی خود سامانده ایندیم گالیم آرسناید- گالیم آرسناید نشان داده شده است. حاملهای تزریق شده که از بین لایه SCH<sup>۵</sup> توزیع می‌شوند در لایه WL<sup>۶</sup> و سپس در نقطه کوانتومی آرامش می‌گیرند. مشکل عمده ای که در لیزرهای کوانتومی متداول وجود داشت این بود که لایه نازک آنها بقدری کوچک بود که مانع از احتباس موثر نور می‌شد. برای جبران سازی، دو لایه دیگر به بیرون ساختار موجود مرکزی اضافه شد. این لایه ها دارای ضریب شکست کمتری نسبت به لایه های مرکزی بودند و در نتیجه نور را بهتر محبوس می کردند. به این نوع طراحی اصطلاحاً ساختار مرکب احتباسی یا SCH گویند [۴-۵]. همچنین لایه مرطوب یا WL لایه ای از اتمهاست که به صورت رشد همبافته لایه نشانی شده اند و نقاط کوانتومی بر اساس آن و روی آن ایجاد می شوند. این اتمها می توانند عناصر شبه فلز یا ترکیبی باشند [۴-۵]. لایه WL معمولاً در نقاط کوانتومی ایندیم گالیم آرسناید- گالیم آرسناید رشد داده شده توسط مد استرانسکی - کراستائف مشاهده می‌شود و مانند یک لایه دوبعدی با چگالی حالتی مانند چاه کوانتومی عمل می‌کند [۵-۷]. برخی حاملها بصورت تشعشعی و غیرتشعشعی در داخل و خارج نقاط کوانتومی و چاه کوانتومی بازترکیب می شوند. بدلیل پروسه گسیل تحریک شده که در آستانه نورافشانی رخ می‌دهد حاملها با سقوط خود فوتون ساطع می‌کنند.

معادلات نرخ لیزر SAQD مربوط به شکل (۱) در معادلات ۱ تا ۴ نشان داده شده است [۴-۵]:

$$\frac{dn_s}{dt} = \frac{i}{q} - \frac{n_s}{\tau_s} - \frac{n_s}{\tau_{sr}} + \frac{n_q}{\tau_{qe}} \quad (۱)$$

$$\frac{dn_q}{dt} = \frac{n_s}{\tau_s} + \frac{n}{\tau_e} - \frac{n_q}{\tau_{qr}} - \frac{n_q}{\tau_{qe}} - \frac{n_q}{\tau_d} \quad (۲)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n_q}{\tau_d} - \frac{n}{\tau_r} - \frac{n}{\tau_\varepsilon} - \frac{(c/n_r)g_m^{(1)}\Gamma}{1 + \varepsilon_m \Gamma S/V_a} S \quad (۳)$$

<sup>۶</sup> Wetting Layer (WL)

<sup>۵</sup> Separate Confinement Heterostructure (SCH)

$$a_4 = -\frac{1}{s_3 s_7 s_6} \quad (14)$$

که در آن ضرایب  $s_0$  تا  $s_8$  به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$s_0 = \tau_s^{-1} + \tau_{sr}^{-1} \quad (15)$$

$$s_1 = \tau_{qe}^{-1} \quad (16)$$

$$s_2 = \tau_e^{-1} \quad (17)$$

$$s_3 = \tau_s^{-1} \quad (18)$$

$$s_4 = \tau_{qr}^{-1} + \tau_{qe}^{-1} + \tau_d^{-1} \quad (19)$$

$$s_5 = \tau_r^{-1} + \tau_e^{-1} + \frac{(c/n_r)g_m^{(1)}\Gamma}{1 + \epsilon_m \Gamma S / V_a} S \quad (20)$$

$$s_6 = \tau_d^{-1} \quad (21)$$

$$s_7 = -\frac{\left(\frac{c}{n_r}\right)g_m^{(1)}\Gamma}{1 + \frac{\epsilon_m \Gamma S}{V_a}} S - \beta \tau_r^{-1} \quad (22)$$

$$s_8 = \tau_p^{-1} \quad (23)$$

### ۳- نتایج شبیه سازی

در این بخش هدف آن است که تاثیر طول عمر آرامش حامل ها ( $\tau_0$ )، طول عمر باز ترکیب حاملها در نقطه کوانتومی ( $\tau_r$ ) و طول عمر باز ترکیب حاملها در چاه کوانتومی ( $\tau_{qr}$ ) را بر روی پاسخ پله و پایداری نایکوئیستی لیزر SAQD بررسی کنیم. پایداری نایکوئیستی ابزاری است که توسط آن می‌توان با استفاده از نتایج سیستم حلقه باز، رفتار سیستم حلقه بسته را پیش بینی کرد. نمودار نایکوئیست بعنوان ابزاری جهت تعیین پایداری نایکوئیستی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مزیت اصلی نمودار نایکوئیست نمایش رفتار سیستم به ازای تمامی فرکانسها در یک نمودار است. در نمودارهای نایکوئیست، زاویه فاز از محور حقیقی مثبت اندازه گیری می‌شود. اگر افزایش زاویه در جهت خلاف عقربه ساعت (جهت عقربه ساعت) باشد، زاویه مثبت (منفی) است. توجه کنید که در سیستم لیزر نقطه کوانتومی مورد بررسی درجه مخرج تابع تبدیل داده شده در معادله (۹) همواره بزرگتر از درجه صورت آن است، و لذا نقطه فرکانس بالا در جهت عقربه ساعت به سمت صفر میل خواهد کرد. بسیاری از سیستم های عملی حلقه- باز پایدار هستند و معیار پایداری نایکوئیست برای این دسته از سیستم ها 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

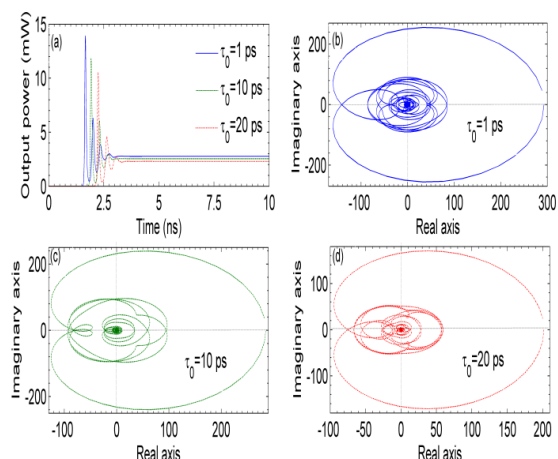
$$a_2 = \left( \frac{s_2}{s_7 s_3} - \frac{s_8 s_5 + 2s_4(s_8 + s_5)}{s_3 s_7 s_6} \right) + s_0 \left( -\frac{2(s_8 + s_5) + s_4}{s_3 s_7 s_6} \right) + \frac{s_1}{s_7 s_6} \quad (12)$$

جدول ۱- تعریف پارامترهای موجود در روابط ۱ تا ۴ [۴-۵]

پارامتر	تعریف- مقدار	واحد
i	جریان تزریق شده	---
q	بار الکترون	۱۹-۱۰×۱,۶ کولن
στ	طول عمر اسارت حاملها در ناحیه SCH	۱ پیکوثانیه
Tsr	طول عمر گسیل خودبخودی در ناحیه SCH	۲,۸ نانوثانیه
τqc	طول عمر گسیل حاملها از چاه کوانتومی به ناحیه SCH	۵ نانوثانیه
τc	طول عمر گسیل حاملها از نقطه کوانتومی به چاه کوانتومی	۰,۲ نانوثانیه
τqr	طول عمر باز ترکیب حاملها در چاه کوانتومی	---
τd	طول عمر آرامش حاملها در نقطه کوانتومی	0/(1-p)τ
p	احتمال اشغال در حالت پایه نقطه کوانتومی	n/(2nD Va)
nD	چگالی حجم نقطه کوانتومی	۱۰۲۲×۹ مترمکعب
τr	طول عمر باز ترکیب در نقطه کوانتومی	---
c	سرعت نور در خلا	۱۰۸×۳ متر بر ثانیه
nr	ضریب شکست	۳,۵
g <sub>m</sub> <sup>(1)</sup>	[۱] و [۲] بازده نوری خطی ناحیه فعال نقطه کوانتومی	---
Γ	ضریب تحدید نوری	٪۶
S	تعداد فوتون	---
εm	عبارت گین اشباع پدیداری	۲۲-۱۰×۱,۰۴۵ مترمکعب
Va	حجم لایه چاه کوانتومی	۱۶-۱۰×۳,۶
β	بازده کوپلینگ گسیل خودبخودی	۴-۱۰
τ0	طول عمر آرامش حامل	---

$$a_3 = \left( -\frac{2(s_8 + s_5) + s_4}{s_3 s_7 s_6} \right) - \frac{s_0}{s_3 s_7 s_6} \quad (13)$$

در لیزرهای SAQD نوسانات فوتونی تعدیل می‌شوند و توان خروجی لیزر کاهش می‌یابد [۴-۵]. در واقع افزایش طول عمر آرامش حامل بدین معنی است که زمانی که در آن بازترکیب اتفاق می‌افتد نیز بیشتر است. به عبارتی تعداد بازترکیبها در یک بازه زمانی کمتر می‌شود. هر چقدر تعداد بازترکیبها کمتر شود تعداد فوتونهای خروجی نیز کمتر شده و در نتیجه توان خروجی لیزر نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۲- (a) توان خروجی لیزر SAQD به ازای طول عمر آرامش حاملهای ۱، ۱۰ و ۲۰ پیکوثانیه. نمودارهای (b)، (c)، (d)، نمودارهای نایکوئیست متناظر با طول عمر آرامش حامل ۱، ۱۰ و ۲۰ پیکوثانیه هستند. در این شکل طول عمر بازترکیب حاملها در چاه کوانتومی ۲،۸ نانوثانیه و طول عمر بازترکیب حاملها در نقطه کوانتومی نیز ۲،۸ نانوثانیه در نظر گرفته شده است.

شکل (a۳) پاسخ پله به ازای طول عمر بازترکیب حاملها در نقطه کوانتومی با مقادیر ۲، ۲،۵ و ۳ نانوثانیه را نشان می‌دهد. طول عمر آرامش حامل ۱۰ پیکوثانیه و طول عمر بازترکیب حاملها در چاه کوانتومی ۲،۸ نانوثانیه در نظر گرفته شد. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش طول عمر بازترکیب حاملها در نقطه کوانتومی حداکثر پیک نوسان افزایش می‌یابد و مقدار آن برای ۲، ۲،۵ و ۳ نانوثانیه به ترتیب برابر ۸،۶۹، ۱۱،۱۵ و ۱۳،۲۶ میلی وات می‌شود.

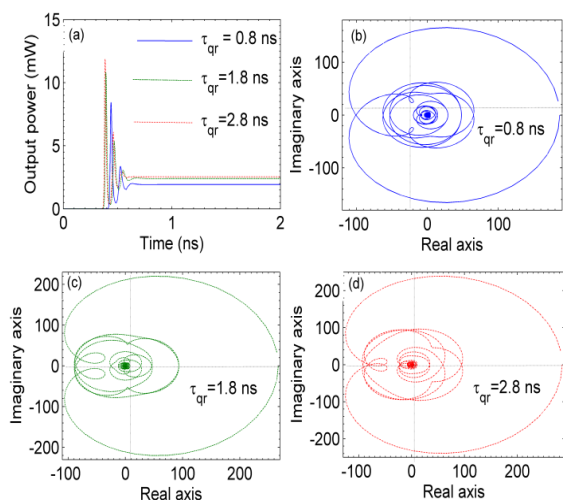
نمودارهای نایکوئیست هم در شکل‌های (b، c، d) نشان می‌دهند هنگامی که طول عمر بازترکیب حاملها در نقطه کوانتومی افزایش می‌یابد، نمودارهای نایکوئیست در محورهای حقیقی و موهومی پیشروی می‌کنند. افزایش در توان خروجی به این دلیل اتفاق می‌افتد که با افزایش طول عمر بازترکیب حاملها در نقطه کوانتومی جریان آستانه نیز افزایش می‌یابد. [۴-۵]. در واقع با افزایش طول عمر باز

پایدارتر خواهد بود و بعبارتی 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 [۳۵-۴۰].

پایداری نایکوئیستی و پاسخ حوزه زمان برای سیستمهای نانوالکترونیکی نظیر خطوط ارتباطی نانو نوار گرافنی و نانولوله های کربنی تک لایه و چندلایه قبلا انجام شده است [۳۵-۳۹]. همچنین پایداری نایکوئیستی و تحلیل حوزه زمان ترانزیستورهای نانولوله کربنی و نانونوار گرافنی قبلا گزارش شده است [۴۰-۴۱]. برخلاف سیستمهای مذکور که الکترونیکی هستند، لیزرهای SAQD سیستمهایی الکترواپتیکی هستند و انتظار می‌رود پاسخ حوزه زمان و پایداری نایکوئیستی متفاوتی داشته باشند. اهمیت چنین تحلیلی برای لیزرهای SAQD در این است که ذاتا پایداری فوتون و کنترل آن در مقایسه با پایداری الکترون مشکل تر است زیرا فوتون ذره ای بدون جرم است و داری رفتار دینامیک بیشتری در مقایسه با الکترون است [۴-۵]. از نقطه نظر سیستمی این رفتار متفاوت به مکانیسم کار لیزر بر می‌گردد که اساسا در هنگام شروع به کار برپایه ناپایداری فوتونهاست [۴-۵]. در مقابل برای خطوط ارتباطی نانونوار گرافنی چندلایه، نانولوله کربنی تک لایه و یا چندلایه، و ترانزیستورهای نانولوله کربنی عموما با مدارهای امپدانس مواجه هستیم و پاسخ زمانی مدار بیشتر در حالت نوسانات میرا شونده است.

شکل (a۲) پاسخ پله تابع انتقال لیزر را به ازای طول عمر آرامش حامل ۱، ۱۰ و ۲۰ پیکوثانیه نشان می‌دهد. طول عمر بازترکیب حاملها در چاه کوانتومی ۲،۸ نانوثانیه و طول عمر بازترکیب حاملها در نقطه کوانتومی نیز ۲،۸ نانوثانیه فرض شده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش طول عمر آرامش حاملها ماکزیمم پیک نوسان کاهش می‌یابد و مقدار آن برای طول عمر آرامش حامل ۱، ۱۰ و ۲۰ پیکوثانیه به ترتیب برابر ۱۳،۵۹، ۱۱،۸۸ و ۱۰،۵۷ میلی وات می‌شود. همچنین نمودارهای نایکوئیست در شکل های (b، c، d۲) نشان می‌دهند که برای هر سه مقدار مفروض طول عمر آرامش حامل، هنگامی که این پارامتر افزایش می‌یابد این نمودارها روی محورهای حقیقی و موهومی پسروی می‌کنند. دلیل این رفتار این است که با افزایش طول عمر آرامش حامل

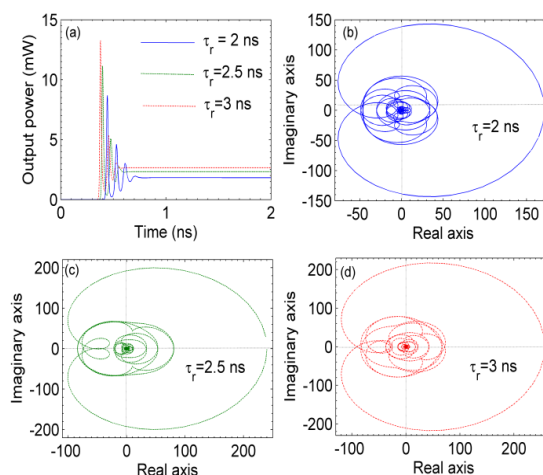
فوتون تولید شده به میزان حامل تزریق شده است. در نتیجه کاهش تولید فوتون، بازده کوانتومی با کاهش طول عمر بازترکیب حامل کاهش پیدا می کند.



شکل ۴- (a) توان خروجی لیزر SAQD به ازای طول عمر بازترکیبهای ۰٫۸، ۱٫۸ و ۲٫۸ نانوثانیه در چاه کوانتومی. شکلهای (b)، (c)، (d) متعلق به نمودارهای نایکوئیست به ازای طول عمر بازترکیب حامل در چاه کوانتومی ۰٫۸، ۱٫۸ و ۲٫۸ نانوثانیه است. طول عمر آرامش حامل ۱۰ پیکوثانیه و طول عمر بازترکیب حامل در نقطه کوانتومی ۲٫۸ نانوثانیه در نظر گرفته شد.

توجه داشته باشیم که شروع کار لیزر اساساً بر مبنای ناپایداری است و اگر الکترونیهای که در تراز هدایت دچار وارونگی جمعیتی شده اند ناپایدار نشده و سقوط نکنند فوتونی ساطع نمی شود. ولی این ناپایداری در ادامه می بایست به صورت کنترل شده پیش رود تا جایی که تعداد فوتونهای خروجی به حال تعادل برسد. همانگونه که در پاسخهای زمانی لیزر در هر سه شکل ۲-۳ و ۴ نشان داده شده شروع کار لیزر با نوسان و ناپایداری همراه است ولی در ادامه این نوسانات میرا شده و میزان توان لیزر در یک جایی به ثبات می رسد. نوسانات و ناپایداریهای اولیه اهمیت خاصی دارند زیرا همین نوسانات اگر از حد خاصی فراتر روند ممکن است به قطعه الکترونیکی یا اپتیکی بعدی که به خروجی لیزر متصل است آسیب وارد شود. این ناپایداری های اولیه در لیزر کاملاً اجتناب ناپذیرند ولی می توان میزان ناپایداری را تحت کنترل داشت. ذکر این نکته ضروری به نظر می رسد که در خطوط ارتباطی نانووار گرافنی و یا نانولوله کربنی، پاسخ پله سیستم دارای نوسانات به صورت تک هارمونی بود و نسبت حداکثر پیک نوسان به

ترکیب حاملها، تعداد بیشتری از الکترون ها و حفره ها با هم ترکیب شده و فوتون بیشتری تولید می شود. تولید فوتون بیشتر مستلزم تزریق جریان بالاتر است.



شکل ۳ (a) توان خروجی لیزر SAQD به ازای طول عمر بازترکیبهای ۲، ۲٫۵ و ۳ نانوثانیه در نقطه کوانتومی. نمودارهای (b)، (c)، (d) متعلق به نمودارهای نایکوئیست برای طول عمر بازترکیب حامل در نقطه کوانتومی ۲، ۲٫۵ و ۳ نانوثانیه هستند. طول عمر آرامش حامل ۱۰ نانوثانیه و طول عمر بازترکیبهای مختلف در چاه کوانتومی ۲٫۸ نانوثانیه در نظر گرفته شده است.

شکل ۴ (a) پاسخ پله به ازای طول عمر بازترکیب حامل در چاه کوانتومی با مقادیر ۰٫۸، ۱٫۸ و ۲٫۸ نانوثانیه را نشان می دهد. طول عمر آرامش حامل ۱۰ پیکوثانیه و طول عمر بازترکیب حامل در نقطه کوانتومی ۲٫۸ نانوثانیه فرض شد. با توجه به این شکل می بینیم که حداکثر پیک نوسان برای طول عمر بازترکیب در چاه کوانتومی با مقادیر ۰٫۸، ۱٫۸ و ۲٫۸ نانوثانیه بترتیب برابر ۸٫۴۵، ۱۰٫۸۳ و ۱۱٫۸۸ میلی وات است. همچنین دیگرامهای نایکوئیست در شکلهای (b)، (c)، (d) نشان می دهد با افزایش طول عمر بازترکیب حامل در چاه کوانتومی، نمودارهای نایکوئیست در محورهای حقیقی و موهومی پیشروی می کنند. در واقع با کاهش طول عمر بازترکیب حامل در چاه کوانتومی حاملها فرصت بیشتری برای بازترکیب از طریق پروسه غیر تشعشعی در خارج از نقاط کوانتومی پیدا می کنند که به نوبه خود باعث کاهش بازدهی کوانتومی می شود.

به عبارت دیگر با کاهش طول عمر بازترکیب حامل تعداد زیادی از حاملها از طریق پروسه غیر تشعشعی با هم باز ترکیب می شوند. بازترکیب غیر تشعشعی مانع از تولید فوتون می شود. از طرفی بازده کوانتومی طبق تعریف نسبت

نقطه و چاه کوانتومی و کاهش طول عمر آرامش حاملها، سیستم لیزر SAQD ناپایداری بیشتری پیدا می‌کند. با کاهش طول عمر آرامش حاملها در لیزرهای SAQD نوسانات فوتونی تقویت می‌شوند و توان خروجی گذرای لیزر افزایش می‌یابد. با افزایش زمان بازترکیب در نقطه کوانتومی جریان آستانه نیز افزایش می‌یابد و همین امر باعث افزایش توان گذرای لیزر و ناپایداری اولیه آن می‌شود. با افزایش زمان بازترکیب در چاه کوانتومی حاملها فرصت کمتری برای بازترکیب از طریق پروسه غیر تشعشعی در خارج از نقاط کوانتومی پیدا می‌کنند که به نوبه خود باعث افزایش بازدهی کوانتومی و افزایش توان گذرای لیزر می‌شود.

در ضمن نتایج نشان می‌دهد که نسبت حداکثر پیک نوسان توان خروجی لیزر در حالت گذرا به توان حالت پایدار ۴ برابر بیش از سیستمهایی نظیر خطوط ارتباطی نانووار گرافنی و نانولوله کربنی و ۵,۴ برابر بیشتر از ترانزیستورهای نانولوله کربنی است که تا کنون بررسی شده‌اند. در حقیقت با هرگونه نوسان و ناپایداری در پاسخ توان خروجی لیزر SAQD ورودی مدار بعدی متصل به لیزر می‌تواند آسیب ببیند و یا دچار نوعی سردرگمی منطقی شود. این امر اهمیت تحلیل لیزرهای SAQD را جهت استفاده در کاربردهای عملی بیش از پیش آشکار می‌کند.

خروجی پایدار حداکثر ۱,۵ برابر بود [۳۵-۳۹]. همچنین در ترانزیستورهای اثر میدان نانولوله کربنی نسبت پیک خروجی به مقدار حالت پایدار ۱,۱ بود [۴۰-۴۱]. در لیزرهای SAQD با توجه به شکل های (۲ a) تا (۴ a) نسبت حداکثر پیک نوسان به مقدار حالت پایدار حدود ۶ است که عدد بسیار بالایی است. در این شرایط دامنه هر یک از این پیکها می‌تواند ورودی مدار بعدی متصل به لیزر SAQD را در روی تراشه های الکترواپتیکی تخریب کند. همچنین این امر می‌تواند باعث نوعی سردرگمی منطقی در مدارات دیجیتال بعدی متصل به لیزر SADQ شود.

#### ۴- نتیجه گیری

با محاسبه و استخراج تابع انتقال لیزر SAQD، این افزاره می‌تواند در بسیاری از شبیه سازیهای مداری نظیر اسپایس استفاده شود. پاسخهای حوزه زمان به همراه معیارهای متنوعی از پایداری نسبی نظیر دیگرامهای نایکوئیست، بود، نیکولز و قطب - صفر به سادگی توسط این تابع انتقال قابل محاسبه و تحلیل هستند. بعنوان یک مثال ساده از استفاده از مدل تابع انتقال پیشنهادی، پاسخ حوزه زمان توان خروجی لیزر به ورودی پله واحد به همراه پایداری نایکوئیستی لیزر SAQD بررسی گردید. تحلیلها نشان می‌دهد که با افزایش طول عمر بازترکیب در

#### مراجع

- [۱] محمد آسیایی، "طراحی رجیستر فایل توان- پایین در فناوری ۹۰ نانومتر CMOS"، مجله مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۴، پاییز ۱۳۹۷، صفحه ۵-۱۱.
- [۲] سعید علیائی، احمد محب زاده، "طراحی و مدل سازی حسگر زیستی مبتنی بر نانو تشدیدگر کریستال فوتونی"، مجله مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۵۱، زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۳۵۱-۳۵۸.
- [۳] بهروز عبدی تهنه، علی نادری، "ساختار جدید ترانزیستور اثر میدانی نانو لوله کربنی تونل زنی با دوپینگ خطی در ناحیه درین: شبیه سازی عددی کوانتومی"، مجله مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۲، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۱۰-۱۷.
- [4] M. Kashiri and A. Asgari, "Modeling of carrier dynamics in InGaAs/GaAs self-assembled quantum dot lasers", Applied optics, Vol. 55, No. 8, 2016, pp. 2042-2048.
- [5] M. H. Yavari and V. Ahmadi, "Circuit-level implementation of semiconductor self-assembled quantum dot laser", IEEE journal of selected topics in quantum electronics, Vol. 15, No. 3, 2009, pp. 774-779.
- [6] M. Grundmann, Nano-optoelectronics, concepts, physics and devices, Springer-Verlag, 1<sup>st</sup> ed., New York, USA, 2002.
- [7] D. Bimberg, M. Grundmann, and N. N. Ledentsov, Quantum dot hetrostructures., John-Wiley, 1<sup>st</sup> ed., New York, USA, 1999.
- [8] Zh. Lin, G. Yuan, M. Yang, L. Guan, and Zh. Wang, "Modeling and simulation of the multi-population quantum-dot lasers based on equivalent circuit", Proceeding of SPIE 10098, Physics and simulation of optoelectronic devices XXV, San Francisco, California, United States, Vol. 10098, No. 19, 2017, pp. 1-11.

- [9] Z. Y. Zhang, A. E. H. Oehler, B. Resan, S. Kurmulis, K. J. Zhou, Q. Wang, M. Mangold, T. Suedmeyer, U. Keller, K. J. Weingarten and R. A. Hogg, "1.55  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs Quantum Dots and High Repetition Rate Quantum Dot SESAM Mode-locked Laser", *Scientific Reports*, Vol. 2, No. 477, 2012, pp. 1-5.
- [10] D. Gready, G. Eisenstein, Ch. Gilfert, V. Ivanov, and J. Peter Reithmaier, "High-Speed Low-Noise InAs/InAlGaAs/InP 1.55- $\mu\text{m}$  Quantum-Dot Lasers", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 24, No. 10, 2012, pp. 809-811.
- [11] A. Y. Liu, Ch. Zhang, J. Norman, A. Snyder, D. Lubyshev, J. M. Fastenau, A. W. K. Liu, C. Gossard, and J. E. Bowers, "High performance continuous wave 1.3  $\mu\text{m}$  quantum dot lasers on silicon" *Applied Physics Letters*, Vol. 104, No. 041104, 2014, pp. 1-11.
- [12] D. Jung, J. Norman, M. J. Kennedy, Ch. Shang, B. Shin, Y. Wan, A. C. Gossard, and J. E. Bowers, "High efficiency low threshold current 1.3  $\mu\text{m}$  InAs quantum dot lasers on on-axis (001) GaP/Si", *Applied Physics Letters*, Vol. 111, No. 122107, 2017, pp. 1-11.
- [13] M. M. Adachi, F. Fan, D. P. Sellan, S. Hoogland, O. Voznyy, A. J. Houtepen, K. D. Parrish, P. Kanjanaboos, J. A. Malen and E. H. Sargent, "Microsecond-sustained lasing from colloidal quantum dot solids", *Nature Communications*, Vol. 6, No. 8694, 2015, pp. 1-15.
- [14] X. Michalet, FF. Pinaud, LA. Bentolila, J. Tsay, S. Doose, JJ. Li, G. Sundaresan, AM. Wu, SS. Gambhir, S. Weiss, "Quantum dots for live cells, in vivo imaging, and diagnostics", *Science*, Vol. 307, No. 5709, 2005, pp. 538-544.
- [15] A. Shinde, R.A Gahlaut, and Sh. Mahamuni, "Low-Temperature Photoluminescence Studies of CsPbBr<sub>3</sub> Quantum Dots", *Journal of Physical Chemistry*, Vol. 121, No. 27, 2017, pp. 14872–14878.
- [16] M. Z. Hu and T. Zhu, "Semiconductor Nanocrystal Quantum Dot Synthesis Approaches Towards Large-Scale Industrial Production for Energy Applications", *Nanoscale Research Letters*, Vol. 10, No. 469, 2015, pp. 1-15.
- [17] D. Piester, A. A. Ivanov, Andrey Bakin, H. H. Wehmann, "Semiconductor Nanostructures for Quantum Wire Lasers", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 4748, 2001, pp. 476-485.
- [18] Ch. Shen, T. Kh. Ng, Ch. Lee, Sh. Nakamura, J. S. Speck, S. P. Denbaars, A. Y. Alyamani, M. M. EL-Desouki, and S. Boon, "Semipolar InGaN quantum-well laser diode with integrated amplifier for visible light communications", *Optics Express*, Vol. 26, No. 6, 2018, pp. A219-A226.
- [19] P. S. Zory, "quantum well lasers", Academic Press, Inc., University of Florida, 1993.
- [20] M. Rosch, G. Scalari, M. Beck and J. Faist, "Octave-spanning semiconductor laser", *Nature Photonics*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-6.
- [21] Q. Li, J. B. Wright, W. W. Chow, T. Shan Luk, I. Brener, L. F. Lester, and G. T. Wang, "Single-mode GaN nanowire lasers", *Optics Express*, Vol. 20, No. 16, 2012, pp. 17873-17879.
- [22] J. Wu, S. Chen, A. Seeds and H. Liu, "Quantum dot optoelectronic devices: lasers, photodetectors and solar cells", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 48, No. 36, 2015, pp. 1-28.
- [23] W. W. Chow, F. Jahnke, "On the physics of semiconductor quantum dots for applications in lasers and quantum optics", *Progress in Quantum Electronics*, Vol. 37, No. 3, 2013, pp. 109-184.
- [24] J. Ho, J. Tatebayashi, S. Sergent, Ch. Fai Fong, Y. Ota, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, "A Nanowire-Based Plasmonic Quantum Dot Laser", *Nano Letters*, Vol 16, No. 4, 2016 pp 2845–2850.
- [25] G. Kurezveil, D. Liang, M. Fiorentino, and R. G. Beausoleil, "Robust hybrid quantum dot laser for integrated silicon photonics", *Optics Express*, Vol. 24, No. 14 2016, pp. 16167-16174.
- [26] Ch. Cheng, F. Yuan, X. Cheng, "Study of an Unsaturated PbSe QD-Doped fiber laser by numerical simulation and experiment", *IEEE journal of quantum electronics*, Vol. 50, No. 11, 2014, pp. 1- 8.
- [27] R. Raghunathan, Y. Li, J. K. Mee, V. Kovanis, L. F. Lester, M. Thomas Crowley, and F. Grillot, "Pulse characterization of passively mode-locked quantum-dot lasers using a delay differential equation model seeded with measured parameters", *IEEE journal of selected topics in quantum electronics*, Vol. 19, No. 4, 2013, pp. 1-12.
- [28] I. V. Koryukin, "Modeling a semiconductor quantum dot laser", 2016 IEEE international conference on laser optics (LO), St. Petersburg, Russia, July 2016, pp. 1-35.



[29] M. Shekarpour, K. Saghafi, M. Jalali, and M. H. Yavari, "Circuit-level implementation of quantum-dot VCSEL", *Optical and quantum electronics*, Vol. 48, No. 355, 2016, pp. 1-13.

[۳۰] امین یاسینی، محمود شریعتی، "مدل سازی و شبیه سازی رفتار کمانشی نانو سیم های سیلیسیم <۱۰۰> و <۱۱۱> با استفاده از روش مکانیک ساخت"، *مجله مدل سازی در مهندسی*، دوره ۱۵، شماره ۵۰، پاییز ۱۳۹۶، صفحه ۸۵-۹۳.

[۳۱] احمد محمدی، "مدل سازی نانوانتینها با روش BOR-FDTD و بررسی تاثیر فاصله بر فلوتورسانس"، *مجله مدل سازی در مهندسی*، دوره یازدهم، شماره ۳۲، بهار ۱۳۹۲، صفحه ۵۷-۶۷.

[۳۲] حسین پرهیزکار، حسین شایقی، "مدل سازی خطوط انتقال تحریک شده بر اثر اصابت صاعقه در حوزه فرکانس"، *مجله مدل سازی در مهندسی*، سال پانزدهم، شماره ۵۰، پاییز ۱۳۹۶، صفحه ۲۳۷-۲۴۴.

[۳۳] سعید ابادری، احمد صادق پیام، "پیاده سازی کنترلر بهینه هوشمند بر مبنای تابع انرژی لیاپانوف عناصر موازی FACTS جهت بهبود پایداری گذرا"، *مجله مدل سازی در مهندسی*، دوره دوازدهم، شماره ۳۹، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۳۱-۴۳.

[۳۴] مهدی درفشیان مرام، نیما امجدی، "جلوگیری از رخداد ناپایداریهای گذرا و ولتاژ با استفاده از یک طرح اقدامات اصلاحی مبتنی بر قطع تولید و حذف بار"، *مجله مدل سازی در مهندسی*، دوره چهاردهم، شماره ۴۶، پاییز ۱۳۹۳، صفحه ۱۳۷-۱۵۰.

[35] S. Haji-Nasiri, M. K. Moravvej-Farshi, and R. Faez, "Stability Analysis in Graphene Nanoribbon Interconnects", *IEEE electron device letters*, Vol. 31, No. 12, 2010, pp. 1458-1460.

[36] 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.

[37] D. Fathi and B. Forouzandeh, "A novel approach for stability analysis in carbon nanotube interconnects", *IEEE electron device letters*, Vol. 30, No. 5, 2009, pp. 475-477.

[38] D. Fathi, B. Forouzandeh, S. Mohajerzadeh, and R. Sarvari "Accurate analysis of carbon nanotube interconnects using transmission line model", *Micro and nano letters*, Vol. 4, No. 2, 2009, pp.116-121.

[39] S. Haji-Nasiri, R. Faez, and M. K. Moravvej-Farshi, "Stability analysis in multiwall carbon nanotube bundle interconnects", *Microelectronic reliability*, Vol. 52, 2012, pp. 3026-3034.

[40] S. Haji-Nasiri and M. K. Moravvej-Farshi, "Stability analysis in CNTFETs", *IEEE electron device letters*, Vol. 34, No. 2, 2013, pp. 301-303.

[41] S. Haji-Nasiri, M. K. Moravvej-Farshi, and R. Faez, "A seamless-pitched graphene nanoribbon field effect transistor", *Physica E: Low-dimensional systems and nanostructures*, Vol. 74, 2015, pp. 414-420