

معرفی یک سیگنال تحریک جدید جهت ارتقای قابلیت اطمینان سوئیچ RF MEMS خازنی

مجید ضرغامی، یاسر مافی نژاد، مهدی ضرغامی و خلیل مافی نژاد

آسانی می‌توانند به داخل دی‌الکتریک نفوذ کرده و در تله‌های موجود در دی‌الکتریک گرفتار شوند [۳] و [۶] تا [۱۰]. در اثر تکرار این فرایند، بارها در داخل دی‌الکتریک به تدریج افزایش یافته و سبب می‌شوند تا ولتاژ لازم برای تحریک سوئیچ تغییر پیدا کند. تغییر ولتاژ تحریک در مدت زمان طولانی باعث می‌شود تا ولتاژ رهاسازی غشا به نقطه زیر صفر منتقل شود. در این حالت با حذف ولتاژ تحریک، غشا همچنان در حالت چسبیده باقی می‌ماند و در نتیجه سوئیچ قابلیت اطمینان خود را از دست می‌دهد. در حالت کلی در موضوع قابلیت اطمینان، بین عملکرد سوئیچ و قابلیت اطمینان مصالح‌های وجود دارد. تعداد زیادی از راه‌حل‌های پیشنهادی نیاز به طراحی مجدد سوئیچ دارند و این سبب می‌شود تا پیچیدگی و هزینه ساخت افزایش یابد. به عنوان مثال، بسته‌بندی کامل یکی از راه‌حل‌های بسیار مفید برای کاهش شارژ دی‌الکتریک است، در حالی که این روش هزینه تولید را بسیار افزایش می‌دهد. بنابراین ارائه راه‌حل‌های بهینه برای کاهش شارژ دی‌الکتریک یک نیاز اساسی است. تعدادی از روش‌های مستند شده برای حداقل کردن شارژ دی‌الکتریک عبارتند از [۶] و [۱۱]:

- اعمال یک سیگنال تحریک دوپالسی تک‌قطبی (سطوح ولتاژ تحریک و پایین نگه‌دارنده متفاوت).
- استفاده از یک ولتاژ دوقطبی به عنوان ولتاژ تحریک.
- استفاده از دی‌الکتریکی با تله‌های بار کمتر.
- اصلاح هندسه دی‌الکتریک (برای مثال ستون‌هایی از دی‌الکتریک به جای استفاده از یک فیلم یک‌پارچه).
- اصلاح هندسه الکتروود (به عنوان مثال جداکردن خطوط RF و DC).

آنچه در شارژ دی‌الکتریک مهم است مجموع زمان تحریک سوئیچ است [۱۲]، بنابراین بهینه‌سازی شکل موج ولتاژ تحریک در زمان تحریک نقش بسیار مهمی را در کاهش شارژ دی‌الکتریک دارد. در این مقاله فرایند شارژ دی‌الکتریک با استفاده از مدل‌های ریاضی و مداری زمان گذرا بررسی و میزان شارژ دی‌الکتریک تحت شکل موج‌های تک‌قطبی گوناگون محاسبه می‌شود. سپس یک سیگنال تحریک بهینه به منظور کاهش شارژ دی‌الکتریک و افزایش طول عمر سوئیچ معرفی می‌شود.

۲- شارژ دی‌الکتریک

انتقال بار به دی‌الکتریک یک پدیده پیچیده است و وابستگی قوی به ترکیبات اجزای سازنده دی‌الکتریک، شرایط لایه نشانی، پاکیزگی سطحی و ابعاد دارد. برای فیلم‌های عایق نازک از رابطه $frenkel - poole$ استفاده می‌شود [۳]، [۶]، [۹]، [۱۲] و [۱۳] که چگالی بار به تله افتاده به صورت نمایی با میدان الکتریکی ایجاد شده ناشی از ولتاژ تحریک ارتباط دارد. با

چکیده: در این مقاله سیگنال تحریک **modified novel dual pulse** به منظور کاهش شارژ دی‌الکتریک در سوئیچ‌های خازنی میکروالکترومکانیکی معرفی شده است. شکل موج پیشنهادی تأثیر به‌سزایی در کاهش شارژ دی‌الکتریک داشته، به گونه‌ای که چگالی بار انباشته شده در دی‌الکتریک را به میزان ۷۲٪ نسبت به شکل موج **dual pulse** کاهش داده است. این در صورتی است که جدیدترین شکل موج معرفی شده (**novel dual pulse**) کاهش به میزان ۵٪ را نشان داده است. بنابراین سوئیچی که توسط شکل موج پیشنهادی تحریک شود طول عمر بیشتری خواهد داشت. برای محاسبه چگالی بار انباشته شده در دی‌الکتریک از دو مدل ریاضی و مداری زمان گذرا استفاده شده که نتایج به دست آمده از هر دو روش، برتری شکل موج پیشنهادی نسبت به شکل موج‌هایی که تاکنون برای تحریک این سوئیچ‌ها معرفی شده‌اند را تأیید می‌کنند.

کلید واژه: سوئیچ، شارژ دی‌الکتریک، سیستم میکروالکترومکانیکی فرکانس رادیویی (RF MEMS)، ولتاژ تحریک.

۱- مقدمه

سوئیچ‌های میکروالکترومکانیکی فرکانس رادیویی به دلیل دارا بودن مشخصات فرکانس بالای خوب مانند تلفات حالت وصل کم و جداسازی حالت قطع بالا، رفتار خطی فوق‌العاده خوب و قابلیت مجتمع شدن با مدارهای الکترونیکی اهمیت فراوانی دارند. بنابراین با توجه به مشخصات عالی این سوئیچ‌ها، کاربردهای فراوانی برای آنها وجود دارد که از جمله کاربردهای آن می‌توان به رادارهای آرایه فاز و سیستم‌های ارتباط ماهواره‌ای و شخصی اشاره کرد. اما با وجود کاربردهای فراوانی که روز به روز نیز بر تعداد آنها افزوده می‌شود، مسئله‌های قابلیت اطمینان درازمدت و بسته‌بندی مانند خزش فلز غشا، **stiction**، خستگی غشا و شارژ دی‌الکتریک از عواملی به شمار می‌آیند که مانع تجاری شدن این سوئیچ‌ها می‌شوند [۱] تا [۵]. برای تحریک سوئیچ‌های خازنی RF MEMS الکترواستاتیک اغلب به ولتاژهای بالا نیاز داریم. با اعمال ولتاژ بالا به یک سوئیچ RF MEMS خازنی که فاصله هوایی آن در حدود چند میکرومتر است، یک میدان الکتریکی از مرتبه 10^6 (V/m) تشکیل می‌شود. زمانی که غشا در موقعیت پایین قرار دارد، در حضور چنین میدان بالایی بارها به

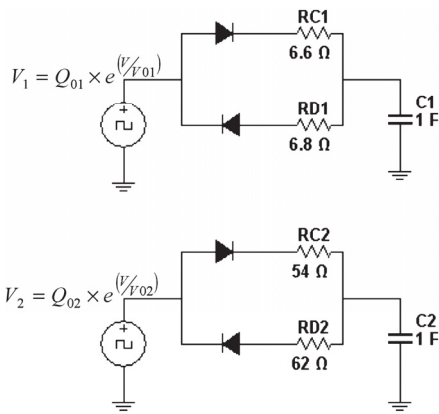
این مقاله در تاریخ ۲۴ بهمن ماه ۱۳۹۰ دریافت و در تاریخ ۱۷ مهر ماه ۱۳۹۱ بازنگری شد.

مجید ضرغامی، مؤسسه آموزش عالی سجاد، بلوار جلال آل احمد، مشهد، (email: majid_zarghami@yahoo.com)

یاسر مافی نژاد، گروه مهندسی برق، مؤسسه آموزش عالی سجاد، بلوار جلال آل احمد، مشهد، (email: y_mafinejad@sadjad.ac.ir)

مهدی ضرغامی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، خیابان دانشگاه، بلوار نخبگان، قزوین، (email: zarghami_mahdi@yahoo.com)

خلیل مافی نژاد، گروه مهندسی برق، مؤسسه آموزش عالی سجاد، بلوار جلال آل احمد، مشهد، (email: khmafinezhad@gmail.com)



شکل ۳: مدل مدار معادل [۳].

جدول ۱: پارامترهای مدل استخراج شده [۳].

J	τ_c (s)	τ_D (s)	Q_j (q/cm ²)	V_j (V)
۱	۶۶	۶۸	$۳,۱ \times 10^{-10}$	۱۳
۲	۵۴	۶۲	$۱,۶ \times 10^{-11}$	۱۵

در اثر انباشته شدن بار در دی الکترونیک، ولتاژ تحریک سوئیچ تغییر پیدا می کند. میزان جابه جایی ولتاژ تحریک به صورت (۳) محاسبه می شود

$$\Delta V = \frac{q h Q}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (3)$$

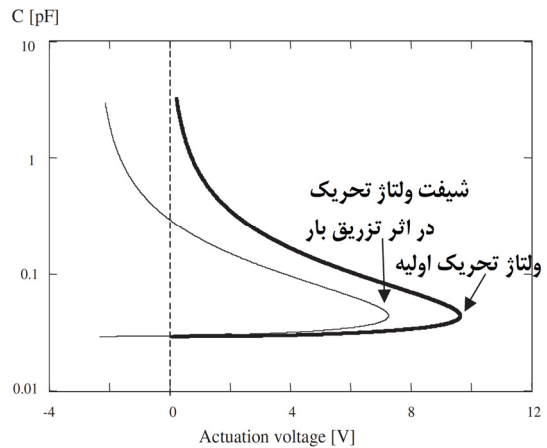
که در آن q بار الکترون ($۱,۶۰۲۱۸ \times 10^{-19}$ کولن)، h فاصله بین صفحه بار به تله افتاده با الکترون پایین، Q میزان پیش بینی شده چگالی بار تزریق شده توسط (۱)، ϵ_r ثابت دی الکترونیک خلأ و ϵ_0 ثابت دی الکترونیک برای دی الکترونیک سوئیچ است.

۳- بررسی روش های متداول تحریک الکترواستاتیکی سوئیچ های خازنی RF MEMS

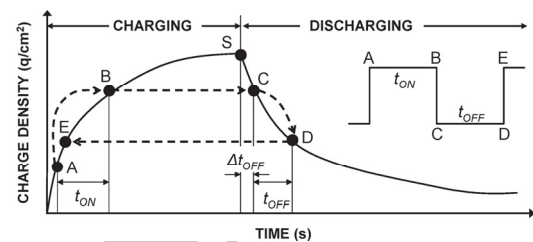
به منظور محاسبه میزان بار انباشته شده در دی الکترونیک تحت شکل موج های پیچیده می توان از دو مدل استفاده کرد: (۱) مدل مدار معادل و (۲) مدل مبتنی بر معادله.

۳-۱ مدل مدار معادل

در این مدل از دو زیرمدار RC برای شبیه سازی شارژ و دشارژ دی الکترونیک استفاده می کنند. شکل ۳ دو مدار RC با ثابت زمانی های مختلف را نشان می دهد و مقادیر مقاومت ها منطبق با این ثابت های زمانی است. مجموع بار انباشته شده در خازن های C1 و C2 میزان بار انباشته شده در دی الکترونیک را نشان می دهد. مقدار منابع ولتاژ توسط (۲) تعیین می شود [۷]. برای تحریک سوئیچ های RF MEMS خازنی با هدف کاهش شارژ دی الکترونیک تا کنون شکل موج های مختلفی معرفی شده است، ولتاژ مربعی نخستین نوع تحریک برای این نوع سوئیچ ها به شمار می رود. در صورت تأمین نیروی لازم برای تحریک سوئیچ توسط ولتاژ اعمالی سوئیچ تحریک می شود. زمانی که ولتاژ اعمالی صفر شود، سوئیچ از حالت تحریک خارج شده و غشا به حالت اولیه خود باز می گردد. شکل موج اعمالی به صورت یک پالس مربعی با دامنه ۳۰ ولت، زمان وظیفه ۵۰٪ و فرکانس ۱۰۰ هرتز است. در تمام شکل موج ها شبیه سازی برای محاسبه چگالی بار انباشته شده و جابه جایی ولتاژ تحریک به مدت زمان ۲۰۰ ثانیه انجام شده و فرکانس و بیشینه دامنه همه شکل موج ها یکسان است. شکل ۴- الف چگالی بار انباشته شده و جابه جایی ولتاژ تحریک



شکل ۱: جابه جایی ولتاژ تحریک و رهاسازی در اثر تزریق بار [۱۲].



شکل ۲: شارژ و دشارژ دی الکترونیک تحت سیگنال تحریک مربعی در طول یک سیکل کاری [۷].

اعمال ولتاژ کنترلی مثبت به سوئیچ، بارهای مثبت به دی الکترونیک تزریق شده و ولتاژ تحریک را کاهش می دهند (بار به عنوان یک ولتاژ ساخته شده داخلی عمل می کند) و در نتیجه ولتاژ رهاسازی غشا به نقطه زیر صفر منتقل می شود (شکل ۱). در این حالت با حذف ولتاژ تحریک، غشا همچنان در حالت چسبیده باقی می ماند [۳] و [۱۲].

شارژ دی الکترونیک در سوئیچ RF MEMS خازنی به دو صورت اصلی شکل می گیرد: (۱) شارژ بدنه در نتیجه تزریق بار به دی الکترونیک از طریق الکترون تحتانی و (۲) شارژ سطحی بر روی سطح دی الکترونیک [۱]. نقطه A در شکل ۲ بیانگر میزان بارهای به تله افتاده ناشی از مراحل قبلی اعمال ولتاژ به سوئیچ است و نقطه E میزان بار انباشته شده در طی یک دوره کاری ولتاژ اعمالی است. اختلاف نقطه های A و E افزایش چگالی بار انباشته شده در داخل دی الکترونیک را نشان می دهد. چگالی بار تزریق شده در دی الکترونیک به صورت (۱) مدل می شود [۸]

$$Q = \sum_{j=1,2,\dots} Q_j \times (1 - e^{-\frac{t_{ON}}{\tau_c}}) \times e^{-\frac{t_{OFF}}{\tau_D}} \quad (1)$$

که در آن Q_j چگالی بار حالت پایدار برای تله نوع J ، τ_c و τ_D ثابت های زمانی شارژ و دشارژ، t_{ON} و t_{OFF} زمان های روشن و خاموش بودن سوئیچ منطبق با زمان های شارژ و دشارژ را نشان می دهند. پدیده های شارژ و دشارژ معمولاً توسط دو مجموعه از ثابت های زمانی شارژ و دشارژ توصیف می شوند. چگالی بار حالت پایدار یک رابطه نمایی با ولتاژ کنترلی دارد که به صورت (۲) مدل می شود [۸]

$$Q_j = Q_{j0} \times e^{\frac{V}{V_{j0}}} \quad (2)$$

که در آن V ولتاژ اعمالی است و Q_{j0} و V_{j0} به عنوان پارامترهای تطبیق مورد استفاده قرار می گیرند. مدل استفاده شده برای سوئیچ همانند مدل [۸] است و مقادیر استخراج شده برای پارامترهای مدل در جدول ۱ گردآوری شده است.

شبهه‌سازی شده و شکل ۴- ب میزان اندازه‌گیری شده جابه‌جایی ولتاژ تحریک در اثر اعمال ولتاژ مربعی را نشان می‌دهد. یکی دیگر از انواع سیگنال تحریک به منظور کاهش شارژ دی‌الکتریک شکل موج DP (شکل ۵- الف) [۹]. زمانی که سوئیچ تحریک می‌شود فاصله بین غشا و الکتروود پایینی نسبت به حالت بدون تحریک کاهش یافته است. در نتیجه به نیروی الکترواستاتیکی کمتری برای ثابت نگه داشتن غشا در همان حالت نیاز است و کاهش نیروی الکترواستاتیک به معنای کاهش ولتاژ مورد نیاز است. شکل ۵- ب میزان بار انباشته‌شده و جابه‌جایی ولتاژ تحریک با استفاده از مدل مدار معادل تحت شکل موج DP و شکل ۵- ج جابه‌جایی ولتاژ تحریک اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، مقدار اندازه‌گیری شده جابه‌جایی ولتاژ تحریک با مقدار شبهه‌سازی شده برای شکل موج‌های مربعی و DP تقریباً برابر است. بنابراین مدل مدار معادل تقریب خوبی از جابه‌جایی ولتاژ تحریک را مشخص می‌کند.

روش تحریکی که اخیراً برای بهبود طول عمر سوئیچ MEMS معرفی شده است NDP نام دارد [۳]. در این روش علاوه بر این که از مزیت روش DP استفاده شده، با به‌کارگیری یک مدار RC ساده (فیلتر پایین‌گذر) میزان بار انباشته‌شده نسبت به اعمال سیگنال DP کاهش یافته است. تغییر شکل موج تنها در قسمت مربوط به زمان تحریک انجام شده است بدین ترتیب که استفاده از مدار RC باعث می‌شود تا ولتاژ تحریک به صورت تدریجی در ابتدای زمان تحریک افزایش یابد. مقادیر R و C به گونه‌ای انتخاب می‌شوند تا تحریک سوئیچ به درستی انجام شود و تأخیری از بابت زمان کلیدزنی وجود نداشته باشد. شکل ۶ سیگنال NDP به همراه چگالی بار انباشته‌شده و جابه‌جایی ولتاژ تحریک برای این شکل موج را نشان می‌دهد. مقایسه‌ای از انباشته‌شدن بار در دی‌الکتریک تحت شکل موج‌های متداول را می‌توان در شکل ۶- ج مشاهده کرد.

۳-۲ مدل مبتنی بر معادله

برای تعیین میزان بار انباشته‌شده در دی‌الکتریک می‌توان از مدل مبتنی بر معادله استفاده کرد. با به‌کارگیری روش تحلیلی میزان تأثیر هر یک از پارامترها در شارژ دی‌الکتریک مشخص می‌شود، بدین ترتیب فرایند طراحی برای دست‌یابی به تکنیک‌های کاهش شارژ دی‌الکتریک آسان‌تر می‌شود. با توجه به دو زیرمدار شکل ۳، در مدت زمان روشن‌بودن سوئیچ در یک دوره کاری خازن از طریق R_C شارژ می‌شود

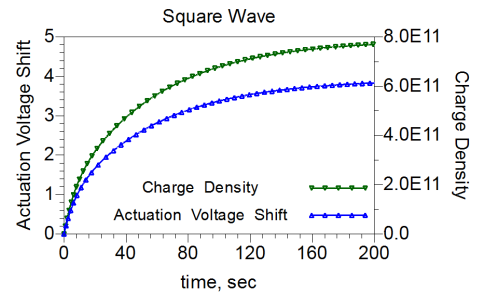
$$Q(t+t_{ON}) = Q_S \cdot (1 - e^{-(t_{ON}/\tau_C)}) + Q(t) e^{-(t_{ON}/\tau_C)} \quad (۴)$$

که در آن Q_S میزان بار تزریقی منبع، $Q(t)$ میزان بار اولیه خازن قبل از زمان روشنی (t_{ON}) است. در مدت زمان خاموشی (t_{OFF}) سوئیچ در دوره کاری، خازن از طریق R_D دشارژ می‌شود. میزان بار باقی‌مانده در دی‌الکتریک پس از طی زمان خاموشی از (۵) به دست می‌آید

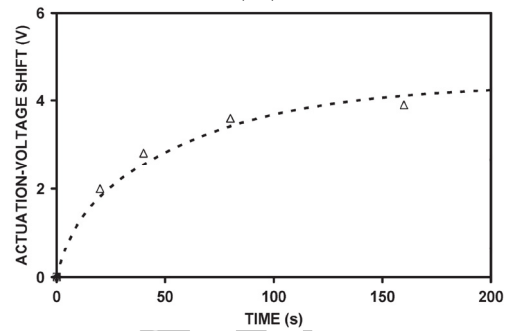
$$Q(t+t_{ON}+t_{OFF}) = Q(t+t_{ON}) e^{-(t_{OFF}/\tau_D)} \quad (۵)$$

زمان‌های روشن و خاموش سوئیچ در حدود میلی‌ثانیه و ثابت زمانی‌های شارژ و دشارژ در حدود چند ثانیه هستند $(t_{ON} \ll \tau_C, t_{OFF} \ll \tau_D)$. برای مقایسه میزان بار انباشته‌شده تحت شکل موج‌های مختلف در مدل مبتنی بر معادله فرض بر این است که برای هر شکل موج یک سوئیچ تازه و بدون هیچ انباشت باری استفاده شده است. در نتیجه میزان بار اولیه سوئیچ صفر بوده، (۴) و (۵) به ترتیب به (۶) و (۷) تبدیل می‌شوند

$$Q(t_{ON}) \cong Q_S \cdot (t_{ON}/\tau_C) \quad (۶)$$

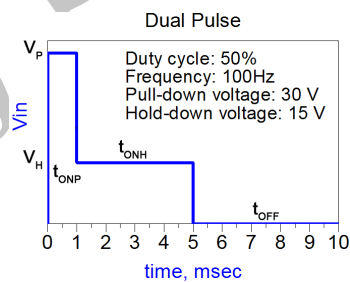


(الف)

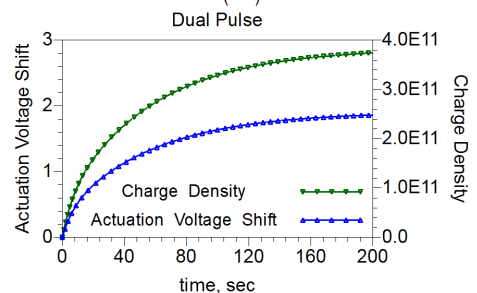


(ب)

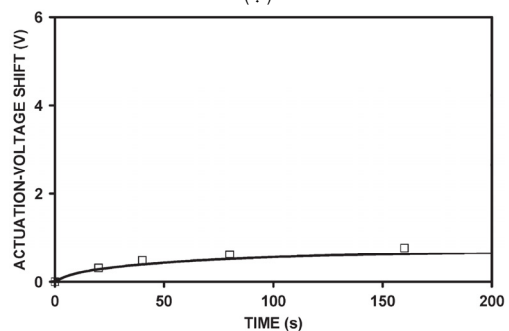
شکل ۴: (الف) چگالی بار انباشتی و جابه‌جایی ولتاژ تحریک شبهه‌سازی شده در اثر اعمال پالس مربعی و (ب) جابه‌جایی ولتاژ تحریک اندازه‌گیری شده در نتیجه پالس مربعی [۷].



(الف)

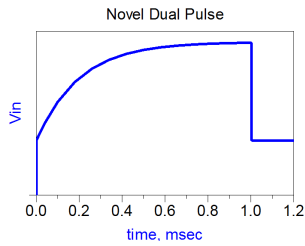


(ب)

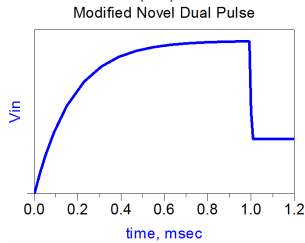


(ج)

شکل ۵: (الف) شکل موج DP [۹]، (ب) چگالی بار انباشتی و جابه‌جایی ولتاژ تحریک شبهه‌سازی شده در اثر اعمال پالس DP و (ج) جابه‌جایی ولتاژ تحریک اندازه‌گیری شده در نتیجه پالس DP [۷].



(الف)



(ب)

شکل ۷: (الف) شکل موج NDP در زمان تحریک [۳] و (ب) شکل موج پیشنهادی در زمان تحریک.

بیشینه بار تزریقی در زمان تحریک و سایر پارامترها همانند شکل موج DP است. در این روش میزان بار تزریقی منبع همانند روش‌های قبلی ثابت نیست و میزان بار تزریقی منبع به صورت (۱۰) است

$$Q_S = Q_H + (Q_P - Q_H)(1 - e^{-(t_{ONP}/\tau_C)}) \quad (10)$$

میزان بار انباشته‌شده در اثر اعمال این شکل موج به صورت (۱۱) است

$$Q(t_{ONP} + t_{ONH}) \cong Q_P \cdot (t_{ON}/\tau_C) - \Delta Q \cdot (t_{ONH}/\tau_C) - \Delta Q \cdot e^{-(t_{ONP}/\tau_C)} \cdot (t_{ONP}/\tau_C) \quad (11)$$

روابط تحلیلی نیز نشان می‌دهند کمترین میزان انباشتگی بار در میان شکل موج‌های متداول به ازای شکل موج NDP حاصل می‌شود.

۴-۱ سیگنال تحریک MODIFIED NDP

شکل موج‌های DP و NDP از پالس‌هایی با زمان‌های وظیفه ۱۰٪ و ۵۰٪ ایجاد شده‌اند. این زمان‌ها یک مقدار اولیه را در ولتاژ اعمالی به وجود می‌آورند. با حذف ولتاژ اولیه می‌توان به شکل موج modified NDP دست یافت که میزان بار انباشته‌شده کمتری را نتیجه خواهد داد. تفاوت شکل موج NDP با modified NDP در مقدار اولیه آن است (شکل ۷).

۴-۱-۱ مدل مدار معادل

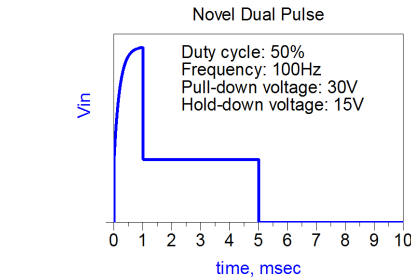
مدل مدار معادل برای محاسبه میزان بار انباشته‌شده در دی‌الکتریک در اثر اعمال شکل موج پیشنهادی، میزان بار انباشته‌شده در دی‌الکتریک به همراه جابه‌جایی ولتاژ تحریک و تفاوت بار انباشته‌شده در اثر اعمال DP و modified NDP در شکل ۸ نشان داده شده است.

۴-۲ مدل مبتنی بر معادله

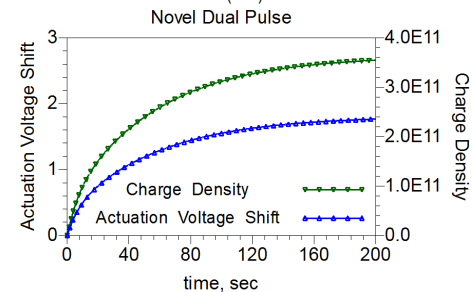
مدل مدار معادل کمترین میزان انباشتگی بار به ازای اعمال سیگنال modified NDP در میان شکل موج‌های متداول را تأیید می‌کند. برای محاسبه میزان بار انباشته‌شده به صورت تحلیلی از مدل مبتنی بر معادله استفاده می‌شود و رابطه بار تزریقی منبع به فرم (۱۲) است

$$Q_S = Q_P \cdot (1 - e^{-(t_{ONP}/\tau_C)}) \quad (12)$$

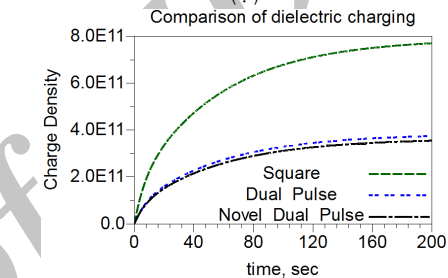
با استفاده از (۶) میزان بار انباشته‌شده در زمان روشنی سوئیچ به صورت پارامتری در (۱۳) مشخص می‌شود



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶: (الف) شکل موج NDP [۳]، (ب) چگالی بار انباشته‌شده و جابه‌جایی ولتاژ تحریک در اثر اعمال NDP و (ج) مقایسه چگالی بار انباشته‌شده در اثر اعمال موج مربعی، DP و NDP.

$$Q(t_{ON} + t_{OFF}) \cong Q(t_{ON})(1 - (t_{OFF}/\tau_D)) \quad (7)$$

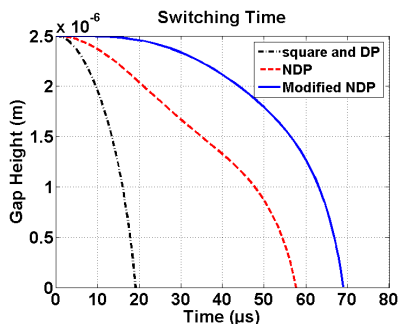
در شکل موج‌های مورد بررسی با توجه به این که تفاوت این شکل موج‌ها در مدت زمان روشن بودن سوئیچ است، بنابراین با محاسبه میزان بار انباشته‌شده در همین مدت زمان می‌توان میزان تأثیر این شکل موج‌ها را در شارژ دی‌الکتریک به وضوح مشاهده کرد. با اعمال موج مربعی مقدار بار انباشته‌شده در یک دوره کاری به صورت (۸) قابل محاسبه است

$$Q(t_{ON}) \cong Q_P \cdot (t_{ON}/\tau_C) \quad (8)$$

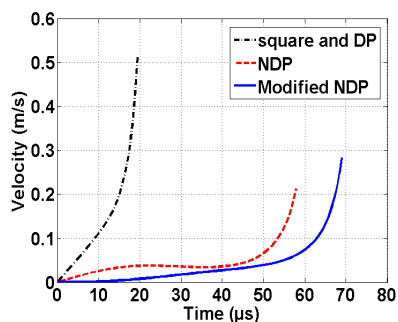
در روش تحریک به صورت سیگنال DP میزان بار تزریقی منبع در زمان تحریک (t_{ONP}) برابر Q_P و در زمان ثابت نگه داشتن غشا در حالت تحریک (t_{ONH}) برابر Q_H است. مجموع زمان تحریک و زمان ثابت نگه داشتن غشا در حالت تحریک برابر با مدت زمان روشنی سوئیچ در حالت اعمال ولتاژ مربعی است. با توجه به (۸) می‌توان با انجام تحلیل‌هایی میزان بار انباشته‌شده در مدت زمان روشنی سوئیچ را برای شکل موج DP به صورت (۹) محاسبه کرد $(Q_P - Q_H = \Delta Q)$ و $(t_{ONP} + t_{ONH} = t_{ON})$

$$Q(t_{ONP} + t_{ONH}) \cong Q_P \cdot (t_{ON}/\tau_C) - \Delta Q \cdot (t_{ONH}/\tau_C) \quad (9)$$

با مقایسه (۸) و (۹) می‌توان نتیجه گرفت در اثر اعمال ولتاژ DP میزان بار انباشته‌شده در زمان روشنی سوئیچ به اندازه $\Delta Q \cdot (t_{ONH}/\tau_C)$ نسبت به اعمال ولتاژ مربعی کاهش یافته است. در شکل موج NDP، Q_P میزان



شکل ۹: تأثیر شکل موج سیگنال تحریک بر روی زمان کلیدزنی.



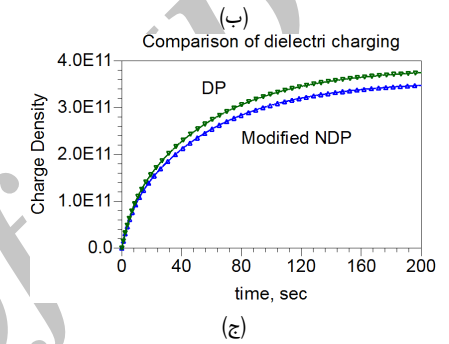
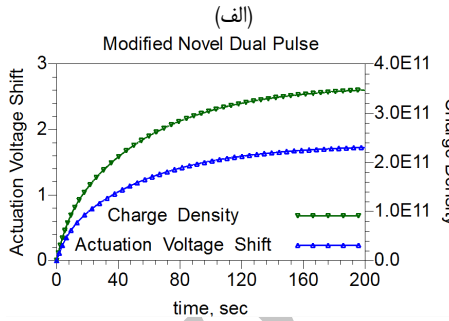
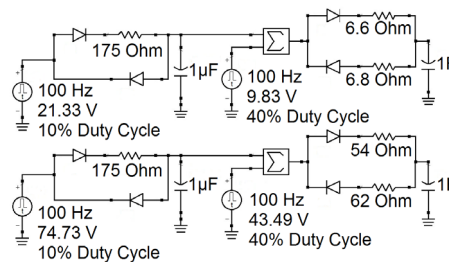
شکل ۱۰: سرعت غشا تحت سیگنال‌های تحریک مختلف.

حدود ۲٫۵ میکرومتر است. در شکل موج‌های مربعی و DP، بیشینه دامنه ولتاژ به صورت آبی اتفاق می‌افتد در حالی که در شکل موج‌های NDP و modified NDP دامنه ولتاژ به صورت تدریجی افزایش می‌یابد. بنابراین در شکل موج‌هایی که دامنه ولتاژ به صورت تدریجی افزایش می‌یابد و همان طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، غشا در مدت زمان بیشتری تحریک شده و زمان کلیدزنی طولانی‌تر می‌شود. اما برای محاسبه زمان کلیدزنی، باید مدت زمان لازم برای ثابت شدن غشا بر روی دی‌الکتریک را در نظر گرفت. بالا بودن سرعت برخورد غشا با دی‌الکتریک سبب می‌شود تا غشا در همان لحظه برخورد بر روی دی‌الکتریک ثابت نشده و پس از چندین بار برخورد بر روی دی‌الکتریک ثابت شود. شکل ۱۰ میزان سرعت غشا در بازه زمانی تحریک را نشان می‌دهد.

همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، سرعت برخورد غشا با دی‌الکتریک تحت سیگنال‌های NDP و modified NDP در حدود ۵۰٪ کمتر از سیگنال‌های مربعی و DP است. بنابراین اگرچه زمان برخورد غشا با دی‌الکتریک در شکل موج‌های NDP و modified NDP بیشتر است، اما به دلیل پایین بودن سرعت برخورد، غشا در مدت زمان کمتری بر روی دی‌الکتریک ثابت می‌شود. علاوه بر این، در این شکل موج‌ها به دلیل کاهش سرعت برخورد غشا آسیب‌های ناشی از ضربه نیز کاهش می‌یابند. مقایسه‌ای از عملکرد سیگنال تحریک modified NDP در کنار سایر سیگنال‌های تحریک معرفی شده قبلی در جدول ۲ آمده است. واضح است که با شکل موج پیشنهادی بار کمتری در دی‌الکتریک سوئیچ RF MEMS خازنی انباشته شده که سبب می‌شود تا ولتاژ تحریک کمتر جابه‌جا شده و در نتیجه قابلیت اطمینان سوئیچ افزایش یابد.

۶- نتیجه گیری

برای محاسبه میزان جابه‌جایی ولتاژ تحریک ناشی از انباشته شدن بار در دی‌الکتریک از مدل‌های ریاضی و مداری زمان گذرا استفاده می‌شود. سیگنال‌های تحریک مختلفی برای کاهش شارژ دی‌الکتریک معرفی شده‌اند که هر یک به نحوی میزان بار تزریقی منبع را کاهش داده‌اند.



شکل ۸: (الف) مدل مدار معادل شکل موج modified NDP، (ب) چگالی بار انباشته شده و جابه‌جایی ولتاژ تحریک در اثر اعمال modified NDP و (ج) مقایسه میزان بار انباشته شده در اثر اعمال شکل موج DP و شکل موج پیشنهادی.

$$Q(t_{ONP} + t_{ONH}) \cong Q_P \cdot (t_{ON} / \tau_C) - \Delta Q \cdot (t_{ONH} / \tau_C) - Q_P \cdot e^{-(t_{ONP} / \tau_C)} \cdot (t_{ONP} / \tau_C) \quad (۱۳)$$

با مقایسه (۹) و (۱۳) می‌توان نتیجه گرفت در روش پیشنهادی بار انباشته شده کمتری به میزان $Q_P \cdot e^{-(t_{ONP} / \tau_C)} \cdot (t_{ONP} / \tau_C)$ حاصل می‌شود که به لحاظ عددی به معنای ۷٫۲٪ کاهش در چگالی بار انباشته نسبت به روش DP است.

۵- بررسی رفتار دینامیکی سوئیچ تحت شکل موج‌های مختلف

زمان کلیدزنی مربوط به تحلیل دینامیک غیر خطی سوئیچ است، به همین منظور از یک مدل ریاضی توصیف‌کننده رفتار دینامیکی سوئیچ استفاده می‌شود. معادله حرکت ساده شده برای تحلیل رفتار دینامیکی غشا به صورت (۱۴) است [۱]، [۳] و [۱۴]

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = \frac{1}{2} \frac{\epsilon \cdot AV^2}{g^3} \quad (۱۴)$$

که در آن x میزان جابه‌جایی غشا، m جرم غشا، k ثابت فنر، ϵ گذردهی خلأ، A ناحیه تحریک، V ولتاژ اعمالی و g ارتفاع غشا در بالای الکتروود تحریک است. شکل ۹ پاسخ حوزه زمانی سوئیچ تحت شکل موج‌های مختلف را نشان می‌دهد.

در شکل ۹ پاسخ دینامیکی سوئیچ تنها در بازه زمانی تحریک مورد بررسی قرار گرفته است. فاصله شکاف هوایی بین غشا و دی‌الکتریک در

جدول ۲: مقایسه عملکرد سیگنال‌های تحریک مختلف.

سیگنال تحریک	$Q_{MAX} (q/cm^2)$	$\Delta V (V)$	Switching Time (μs)	Velocity (m/s)
Square [۷]	$7,703 \times 10^{-11}$	۳,۸۳۳	۱۹	۰,۵۱
Dual Pulse [۳]	$3,743 \times 10^{-11}$	۱,۸۶۲	۱۹	۰,۵۱
Novel Dual Pulse [۳]	$3,545 \times 10^{-11}$	۱,۷۶۴	۵۷,۵	۰,۲۲
سیگنال تحریک پیشنهادی	$3,474 \times 10^{-11}$	۱,۷۳۹	۶۹	۰,۲۸

IEEE/MTT-S Int. Microwave Symp. Digest, vol. 3, pp. 1943-1946, 6-11 Jun. 2004.

- [11] C. L. Goldsmith, D. Forehand, Z. Peng, J. C. M. Hwang, and I. L. Ebel, "High-cycle life testing of RF MEMS switches," *IEEE/MTT-S Int. Microwave Symp. Digest*, pp. 1805-1808, 3-8 Jun. 2007.
- [12] W. M. Spengen, R. Puers, R. Mertens, and I. D. Wolf, "A comprehensive model to predict the charging and reliability of capacitive RF MEMS switches," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 14, no. 4, pp. 514-521, Jan. 2004.
- [13] S. Melle, D. De Conto, D. Dubuc, K. Grenier, O. Vendier, J. L. Muraro, J. L. Cazaux, and R. Plana, "Reliability modeling of capacitive RF MEMS," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 11, pp. 3482-3488, Nov. 2005.
- [14] V. Kaajakari, "Closed form expressions for RF MEMS switch actuation and release time," *Electronics Letters*, vol. 43, no. 3, pp. 149-150, Jan. 2009.

مجید ضرغامی تحصیلات خود را در مقاطع کاردانی و کارشناسی ارشد الکترونیک به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۹۰ از موسسه‌ی آموزش عالی سجاد مشهد و در مقطع کارشناسی ناپیوسته‌ی الکترونیک در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه آزاد اسلامی قزوین به پایان رسانده است و هم‌اکنون عضو گروه تحقیقاتی MEMS موسسه‌ی آموزش عالی سجاد مشهد می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: قابلیت اطمینان سوئیچ‌های RF MEMS، طراحی سوئیچ‌های NEMS مبتنی بر گرافن و طراحی مدارات فرکانس بالا.

یاسر مافی‌نژاد مدرک کارشناسی الکترونیک خود را در سال ۱۳۸۵ از موسسه آموزش عالی سجاد مشهد و کارشناسی ارشد میکروالکترونیک خود را در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه Deakin استرالیا گرفته است. در حال حاضر ایشان موفق به اخذ بورسیه دانشگاه Deakin در مقطع دکتری شده است. زمینه تحقیقاتی ایشان RF MEMS و Meta material می‌باشد.

مهدی ضرغامی تحصیلات دانشگاهی خود را از سال ۱۳۸۹ آغاز کرده است و هم‌اکنون در مقطع کارشناسی برق-کنترل دانشگاه آزاد اسلامی قزوین مشغول به تحصیل می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان کنترل ربات (NPC) است.

خلیل مافی‌نژاد مدرک کارشناسی مخابرات خود را در سال ۱۳۵۱ از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی و کارشناسی ارشد و دکتری خود را از مدرسه‌ی عالی دولتی پاریس (ENST) به ترتیب در سال‌های ۱۳۵۷ و ۱۳۶۰ به پایان رسانده است. از آن زمان تا سال ۱۳۹۱ عضو هیأت علمی دانشگاه فردوسی بوده و در این سال با درجه‌ی استادی بازنشسته گردید و از آن زمان عضو هیأت علمی موسسه‌ی آموزش عالی سجاد مشهد می‌باشد. دکتر مافی‌نژاد دبیر دوازدهمین و رئیس بیست و یکمین کنفرانس مهندسی برق ایران در دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد. زمینه‌های مورد علاقه‌ی ایشان مدارهای فرکانس بالا (RF، MEMS) و تقویت‌کننده‌های قدرت فرکانس بالا است.

استفاده از شکل موج‌هایی که به صورت پالس دوتایی هستند چگالی بار انباشتی در دی‌الکترونیک را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهند. شکل موج پیشنهادی که در مجموعه پالس‌های دوتایی قرار می‌گیرد، چگالی بار انباشتی در دی‌الکترونیک را به میزان ۷۲٪ نسبت به شکل موج DP کاهش داده، در حالی که جدیدترین شکل موج معرفی شده تحت عنوان NDP کاهش به میزان ۵٪ را نسبت به شکل موج DP نتیجه داده است، بنابراین در روش پیشنهادی قابلیت اطمینان سوئیچ افزایش می‌یابد. در سیگنال‌های تحریک NDP و modified NDP به دلیل کاهش سرعت برخورد غشا با دی‌الکترونیک، غشا در مدت زمان کمتری بر روی دی‌الکترونیک ثابت می‌شود. بنابراین کاهش زمان نشست افزایش زمان کلیدزنی را جبران خواهد کرد.

مراجع

- [1] G. M. Rebeiz, *RF MEMS Theory, Design, and Technology*, John Wiley & Sons Inc., 2003.
- [2] C. Goldsmith, J. Maciel, and J. McKillop, "Demonstrating reliability," *Microwave Magazine, IEEE*, vol. 8, no. 6, pp. 56-60, Dec. 2007.
- [3] W. S. H. Wong and C. H. Lai, "Longer MEMS switch lifetime using novel dual-pulse actuation voltage," *Device and Materials Reliability, IEEE Trans. on*, vol. 9, no. 4, pp. 569-575, Dec. 2009.
- [4] R. W. Herfst, P. G. Steeneken, H. G. A. Huizing, and J. Schmitz, "Center-shift method for the characterization of dielectric charging in RF MEMS capacitive switches," *IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing*, vol. 21, no. 2, pp. 148-153, May 2008.
- [5] R. W. Herfst, *Degradation of RF MEMS Capacitive Switches*, Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands, 2008.
- [6] A. L. Hartzell, M. G. da Silva, and H. R. Shea, *MEMS Reliability*, 2011.
- [7] X. Yuan, Z. Peng, J. C. M. Hwang, D. Forehand, and C. L. Goldsmith, "A transient SPICE model for dielectric-charging effects in RF MEMS capacitive switches," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 53, no. 10, pp. 2640-2648, Oct. 2006.
- [8] X. Yuan, J. C. M. Hwang, D. Forehand, and C. L. Goldsmith, "Modeling and characterization of dielectric-charging effects in RF MEMS capacitive switches," in *Proc. IEEE/MTT-S Int. Microwave Symp. Digest*, pp. 753-756, 12-17 Jun. 2005.
- [9] C. L. Goldsmith, J. Ehmke, A. Malczewski, B. Pillans, S. Eshelman, Z. Yao, J. Brank, and M. Eberly, "Lifetime characterization of capacitive RF MEMS switches," *IEEE/MTT-S Int. Microwave Symp. Digest*, vol. 1, pp. 227-230, May 2001.
- [10] X. Yuan, S. V. Cherepko, J. C. M. Hwang, C. L. Goldsmith, C. Nordquist, and C. Dyck, "Initial observation and analysis of dielectric-charging effects on RF MEMS capacitive switches,"