
The design and fabrication of a plasma limiter to protect communication systems

A. bali^{1*}, M. R. Alizadeh Pahlavani², H. fayazi³

* University of Electrical and Computer Complex, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 24/05/2021; Accepted: 07/08/2021)

Abstract

The energy from electromagnetic pulses causes disruptions and sometimes failure in the performance of the electronic systems used in radars and communications equipment such as the ELINT system. The rate of influence of high-powered electromagnetic waves and their electric fields on the equipment depends on two parameters: the intensity of the electric field and the target coating method. The plasma is a means of protection against electromagnetic threats. When an electromagnetic pulse is propagated through a plasma limiter, the charge particles accelerate, and the magnetic field generated by the electromagnetic wave can change the state of the gas to plasma. In this paper, the design theory of a plasma limiter based on a new structure at 1.8 to 2.8 GHz is presented. By introducing various power generation sources, numerical analysis, simulation and optimization is carried out for the plasma limiter and the prototype of plasma limiter intended to protect the ELINT receiver in the frequency range of 1.8 to 2.8 GHz at 1200 and 1800 w is tested. The measured results show that the return loss is better than -10 dB at 1.8 to 2.8 GHz. After optimization, the value of h is obtained in 19 mm and the value of n is found to be about 46 mm, which in the constructed sample, we place it at 47 mm, exactly in the center. The laboratory results during high power pulses show an excellent agreement with respect to the finite element method.

Keywords: Electromagnetic waves, protection systems, High power pulse, Plasma Limiter.

* Corresponding author E-mail: a_bali@mut.ac.ir

طراحی و ساخت محدودساز پلاسمایی به منظور محافظت از سامانه‌های مخابراتی

عارف بالی^{۱*}، محمدرضا علیزاده پهلوانی^۲، حسین فیاضی^۳

۱- استادیار، ۲- دانشیار، ۳- مربی، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۳، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۶)

چکیده

انرژی پالس‌های الکترومغناطیسی باعث اختلال و از کار افتادگی سامانه‌های الکترونیکی به کار رفته در رادارها و تجهیزات ارتباطی نظیر سامانه الینت می‌شوند. میزان نفوذ امواج الکترومغناطیسی توان بالا و میدان‌های الکتریکی آن بر تجهیزات به دو مؤلفه شدت میدان الکتریکی و نحوه پوشش هدف بستگی دارد. پلاسمای یکی از راه‌های محافظت در برابر تهدیدات الکترومغناطیس می‌باشد. هنگامی که پالس الکترومغناطیسی در محدودساز پلاسمایی پخش می‌شود، ذرات بار شتاب می‌گیرند و میدان مغناطیسی ناشی از موج الکترومغناطیسی حادث شده، می‌تواند حالت گاز را به پلاسمای تغییر دهد. در این مقاله، تئوری طراحی یک محدودساز پلاسمایی در در محدوده فرکانسی ۱/۸ تا ۲/۸ گیگاهرتز با ساختاری جدید نشان داده شده است. با معرفی انواع منابع ایجاد توان به تحلیل عددی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی محدودساز پلاسمایی پرداخته شده و نمونه اولیه محدودساز پلاسمایی برای حفاظت از گیرنده الینت در توان ۱۲۰۰ وات و ۱۸۰۰ وات مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج اندازه‌گیری شده، ضریب بازتاب از پورت ورودی را کمتر از ۱۰- دسی‌بل در بازه فرکانس کاری نشان می‌دهد. پس از بهینه‌سازی مقدار h در ۱۹ میلی‌متر و مقدار n حدود ۴۶ میلی‌متر به دست آمد که در نمونه ساخته شده ما آن را ۴۷ میلی‌متر یعنی دقیقاً در مرکز قرار دادیم. نتایج آزمایشگاهی به هنگام وقوع پالس‌های توان بالا همگرایی بالایی با نتایج روش اجزا محدود را نشان می‌دهد.

کلید واژه: امواج الکترومغناطیسی، حفاظت سامانه‌ها، پالس توان بالا، محدودساز پلاسمایی

۱. مقدمه

روش‌های مختلفی مانند لیزر، مولدهای تقویت‌کننده تولید می‌شوند [۱] همچنین ممکن است از نوع پالس‌های الکترومغناطیسی ناشی از انفجار مانند ارتفاع بالا^۱ باشند [۲]. ممکن است از موادی برای حفاظت از تجهیزات الکترونیک استفاده شود، اثربخشی مواد محافظ در برابر پالس‌های الکترومغناطیسی بررسی و برای فراهم آوردن الزامات و اثربخشی مواد محافظ، تست اثربخشی مواد در حوزه زمان در برابر تخلیه الکترواستاتیکی^۲ ESD و پالس الکترومغناطیسی ارائه شد [۳]. نفوذ میدان‌های مربوط به پالس‌های الکترومغناطیسی^۳ EMP به اتاقک محافظ فلزی با یک شکاف مورد بررسی قرار گرفته و اثربخشی حفاظ با اندازه‌های مختلف با روش دیفرانسیل محدود حوزه زمان محاسبه شد [۴]. تست حوزه زمان اثربخشی مواد حفاظتی در مقابل پالس‌های الکترومغناطیسی انجام شده است [۵] همچنین تکنولوژی‌های حفاظت در برابر EMP و روش تشخیص پالس الکترومغناطیسی بررسی و تشریح گردید [۶].

از جمله مهم‌ترین تهدیداتی که برای تجهیزات الکترونیکی وجود دارد، ضربات الکترومغناطیسی با توان بالا است که می‌تواند در کسری از ثانیه میدان الکتریکی بالایی در کلیه تجهیزات پیرامون خود ایجاد نماید که موجب ایجاد اختلال در عملکرد آنها شود. در جنگ‌های مدرن آینده یک سلاح الکترومغناطیسی می‌تواند بسیاری از سامانه‌های نظامی دشمن را بدون ایجاد تلفات از کار بیندازد برای مثال، این سلاح می‌تواند سامانه کنترلی یک خودرو را از کار بیاندازد و یا سامانه‌های هدف‌گیری موشک‌های مختلف را از کار بیاندازد و یا اینکه سامانه‌های ارتباطی بین خطوط دشمن را به کلی از کار بیاندازد و همچنین می‌تواند سامانه‌های ناوبری و انتقال برق را از رده خارج کند و یا حسگرهای برد بلند و برد کوتاه را مختل سازد.

آشنای با انواع روش‌هایی که ممکن است برای تجهیزات ما خطر ایجاد شود ضروری می‌باشد، پالس‌های الکترومغناطیسی از

^۱ high-altitude electromagnetic pulse (HEMP)

^۲ Electrostatic Discharge

^۳ electromagnetic pulse

شدن و تغییر جهت انتقال شود [۱۷]. مطالعاتی در مورد تأثیر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر CNT انجام شده است [۱۸].

فرستنده‌ها، گیرنده‌ها و دیگر اجزاء سامانه‌ها مورد هدف امواج الکترومغناطیسی پرقدرت و میدان‌های ناشی از آن قرار گرفته و باعث آسیب گذرا و اثرات موقت یا دایم روی تعدادی از منابع می‌شوند. منابع اولیه جمع‌کننده انرژی امواج الکترومغناطیسی پرقدرت، آنتن‌ها، خطوط انتقال و تمام اتصالات و المان‌های مختلف هستند. در درجه اول گیرنده‌ها، تنظیم‌کننده‌ها و سپس بخش‌های پردازشی و عملگرها آسیب می‌بینند. در صورت استفاده از محفظه فلزی کامل برای اطراف تجهیزات، حفاظت کافی برای جلوگیری از آسیب امواج الکترومغناطیسی پرقدرت و میدان‌های ناشی از آن فراهم شود اما در مورد تجهیزات گیرنده مانند اینت چون کار آنتن گیرندگی است انجام چنین کاری ممکن نیست. محدودساز پلاسمایی یک قطعه برای محدود کردن امواج با توان بالا است و یکی از راه‌های حفاظت تجهیزات سامانه‌های مشابه اینت در برابر امواج پرقدرت الکترومغناطیسی است.

پلاسمای مدت زیادی است که در حوزه فیزیک و مهندسی مورد مطالعه قرار گرفته است و نتایج حاصل از این مطالعات امروزه در بسیاری از صنایع به‌طور عملی به‌کار می‌رود. به‌صورت کلی نگهداری از سامانه‌های الکترونیکی در برابر پالس‌های الکترومغناطیسی با روش‌های متفاوتی از قبیل: جداسازی زیرسامانه‌ها، رعایت اصول زمین کردن، استفاده از پوشش مناسب، متوقف کردن جریان‌ها و ... را دارد که در برخی موارد مانند رادارها، آنتن‌ها، فرستنده‌ها و گیرنده‌ها قابل استفاده نیستند و تنها روش‌هایی مانند استفاده از پلاسمای می‌تواند برای مقابله با سلاح‌های الکترومغناطیس استفاده شود که در این پژوهش به تفضیل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

هدف از طراحی محدودساز پلاسمایی حفاظت از سامانه‌های ارتباطی در برابر پالس‌های الکترومغناطیسی می‌باشد. طراحی باید به گونه‌ای باشد که کمترین اتلاف را در حالت کارکرد عادی داشته باشیم. روش انجام طراحی دارای مراحل مختلفی می‌باشد، ابتدا با توجه به محدودیت‌های جایابی و باند فرکانسی، محدوده ابعاد استاندارد موج‌بر استاندارد استخراج شده است و با شبیه‌سازی هندسه و توجه به میدان الکتریکی برای شکست گاز، محدوده ابعاد کوچک‌تر گردید، در نهایت با بهینه‌سازی، طراحی بهینه انجام شد. صحت‌سنجی کار با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و نمونه ساخته شده همچنین مقایسه با نمونه‌های مشابه صورت

فانگ و همکاران [۷] به شبیه‌سازی مشخصه‌های حفاظ و از بین رفتن یک نوع دریچه موج‌بر برای EMP پرداختند. آنها ضمن توصیف هندسه مورد نظر، مش‌بندی دریچه موج‌بر را انجام داده و میدان الکتریکی برحسب زمان را در نقاط مختلف استخراج کردند. مطالعه نظری و آزمایشگاهی اثرات تزویج پالس الکترومغناطیسی روی کابل محافظ بررسی شده و تحلیل اثر تزویج در شرایط مختلف انجام شده است [۸].

شناخت روش‌های تست و اثربخشی مرحله مهمی می‌باشد، روش‌های تست درزگیر تداخل الکترومغناطیسی (EMI^۱) و توسعه روش‌های مختلف تست و ارزیابی درجه اثربخشی درزگیر EMI نیز موضوع مهمی است [۹]. مواد مختلفی ممکن است در تجهیزات حفاظتی استفاده شوند، بانو و همکاران به تحلیل اثر بخشی مواد کامپوزیتی با گذردهی منفی برای پالس‌های الکترومغناطیسی مختلف پرداختند و ضمن استفاده از روش دیفرانسیل محدود حوزه زمان، اطلاعات را با داده‌های تجربی دیگر مقایسه کردند و مفید بودن مواد کامپوزیتی در حوزه الکترومغناطیسی را تأیید کردند [۱۰].

در مقابله با EMP سه عامل جهت قطبش موج حادث شده، شکل دهانه و دهانه آرایه برای تحلیل اثربخشی محفظه اتاقک بررسی شده است [۱۱]. شبیه‌سازی تزویج پالس الکترومغناطیسی با مدارات محافظ موضوع مهمی است که از روش‌هایی مانند نفوذ یک سیم با یک روزنه و استفاده از روش دیفرانسیل محدود حوزه زمان برای شبیه‌سازی پالس الکترومغناطیسی با جریان تداخل تحریک شده محقق شده است و شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که سیم نفوذکننده می‌تواند تا حد زیادی جریان تداخل تحریک شده در مدارها را افزایش دهد، افزایش طول سیم و زاویه وقوع EMP هر دو تأثیر قابل‌توجهی در جریان تداخل دارند [۱۲].

روش‌های مختلفی برای حفاظت از گیرنده‌های ارتباطی وجود دارد، یکی از روش‌های کارآمد جهت حفاظت، استفاده از محدودسازهای پلاسمایی است. از الکترودهای سوزنی برای افزایش شدت میدان محلی در موج‌بر [۱۳-۱۴] استفاده شد. مواد استفاده شده در سوزن‌ها باعث بهبود ویژگی‌های الکتریکی، مکانیکی و حرارتی مانند هدایت بالا و پایداری حرارتی می‌شود [۱۵-۱۶]. اگر پین‌ها از جنس CNT انتخاب شوند، صفحه پلاسمایی ایجاد شده در طی این فرآیند می‌تواند باعث تقویت پالس مغناطیسی، کاهش حداکثر توان مورد نیاز برای پلاسمای

^۱ Electromagnetic interference

می‌شود. ژنراتورهای MHD انرژی داخلی یک گاز را مانند یک توربو ژنراتور به توان الکتریکی تبدیل می‌کنند [۲۱].

۲-۳. منابع میکروویو توان بالا

منابع میکروویو توان بالا (HPM^3) به دلیل احتمال زیاد اصابت به هدف در مقایسه با سلاح‌های معمولی (زیرا با انتشار پرتو تابشی RF موج به کل هدف می‌تابد و نیازی به هدف‌گیری دقیق نیست)، وابستگی کمتر به شرایط جوی، اعمال یکنواخت و هم‌زمان و با سرعت نور به هدف، مخرب‌تر و تهدیدکننده‌تر از سلاح‌های متداول دیگر هستند. امروزه منابع HPM کاربردهای نظامی زیادی دارند [۲۲]. در جدول (۱) ویژگی‌های پالس‌های HPM و UWB ذکر شده است.

جدول (۱): مشخصات پالس‌های HPM و UWB [۲۲-۲۴]

UWB	HPM	مؤلفه
از ۱۰۰ مگاهرتز تا چندین گیگاهرتز	۱ تا ۱۰ گیگاهرتز	فرکانس، f_0
بصورت معمول ۵۰ کیلوولت بر متر	بصورت معمول ۱۰۰ کیلوولت بر متر	شدت میدان در هدف
۵۰ ns - ۵ ps	کمتر از ۱۰ نانو ثانیه	زمان صعود
۱ - ۱۰ (نانویه)	۱ - ۱۰ (نانویه)	طول انفجار پالس (نانویه)
۵/۰-۲ Ns	۲۰ ns - ۱ μs	عرض پالس (τ)
تک پالس تا ده‌ها کیلوهرتز	تک پالس تا یک کیلوهرتز	فرکانس تکرار پالس

۲-۳. سلاح‌های با انرژی مستقیم

این نوع سلاح‌ها عملکرد فرکانسی بین یک مگاهرتز تا پانزده گیگاهرتز با مدت زمان چند پیکونیم ثانیه در توان‌های متفاوت را دارند. سلاح‌های با انرژی مستقیم (DEW^4) یک منطقه محدود جغرافیایی و یا یک وسیله خاص مانند یک هواپیما یا خودرو، سامانه‌های مدرن، مدارات مجتمع و سویچ‌های رله (که در کنترل و فرماندهی سامانه‌های نظامی به کار می‌روند) را مورد تهاجم قرار می‌دهند. توجه به DEW در سناریوهای دفاعی آینده در حال افزایش است، از این‌رو برنامه‌های ملی و بین‌المللی در حال افزایش فعالیت‌های خود روی فناوری‌های لیزر و مایکروویو توان بالا در دفاع و ضد تروریسم هستند. توان سلاح‌های لیزری با انرژی متوسط (MEL^5) از ۱ کیلووات تا ۱۰۰ کیلووات است که انرژی الکتریکی آن در هر پالس در محدوده کیلوژول می‌شود.

گرفته است. شدت میدان در حالت FEM و حالت آزمایشگاهی اختلافی حدود ۵ درصدی داشته‌اند.

۲. فناوری‌های توان پالسی

روش‌های مختلفی برای تولید پالس وجود دارد، فناوری‌های عمده را می‌توان در این بخش بصورت مختصر شرح داد:

۱-۲. مولد شارژ فشرده

FCG^۱ استفاده از یک انفجار سریع برای فشرده‌سازی لحظه‌ای یک میدان مغناطیسی و آزادسازی لحظه‌ای آن است و قادر به تولید انرژی الکتریکی به میزان میلیون‌ها ژول در مدت زمان کسری از ثانیه است. باند فرکانسی مولدهای FCG غالباً از یک مگاهرتز کمتر است و بسیاری از هدف‌ها را با چنین محدوده فرکانسی نمی‌توان به آسانی مورد حمله قرار داد، زیرا حوزه عملکرد فرکانس آنها به مراتب بالاتر و در فرکانس‌های نزدیک به مایکروویو می‌باشد. FCG از یک سیلندر فلزی (به‌عنوان آرمیچر)، مواد منفجره قوی و یک پوشش قوی بیرونی که تمامی دستگاه را احاطه کرده، تشکیل شده است. جریان فشرده شده به درون یک آنتن فرستاده می‌شود و یک موج الکترومغناطیسی بسیار قدرتمند از آنتن بیرون می‌آید. با بزرگ شدن ابعاد FCG با مشکلات فنی و تکنولوژیکی مواجه می‌شویم. این چالش‌ها با افزایش ولتاژهای الکتریکی در حجم فشرده‌سازی شار مغناطیسی و همچنین رشد اثرات نیروی میدان مغناطیسی بر روی عناصر طراحی ایجاد می‌شوند. اتصال سری و موازی چند FCG که ماژول‌های عملکردی هم‌زمان دارند، یکی از راه‌های به‌دست آوردن انرژی و جریان‌های بالا است، مولدهای فشرده‌ساز شارژ در مقایسه با دیگر سامانه‌های مرسوم، بیشترین پالس توان خروجی در اندازه و وزن واحد را پیشنهاد می‌دهند [۲۰-۱۹].

۲-۲. مولدهای هیدرودینامیکی مغناطیسی

از مولدهای مگنو هیدرو دینامیکی (MHD^2) می‌توان برای ایجاد مولدهای شارژ فشرده استفاده کرد. اصول کلی ژنراتورهای MHD بر این است که جریان گاز پلاسما از میان میدان مغناطیسی قوی عبور داده می‌شود و یون‌های مثبت و منفی بر روی الکتروده که در بالا و پایین جریان گاز پلاسما قرار دارند جمع می‌شوند و یک ژنراتور جریان مستقیم را به‌وجود می‌آورند. گاز پلاسما پس از عبور از کانال باریک طراحی شده در محفظه آن، سرعت و در نتیجه انرژی بیشتری پیدا می‌کند و با فشار بیشتری وارد محفظه

³ high power microwave

⁴ directed energy weapon

⁵ solid state medium energy weapon laser

¹ Flux Compression Generator

² magneto hydrodynamic

باید یادآوری شود که از آنجا که یون‌ها بسیار سنگین‌تر از الکترون‌ها هستند، از یون‌ها در فرکانس پلاسما چشم‌پوشی شده است. نوسانات یون در فاصله بسیار کمتری نسبت به الکترون‌ها رخ خواهد داد. بنابراین، چگالی حجمی بار تنها به نوسانات الکترون وابسته خواهد بود. پاسخ معادله دیفرانسیلی فوق به شرح زیر است:

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{N_e q_e^2}{\omega_p m_e \epsilon_0} t} \quad (5)$$

فرکانس زاویه‌ای مربوط به نوسان چگالی بار آزاد ρ نیز همان ω_p است، لذا داریم:

$$\omega_p = \frac{N_e q_e^2}{\omega_p m_e \epsilon_0} \rightarrow \omega_p = \left(\frac{N_e q_e^2}{m_e \epsilon_0} \right)^{0.5} \quad (6)$$

فرکانس پلاسما همچنین می‌تواند از چگالی جریان حجمی درون پلاسما به دلیل تعامل با موج الکترومغناطیسی استخراج شود.

$$\omega_p = \left(\frac{N_e q_e^2}{m_e \epsilon_0} \right)^{0.5} = 8.94 \sqrt{N_e} \quad (7)$$

به صورت تقریبی فرکانس پلاسما ۹ برابر جذر چگالی الکترون‌هاست.

که در آن مقادیر عددی مؤلفه‌ها در زیر آمده است:

$$q_e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg and } \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

اگر فرکانس موج برخوردی به ناحیه پلاسما، کمتر از فرکانس پلاسما باشد، واکنش الکترون‌ها در پلاسما به میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی به صورت جذب انرژی و یا بازتاب آنها است، بنابراین با تنظیم چگالی الکترونی گاز می‌توان نقطه شکست را تنظیم کرد، البته مؤلفه‌های گاز و همچنین وضعیت فشار و دما نیز مؤثر می‌باشد. نتیجه دیگری که از برخورد این امواج به سطح پلاسما حاصل می‌شود آن است که الکترون‌های نزدیک سطح پلاسما مانند دایپل‌های کوچکی رفتار خواهند کرد و موج تابشی برخوردی به پلاسما را بازمی‌تابانند [۲۶-۲۷].

۴. محاسبه مقاومت و اندوکتانس و ظرفیت خازنی پلاسما

مقاومت و اندوکتانس پلاسما را می‌توان محاسبه کرد

$$R_p = \frac{1}{\sigma_{dc}} \frac{\text{محیط حلقه پلاسما}}{s} \quad R_p = \text{مقاومت پلاسما}$$

بصورت معادله (۹) است [۲۸-۲۹].

۳. محدودساز پلاسمایی

پلاسما مدت زیادی است که در حوزه فیزیک و مهندسی مورد مطالعه قرار گرفته است و نتایج حاصل از این مطالعات امروزه در بسیاری از صنایع به طور عملی به کار می‌رود. تجهیزات تخلیه‌گاز در گذشته بیشتر استفاده می‌شدند ولی به دلیل سرعت عمل پایین در کاربردهایی که زمان مسئله مهمی است، استفاده نمی‌شوند، زیرا این تجهیزات استاندارد لازم برای محافظت در برابر پالس‌های با زمان صعود سریع و انرژی بالا را ندارند در واقع نوع تخلیه گازی قابلیت حفاظت در برابر توان بالا را دارند اما زمان پاسخ کند است. در مقابل، تجهیزات حالت جامد، مانند دیود بهمنی سیلیکونی و واریستور اکسید فلزی به نوبه خود بسیار سریع بوده اما در برابر سطوح توان بالا آسیب پذیرند [۲۴-۲۵].

از آنجا که پلاسما یک محیط حامل بار آزاد است، نوسانات طبیعی که در اثر اختلالات الکتریکی و حرارتی رخ می‌دهند را نشان می‌دهد. از آنجا که تنها حرکت الکترون‌ها درون پلاسما مدنظر است، تنها روی نوسانات هماهنگ الکترون‌ها حول یون‌ها توجه خواهد شد. تحلیل با این فرض شروع می‌شود که به دلیل نوسانات هارمونیک الکترون‌ها حول یون‌ها، چگالی الکترون می‌تواند در فرکانس زاویه‌ای ω نوسان کند و لذا شدت میدان الکتریکی \vec{E} نیز در همان فرکانس نوسان خواهد نمود. نوسانات چگالی، با چگالی بار آزاد خالص ρ افزایش خواهد یافت که طبق رابطه زیر به چگالی جریان حجمی \vec{J} وابسته است [۲۶-۲۷]:

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{d\rho}{dt} \quad (1)$$

که به معادله پیوستگی معروف است. لازم به ذکر است معادله پیوستگی یک معادله در فیزیک است که جابه‌جایی یک کمیت پایسته را توصیف می‌کند، با قرار دادن \vec{J} طبق رابطه (۱) داریم:

$$\nabla \cdot (\sigma \vec{E}) = \sigma \nabla \cdot \vec{E} = -\frac{d\rho}{dt} \quad (2)$$

از طرفی چگالی بار آزاد خالص ρ ، طبق رابطه زیر به \vec{E} مربوط است.

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3)$$

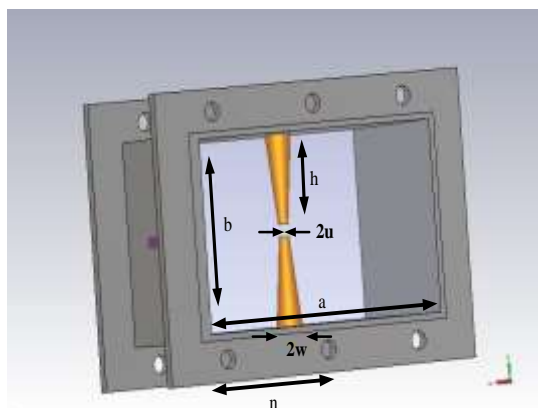
با ادغام روابط، چگالی بار آزاد ρ عبارتست از:

$$-\frac{j N_e q_e^2 \rho}{\omega m_e \epsilon_0} = -\frac{d\rho}{dt} \quad (4)$$

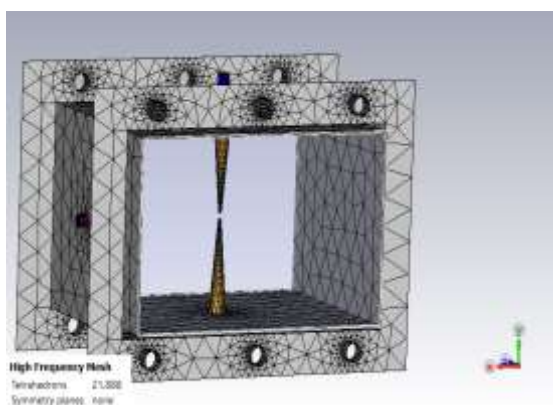
جدول (۲): دامنه ابعاد برای طراحی محدودساز بر حسب میلی‌متر [۳۰]

u	w	n	h	l	b _{in}	b _o	a _{in}	a _o
--	--	--	--	-۵۰	-۵۴	-۵۸	-۸۶	-۹۰
۳	۳	۴۷	۲۹	۱۰۰	۶۴	۶۸	۱۰۹	۱۱۳

که مؤلفه‌های ذکر شده مطابق شکل (۱) می‌باشند:

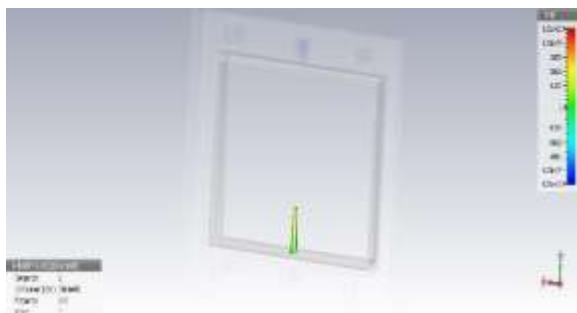


شکل (۱): شماتیک محدودساز



شکل (۲): مش‌بندی محدودساز

برای به‌دست آوردن میدان الکتریکی بالاتر ابتدا از یک سوزن استفاده شده و با تغییر ارتفاع سوزن به بررسی میدان الکتریکی پرداخته شده است:



شکل (۳): شدت میدان الکتریکی در $h=15$ و توان ۱ کیلووات

$$R_p = \frac{1}{\sigma_{dc}} \frac{C_{pl}}{S_{pl}} \quad (8)$$

که در آن $\sigma_{dc} = \frac{e^2 n_{es}}{m v_{th}}$ و در نتیجه می‌توان مقاومت را به صورت (۹) محاسبه کرد:

$$R_p = \frac{2\pi R}{\sigma_{dc} l \delta_p} \quad (9)$$

اندوکتانس پلازما یا L_p به صورت نسبت شار مغناطیسی تولید شده به وسیله جریان پلازما به مقدار جریان پلازما تعریف می‌شود.

شار مغناطیسی برابر $\pi R^2 \mu_0 \bar{I}_p / l$ است، پس اندوکتانس به صورت (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$L_p = \frac{\pi R^2 \mu_0}{l} \quad (10)$$

ثابت گذردهی پلازما با توجه به فرکانس پلازما و فرکانس حادث شده محاسبه شده است:

$$\epsilon_p = \epsilon_0 \epsilon_{rp} = \epsilon_0 \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right] \quad (11)$$

در فرکانس‌های خیلی بالا که $\omega > \omega_{pe}$ ، ϵ_p مثبت اما کمتر از ϵ_0 است، بنابراین در این ناحیه فرکانسی، پلازما مانند یک دی الکتریک با ثابت دی الکتریک کمتر از واحد رفتار می‌کند (عبور موج). در فرکانس‌های پایینتر، $\omega < \omega_{pe}$ که برای اکثر دشارژهای پلازما این شرط را داریم $\epsilon_p < 0$ یک ناحیه با چنین پلاسمایی به طول l و مساحت سطح مقطع A ، دارای ظرفیت خازنی $C = \epsilon_p A / l$ می‌باشد که مقداری منفی دارد و مرتبط با امپدانس سلفی $Z = 1 / (j\omega C)$ است (معادل با یک مقدار موهومی مثبت) بنابراین در ناحیه فرکانسی $\omega < \omega_{pe}$ پلازما مانند یک سلف رفتار می‌کند.

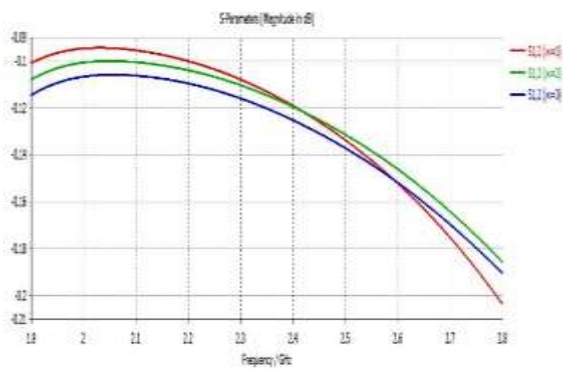
$$C = \epsilon_0 \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right] A / l \quad (12)$$

با ترکیب از رابطه (۷) و (۱۲):

$$C = \epsilon_0 \left[1 - \frac{81 N_e}{\omega^2} \right] A / l \quad (13)$$

۵. طراحی محدودساز پلاسمایی

ابعاد دهانه موج‌بر برابر ۹۴ میلی‌متر در ۶۰ میلی‌متر و طول آن نیز ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد. ابعاد دهانه موج‌بر با توجه به تجهیزات تست، مشخصات محیطی سامانه مورد نظر، نتایج شبیه‌سازی و سازگار با استانداردهای طراحی، انتخاب شده‌اند. ابعاد و مؤلفه‌های متفرقه در حین کار بهینه شده‌اند.



شکل (۶): تأثیر تغییر w بر مؤلفه S11

همان طور که مشاهده می‌شود تغییر مقدار این مؤلفه برای مقادیر ۱ تا ۳ میلی‌متر تأثیر چندانی بر ماتریس پراکندگی ندارد و مؤلفه اساسی تغییر ارتفاع سوزن‌ها می‌باشد.

۶. بهینه‌سازی ارتفاع سوزن و محل قرارگیری آن

جهت داشتن بیشترین میدان باید $h = 29/5$ و $n = 47$ باشد اما این موضوع باعث می‌شود که مؤلفه‌های S_{11} و S_{12} در بازه قبول قبول نباشند. شروط اولیه برای بهینه‌سازی با اعمال شرط‌های S_{11} و S_{12} بزرگتر از پیاده‌سازی شد، البته اینکه در یک بازه با این طول فرکانس بتوانیم شرایط را محقق کرده و همچنین بیشترین میدان را داشته باشیم مقدور نمی‌باشد ولی برای بالا بردن میدان و احتمال شکست، لازم است که ضریب پرنالیتی میدان را بیشتر در نظر بگیریم و تا جایی که ممکن است مقدار h را بیشتر در نظر بگیریم، البته در مسائل بهینه‌سازی مرسوم است که فرکانس مرکزی را در نظر گرفته و بهینه کردن را در آن فرکانس انجام می‌دهند، فرکانس محوری ما فرکانس $2/45$ گیگاهرتز است.

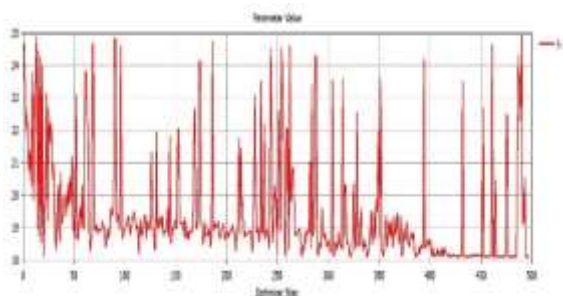
بهینه‌سازی با تابع هدف زیر انجام شد:

$$(S_{11} + 10)^2 + (S_{12} + 3)^2 = f_{max} \quad (14)$$

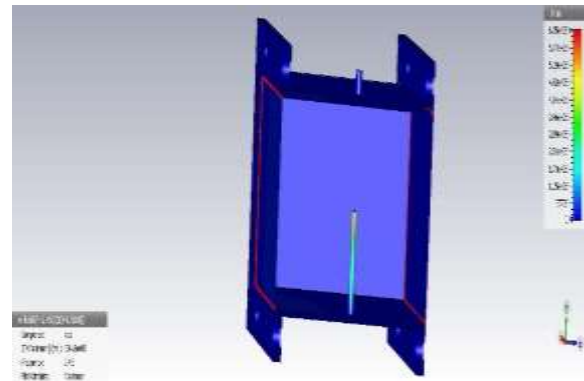
$$S_{11} \leq -10\text{dB}, E \geq 300 \frac{\text{KV}}{\text{m}}, S_{12} \geq -3\text{dB}$$

با استفاده از الگوریتم ژنتیک به محاسبه مقدار h و n پرداخته

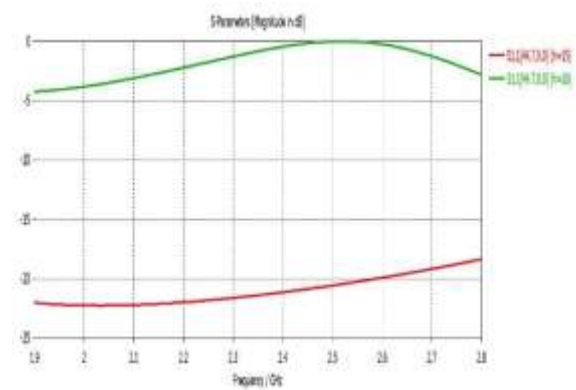
شد:



شکل (۷): بهینه‌سازی مقدار h با الگوریتم ژنتیک



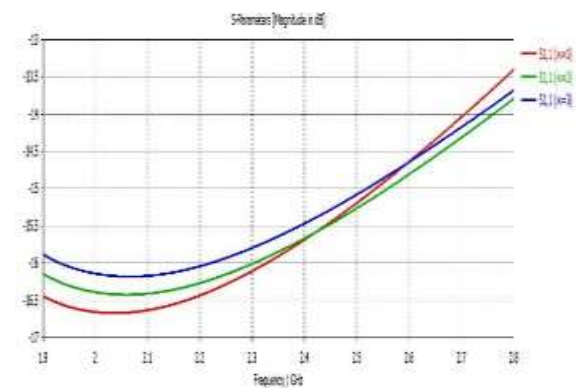
شکل (۳): شدت میدان الکتریکی در $h = 30$ و توان ۱ کیلووات



شکل (۴): مؤلفه‌های S_{11} و S_{12} در وضعیت تک سوزنه

با افزایش ارتفاع سوزن مقدار میدان الکتریکی بیشتر می‌شود و مؤلفه بازتاب نیز افزایش می‌یابد و انتقال روندی کاهشی دارد. مقدار شدت میدان الکتریکی در محدوده خوبی می‌باشد ولی برای عملکرد عادی نیاز داریم که S_{11} کوچکتر از -10 دسی‌بل و S_{12} بزرگتر از -3 دسی‌بل باشد بنابراین روش تک سوزنه مناسب نمی‌باشد.

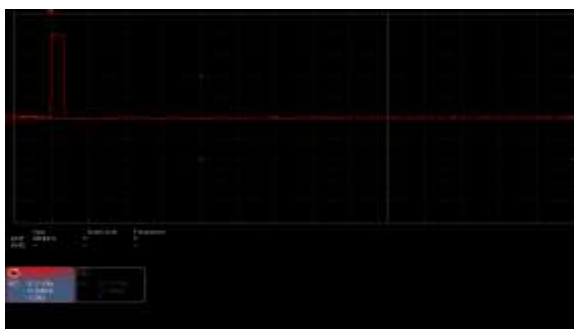
حال از ۲ سوزن به صورت روبه‌روی هم استفاده می‌کنیم: با تغییر قطر انتهایی سوزن (w) مؤلفه‌های مورد نظر را بررسی شده است:



شکل (۵): تأثیر تغییر w بر مؤلفه S11



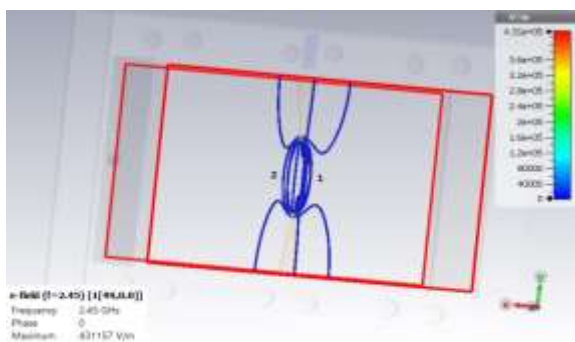
شکل (۱۰): تنظیمات انجام شده جهت انجام آزمایش



شکل (۱۱): خروجی فوتودیود

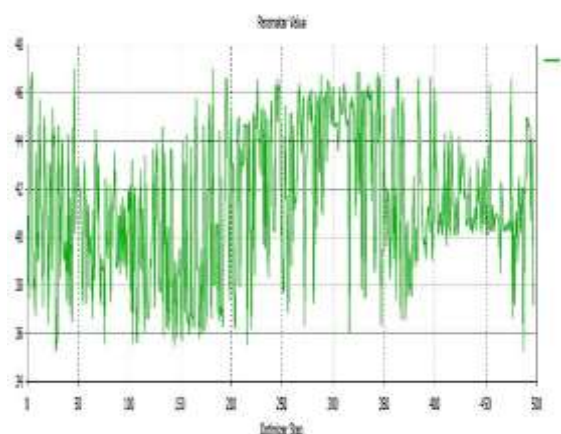
به محض مشاهده شکست الکتریکی بین سوزن‌ها، فوتودیود تحریک شده و خروجی آن در اسیلوسکوپ رویت می‌گردد. با اعمال توان ۱۲۰۰ وات، شکست الکتریکی بین سوزن‌ها انجام شده و خروجی فوتودیود در شکل (۱۱) استخراج شده است.

در مقایسه با مرجع [۱۴] زمان شکست به کمتر از ۱۰۰ نانوثانیه رسیده است، همچنین باتوجه به استفاده از توان پیوسته در فشار اتمسفری و استفاده از هوا به عنوان گاز شکست اتفاق افتاده است. همچنین احتمال شکست گاز در مواقعی که فاصله سوزن‌ها حتی بیشتر از ۱۰ میلی‌متر است، بالاتر از طراحی‌های انجام شده قبلی است.



شکل (۱۲): ناحیه مؤثر در هنگام شکست

با توجه به اینکه میدان الکترکی در نقاط نوک تیز بیشتر می‌باشد، ناحیه مؤثر برای شکست منطقه بین ۲ سوزن می‌باشد



شکل (۸): بهینه‌سازی مقدار n با الگوریتم ژنتیک

مقدار h در حدود ۱۹ میلی‌متر و مقدار n حدود ۴۶ میلی‌متر به دست آمد که البته در نمونه ساخته شده ما آن را ۴۷ میلی‌متر یعنی دقیقاً در مرکز قرار دادیم.

جدول (۳): مقادیر بهینه شده برحسب میلی‌متر (نمونه ساخته شده)

u	w	n	h	l	b_{in}	b_o	a_{in}	a_o
۱	۲	۴۷	۱۹	۵۰	۶۰	۶۴	۹۴	۹۸

که u شعاع نوک سوزن‌ها، w شعاع ته سوزن، n محل قرارگیری سوزن، h ارتفاع سوزن، l طول موجبر، b_{in} عرض داخلی محدودساز، b_o عرض بیرونی محدودساز، a_{in} طول داخلی محدودساز و a_o طول خارجی محدودساز می‌باشد.



شکل (۹): نمونه اولیه محدودساز

منبع توان بالا با استفاده از لاینچر به محدودساز پلاسمایی اعمال شده است. سوزن‌ها از جنس مس بوده و برای مشاهده شکست از فوتودیودهای مدل PH320 و PD438B استفاده شده است. فوتودیود به اسیلوسکوپ متصل شده و خروجی آن در حین تست استخراج شده است.

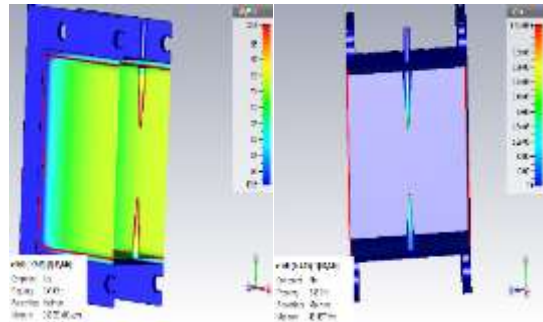
منبع توان اعمال شده قابلیت تغییر در محدوده ۹۰۰ تا ۱۸۰۰ وات را دارد و جهت آزمایش این نمونه از فشار اتمسفری استفاده شده است.

بالا بردن میدان الکتریکی از سوزن‌هایی از جنس مس استفاده شده است، در وضعیتی که از تک سوزن استفاده شده است میدان الکتریکی در وضعیت مطلوبی است و وقتی ارتفاع ۳۰ میلی‌متر باشد مقدار میدان الکتریکی با اعمال توان ۱ کیلووات، تا ۶۳۵ کیلوولت بر متر هم بالا می‌رود و احتمال شکست بسیار بالا است ولی مؤلفه S12 که نشان‌دهنده میزان انتقال اطلاعات ارتباطی برای پردازش در سامانه الینت است کمتر از -۳dB می‌باشد و تلفات سیگنال‌های الکتریکی بالاتر از حد استاندارد است و نمی‌توان از این طراحی استفاده کرد. در وضعیت دو سوزنه با بهینه‌سازی ابعاد سوزن و جایابی بهینه آن و تنظیم ارتفاع سوزن‌ها به وضعیت مورد نظر رسیدیم. در نمونه ساخته شده ارتفاع سوزن‌ها ۱۹ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و از فوتودوهای حساس استفاده شده است که با مشاهده شکست الکتریکی بتوانیم خروجی فوتودیود را ثبت کنیم. منبع توان اعمالی به صورت پیوسته بوده و مقدار آن در محدوده ۹۰۰ وات تا ۱۸۰۰ وات قابل تغییر بوده ولی ما از منبع ۱۲۰۰ وات استفاده کردیم. جنس تیغه‌های سوزنی مسی بوده و فوتودیود طوری تعبیه شده است که دقیقاً بین دو سوزن را پوشش می‌دهد. به محض وقوع اولین جرقه الکتریکی گاز به پلاسما تبدیل شده و حفاظت انجام می‌گیرد. نتایج آزمایشگاهی به هنگام وقوع پالس‌های توان بالا همگرایی بالایی با نتایج روش اجزا محدود را نشان می‌دهد.

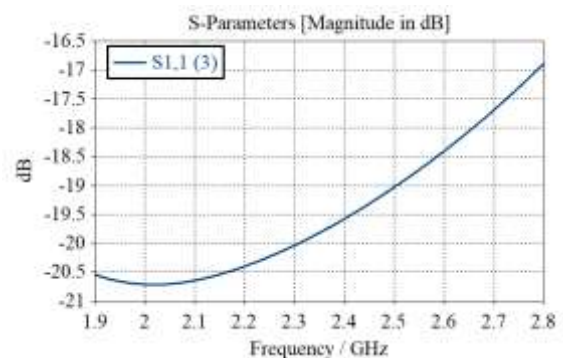
۸. مراجع

- [1] S. Yates, "The biological effects of weak electromagnetic fields. In. Consoli, Fabrizio, et al. Laser produced electromagnetic pulses: generation, detection and mitigation," High Power Laser Science and Engineering , (2020).
- [2] H. Ruirong, "A novel high-altitude electromagnetic pulse protection circuit for RF applications," vol. 84, pp.1-8, 2019.
- [3] C. Ming, W. Ming, and C. Xiang, "Testing of materials shielding effectiveness against electromagnetic pulse. in Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC), 2013.
- [4] G. Cheng, "The penetrating of EMP fields into a metal shielding enclosure by a slot. in Electromagnetic Compatibility, 2002 3rd International Symposium on. 2002.
- [5] X. Chen and Y. G. Chen. "Time-domain test for material electromagnetic pulse shielding effectiveness based on shielding black-box windows method. in Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), 2012 International Symposium on. 2012.
- [6] V. Pereira and G. Kunkolienkar, "EMP (Electro-Magnetic Pulse (weapon technology along with EMP

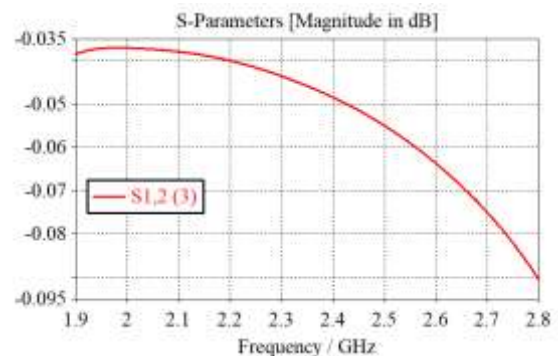
که این ناحیه در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۲): شدت میدان الکتریکی در هنگام اعمال توان ۱۲۰۰ وات در $h=19$



شکل (۱۴): مؤلفه S11 در نمونه ساخته شده



شکل (۱۵): مؤلفه S12 در نمونه ساخته شده

در نمونه ساخته شده مقدار سیگنال‌های الکتریکی بیش از ۹۹ درصد است و عملیات بازتاب بسیار کمی ناشی از جایگذاری سوزن‌ها وجود دارد. میدان الکتریکی اندازه‌گیری شده در این نمونه ۴۳۱ کیلوولت بر متر می‌باشد که طبق مشاهدات انجام شده در محدودساز پلاسمایی بر پایه موجبر، شکست الکتریکی اتفاق افتاده و با تبدیل گاز به پلاسما حفاظت از گیرنده بخوبی انجام می‌شود.

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثر تغییر ابعاد هندسی عناصر محدودساز بر میدان الکتریکی و شکست الکتریکی پرداخته شده است. برای

- Alignment Mechanism,” *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* . pp. 2889-2896, 2018
- [18] K. Jelena, “Carbon nanotubes in electric and magnetic fields,” *Physical Review B*, pp. 085452, 2018.
- [19] V. Demidov, “High-power energy sources based on the FCG parallel and series connection. in Pulsed Power Conference, 1997. Digest of Technical Papers. 1997 11th IEEE International. 1997.
- [20] A. Neuber, and J. C. Dickens, “Magnetic flux compression generators. *Proceedings of the IEEE*,. vol. 92, pp. 1205-1215. 2004.
- [21] R. J. Rosa, “MHD power generation. *Transactions on Plasma Science*,” vo.1, pp. 3-12, 1973.
- [22] E. V. Keuren and J. Knighten, “Use of high power microwave weapons. in Security Technology,, 1995. *Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers 29th Annual 1995 International Carnahan Conference on*. 1995.
- [23] T. H. Weise, “Overview of directed energy weapon developments. in *Electromagnetic Launc Technology*, 2004. 2004 12th Symposium on. 2005.
- [24] H. Canacsinh, L. M. Redondo, and J. F. Silva, “Solid state bipolar Marx modulator for nonthermal plasma applications,” 2009 IEEE International Conference on Plasma Science - Abstracts, San Diego, CA, USA, 2009,
- [25] Z. V. Missen, A. Semnani, and D. Peroulis, “Toward a High-Power High-Isolation Wideband Plasma Limiter,” 2019 IEEE 20th Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), Cocoa Beach, FL, USA, 2019
- [26] F. Francis Chen, “Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion” Third Edition, 2016.
- [27] J. Benford and A. Swegle, “High Power Microwaves” Series in Plasma Physics, Second Edition, 2007.
- [28] M. A. Lieberman, “A Mnni-Course on the principles of plasma discharees, 2003.
- [29] M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg “Principles of Plasma Discharges and Materials processing,” Second Edition, 2006.
- [30] Marcuvitz, Nathan. *Waveguide handbook*. no. 21. Iet, 1951.
- shielding and detection methodology. in *Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT)*, 2013 Fourth International Conference on. 2013.
- [7] C. Fang, Q. Zhang, and D. Xie. Simulation of shielding characteristic of a typical decay waveguide window for EMP. in *Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, 2010 International Conference on. 2010.
- [8] D. Xiao, “Experimental and Theoretical Study of Coupling E]ffect of Electromagnetic Pulse on Shielded Cable. in *Electromagnetic Field Problems and Applications (ICEF)*, Sixth International Conference on. 2012.
- [9] G. Kunkel, “Historical methods of testing EMI gaskets. in *Product Compliance Engineering (ISPCE)*, 2014 IEEE Symposium on.
- [10] B. Yong-fang, “The analysis of shielding effectiveness of negative permittivity composite materials to different EMP. in *Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless. MAPE IEEE International Symposium on*. 2005.
- [11] T. Hu, Q. Liu, and X. Yi. “Study of shielding properties of cylindrical enclosures illuminated by EMP. in *Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE)*,” IEEE 5th International Symposium on. 2013.
- [12] L. Xu, “Simulation of the EMP coupling to circuits inside a shielding box by a wire penetrated with an aperture. in *Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*,” International Symposium on. 2007.
- [13] J. Mankowski, “Field enhanced microwave break down in a plasma limiter,” *IEEE transactions on plasma science*, pp.102-103.
- [14] Y. Yi-Ming, Y. Cheng-Wei, and Q. Bao-Liang “Measurement of S-band microwave gas breakdown by enhancing the electric field in a waveguide,” *IEEE Transactions on Plasma Science* vol. 40, no. 12 pp.3427-3432, 2002.
- [15] Z. Samir, “Electrical Transport Properties of Carbon Nanotube/Polyester Polymer Composites,” *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, pp.185-190, 2019.
- [16] P. Eric, “Avalanche, joule breakdown and hysteresis in carbon nanotube transistors,” *IEEE International Reliability Physics Symposium*, 2009.
- [17] K. Kaveh, “Effect of High Magnetic Pulse Iteration on Electrical Property of CNT-Polypyrrole Composite: