

بهبود عملکرد محفظه‌های الکترومغناطیسی غیرفلزی شفاف با استفاده از پوشش فیلم نانولایه طلا

محرم غیاثوند^۱، دانشجوی دکتری؛ محمد ناصر مقدسی^۲، استاد؛ عباسعلی لطفی نیستانک^۳، دانشیار؛ علیرضا نیک‌فرجام^۴، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات - تهران - ایران - m.ghiyasvand@srbiau.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات - تهران - ایران - mn.moghaddasi@srbiau.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد یادگار امام خمینی (ره) - شهرری - تهران - ایران - aalotfi@ieee.org

۴- دانشکده علوم و فناوری‌های نوین - دانشگاه تهران - تهران - ایران - a.nikfarjam@ut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک روش عملی برای بهبود عملکرد محفظه‌های غیرفلزی شفاف با استفاده از لایه‌نشانی فیلم نانولایه طلا، ارائه می‌کنیم. در ابتدا، یک روش تحلیلی بر مبنای روش رابینسون معرفی می‌شود که قادر به تخمین تقریبی تأثیر پوشش محفظه‌های غیرفلزی شفاف است. در حالی که روش رابینسون امکان تخمین تأثیر پوشش محفظه‌های غیرفلزی را به دلیل اثر وجود دیواره‌های چندلایه ندارد و تاکنون روش تحلیلی مناسب دیگری برای تخمین تأثیر پوشش این نوع محفظه، گزارش نشده، نتایج روش تحلیلی پیشنهادی در این مقاله دارای توافق قابل قبولی با نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری است. در گام بعدی، به منظور بهبود عملکرد محفظه‌های شفاف، با ایجاد مصالحه بین دو عامل تأثیر پوشش و شفافیت نوری، ضخامت بهینه نانولایه طلا انتخاب شده و به کمک روش تبخیر حرارتی روی دیواره‌های شفاف شیشه - ITO، لایه‌نشانی انجام می‌شود. سرانجام به منظور ارزیابی روش بهبود عملکرد ارائه شده، محفظه‌های مسی، شیشه - ITO و پوشش داده‌شده با طلا، با هم مقایسه می‌شوند. اهمیت این کار در ارائه محفظه‌های شفاف پوشش داده‌شده با طلا است که دارای تأثیر پوشش نزدیک به محفظه فلزی (حدود ۲۰ دسی‌بل بهتر از محفظه‌های شفاف شیشه - ITO) و شفافیت نوری قابل قبول در محدوده طیف مرئی هستند در حالی که محفظه‌های فلزی دارای شفافیت نیستند.

واژه‌های کلیدی: محفظه‌های الکترومغناطیسی غیرفلزی، شفافیت نوری، تأثیر پوشش، بهبود عملکرد، نانولایه طلا، لایه‌نشانی، تبخیر حرارتی.

Non-Metallic Transparent Enclosure Performance Improvement using Gold Nano-Layer Film

M. Ghyasvand¹, PhD Student; M. Naser-Moghaddasi², Professor; A. A. Lotfi- Neyestanak³, Associate Professor; A. R. Nikfarjam⁴, Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Email: m.ghiyasvand@srbiau.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Email: n.moghaddasi@srbiau.ac.ir

3- Department of Electrical Eng., Yadegar-e-Imam Khomeini (RAH) Shahre Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Email: a.lotfi@iust.ac.ir

4- Faculty of New Sciences & Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: a.nikfarjam@ut.ac.ir

Abstract: In this paper, we present a practical solution to improve the performance of non-metallic transparent enclosures (NTE) using gold Nano-layer deposition. Firstly, based on Robinson *et al.* method, an analytical model is introduced to approximately estimate shielding effectiveness of transparent enclosures. While Robinson *et al.* model cannot analyses NTE, due to its inability to take into account multi-layer panel effects and another effective analytical model has not been reported in previous works, proposed analytical model have an acceptable agreement with simulation and measurement results. In the next step, by making a tradeoff between shielding effectiveness and optical transparency, an optimum thickness of gold Nano layer is selected and deposited on the ITO glass panels by thermal evaporation technique, to improve the NTE performance. Finally, to assess the performance optimization method, results of copper, ITO Glass, and gold deposited enclosures are compared to introduce gold deposited ITO Glass enclosure provides good shielding effectiveness similar to copper one (about 20dB better than ITO Glass enclosure) as well as acceptable optical transparency in visible range, whereas metallic enclosures cannot provide any transparency.

Keywords: Non-metallic electromagnetic enclosure, transparency, shielding effectiveness, performance improvement, gold Nano-layer, deposition, thermal evaporation.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۲۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۱

نام نویسنده مسئول: محمد ناصر مقدسی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - میدان حصارک - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات - دانشکده فنی و مهندسی.

۱- مقدمه

است [۱۳] اما تأثیر پوشش محفظه‌های شفاف هم‌چنان پایین است که امکان رقابت آن را با محفظه‌های فلزی کاهش می‌دهد.

در این مقاله، با تمرکز بر محفظه‌های غیرفلزی شفاف کوچک (با ابعادی در حد حداکثر چندده سانتی‌متر و ضخامتی در حد حداکثر چند میلی‌متر که به‌طور عملی برای کاربردهایی با وزن کم و ابعاد کوچک مناسب هستند)، ابتدا یک روش تحلیلی بر مبنای روش رایبسنون، توسعه داده شده است، که امکان تخمین تقریبی و سریع تأثیر پوشش محفظه‌های غیرفلزی شفاف را فراهم می‌نماید درحالی‌که تا کنون روش تحلیلی مناسب دیگری در کارهای قبلی [۸، ۹، ۱۲، ۱۴] گزارش نشده است. در گام بعدی یک راه‌حل عملی مبتنی بر پوشش‌دهی با نانولایه طلا برای بهبود عملکرد محفظه‌های شفاف ارائه شده است. همچنین به‌منظور صحت‌گذاری روش تحلیلی و ارزیابی عملکرد محفظه‌های غیرفلزی شفاف پیشنهاد شده، نتایج اندازه‌گیری نمونه‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که محفظه پوشش داده‌شده با طلا داری تأثیر پوششی نزدیک به نمونه فلزی بوده و حدود ۲۰ دسی‌بل بهتر از نتایج گزارش‌شده [۸، ۹] برای محفظه‌های شفاف شیشه - ITO است. سازمان‌دهی مقاله به‌شرح زیر است.

در بخش ۲، با معرفی هادی‌های شفاف شروع نموده، یک روش تحلیلی برای تخمین تأثیر پوشش محفظه‌های غیرفلزی توسعه خواهیم داد و در ادامه نتایج آن را با نتایج شبیه‌سازی برای انواع محفظه‌های غیرفلزی شفاف مقایسه خواهیم نمود. در بخش ۳، ابتدا روش ساخت محفظه‌های دولایه شفاف توصیف شده، سپس روش بهبود عملکرد آن‌ها با استفاده از لایه‌نشانی فیلم نانولایه‌ای طلا بیان نموده، در ادامه با ارائه نتایج اندازه‌گیری، یافته‌های به دست آمده را تحلیل خواهیم کرد. خلاصه نتایج مقاله نیز در بخش ۴، ارائه می‌شود.

۲- تحلیل محفظه‌های غیرفلزی شفاف

همان‌گونه که بیان شد، برخلاف محفظه‌های فلزی که تخمین تأثیر پوشش برای تحلیل عملکردشان کافی است، در محفظه‌های غیرفلزی شفاف، عامل مؤثر دیگری به نام شفافیت نوری وجود دارد که باید به‌طور هم‌زمان در تحلیل‌ها لحاظ شود. در این بخش ابتدا نحوه تخمین شفافیت نوری در فیلم‌های هادی شفاف، بیان شده سپس روش تحلیلی تخمین تأثیر پوشش محفظه‌های شفاف را ارائه خواهیم کرد.

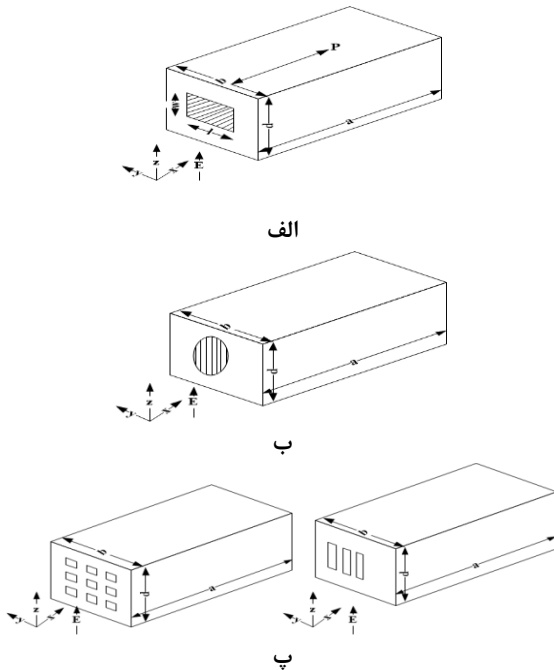
۲-۱- فیلم‌های هادی شفاف

از دیدگاه تئوری، هر هادی شفافی می‌تواند در ساخت محفظه‌های غیرفلزی شفاف به‌کار گرفته شود. اما در این بین، ITO به‌دلیل امکان مصالحه خوب بین رسانایی الکتریکی و شفافیت نوری، در کاربردهای مخابراتی، بیش‌تر مورد استفاده قرار گرفته است [۱۱]. شفافیت نوری ITO به‌صورت تقریبی از رابطه (۱) تخمین زده می‌شود [۱۰].

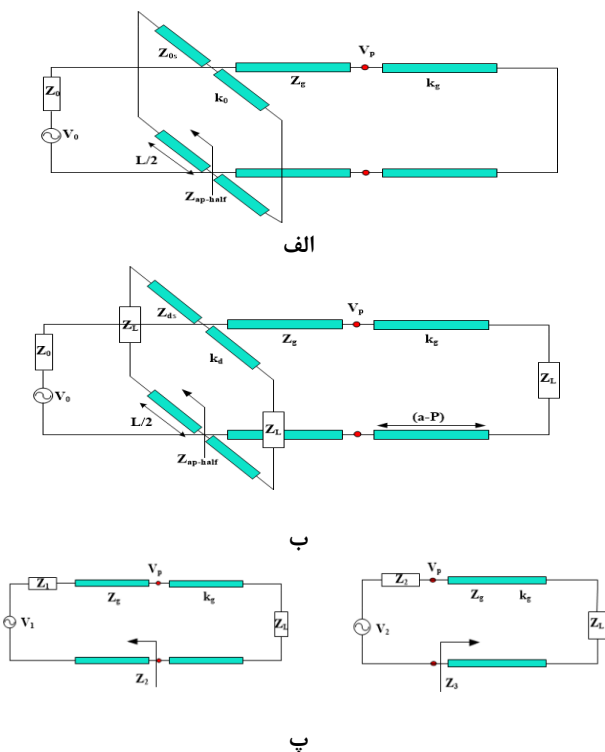
$$T \cong e^{-\frac{2T_s}{\delta}} \quad (1)$$

رشد روزافزون استفاده از تجهیزات الکترونیکی و مخابراتی در دهه‌های اخیر مانند ارتباطات مخابرات ماهواره‌ای و مخابرات سیار، موضوع سازگاری الکترومغناطیسی را ضرورتی اجتناب‌ناپذیر ساخته است. تجهیزات الکترونیکی و مخابراتی به‌طور معمول به‌وسیله یک محفظه فلزی محصور می‌شوند که به آن محفظه الکترومغناطیسی گفته می‌شود. این محفظه‌ها غالباً دارای روزنه‌هایی برای کابل‌های ورودی و خروجی، تبادل حرارتی، تهویه هوا و صفحات نمایشگر هستند که به واسطه آن‌ها، بازدهی حفاظت الکترومغناطیسی محفظه کاهش پیدا می‌کند [۱]. بازدهی محفظه در برابر تشعشعات الکترومغناطیسی ناخواسته، با استفاده از عامل تأثیر پوشش بیان می‌شود که به‌صورت نسبت شدت میدان الکتریکی یا مغناطیسی در حضور و غیاب محفظه، تعریف می‌شود. محفظه‌های فلزی در کارهای زیادی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۲، ۳]. به‌عنوان نمونه، روش خط انتقال برای محاسبه تأثیر پوشش این محفظه‌ها، به‌کار گرفته شده است [۴، ۵]. اما در کاربردهایی مانند نانو ماهواره‌ها، تجهیزات پزشکی و مخابراتی که نیاز به کوچکی ابعاد، وزن کم و شفافیت نوری وجود دارد، محفظه‌های فلزی کارایی چندانی ندارند. از این‌رو، تلاش برای طراحی و ساخت محفظه‌هایی که بتواند بر چالش‌های فوق غلبه نماید، ادامه دارد. برای مثال طی سالیان اخیر استفاده از فرامواد به‌عنوان راهی مؤثر در کاهش وزن و ابعاد پوشش‌های حفاظ الکترومغناطیسی ارائه شده است [۶، ۷]. اما چنین محفظه‌هایی نیز در کاربردهایی که نیاز به قابلیت شفافیت نوری وجود دارد، مانند قابلیت مجتمع شدن با سلول‌های خورشیدی در ماهواره‌های مکعبی، گزینه‌های مناسبی نیستند. در برخی کارهای اخیر، توسعه مواد مرکب برای دست‌یابی هم‌زمان به تأثیر پوشش بالا و شفافیت نوری قابل قبول، مورد توجه قرار گرفته است. برای مثال عملکرد محفظه‌های فلزی با دیواره شفاف در صفحه روزنه آن‌ها، بررسی شده است [۸، ۹]. در هر صورت مشابه با آنتن‌های شفاف، با پیشرفت فناوری در ساخت هادی‌های شفاف در دهه اخیر، محفظه‌های غیرفلزی شفاف را می‌توان با استفاده از فیلم هادی‌های شفافی مانند، ایندیم تین اکساید (ITO)، فلورین تین اکساید (FTO) و نقره پلیمر اندود (AgHt)، ساخت. نویسندگان در کارهای قبلی با استفاده ITO توانسته‌اند آنتن‌های شفاف را توسعه داده و به‌کمک پوشش‌دهی فیلم نازک طلا، راندمان آن‌ها را به نحو محسوسی بهبود داده‌اند، اما تاکنون این روش‌ها برای محفظه‌های الکترومغناطیسی مورد استفاده قرار نگرفته است [۱۰، ۱۱]. به‌هرحال، دو چالش عمده در مطالعات محفظه‌های غیرفلزی شفاف وجود داشته است. اول، درحالی‌که تخمین تأثیر پوشش محفظه‌های فلزی با استفاده از روش‌های تحلیلی مانند روش رایبسنون، به‌راحتی امکان‌پذیر است [۱۲]، تاکنون روش تحلیلی دقیقی برای محفظه‌های غیرفلزی توسعه داده نشده است. اگر چه در سالیان اخیر تلاش برای استفاده از نانوساختارهای گرافن در کاربردهای شیلد الکترومغناطیسی شفاف باعث بهبود عملکرد آن‌ها شده

که توانایی تخمین تأثیر پوشش این‌گونه محفظه‌ها را با دقت مناسبی دارد. تفاوتی که این روش نسبت به روش رابینسون دارد، در اعمال امپدانس بار به انتهای خطوط انتقال است که در ادامه روش محاسبه آن ارائه شده است.



شکل ۱: محفظه‌های غیرفلزی شفاف: (الف) روزنه مستطیلی، (ب) روزنه دایروی، (پ) آرایه روزنه



شکل ۲: روش تحلیلی تخمین تأثیر پوشش: (الف) روش رابینسون، (ب) روش تحلیلی پیشنهادی، (پ) ساده‌سازی مدار معادل

که در آن T_c ضخامت فیلم و δ عمق پوستی هادی بوده و در هادی‌های خوب از رابطه (۲) به‌طور تقریبی قابل محاسبه است.

$$\delta \cong \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma_c}} \quad (2)$$

که در آن ω فرکانس زاویه‌ای، μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد و σ_c ضریب رسانایی فیلم ITO است. از طرفی مقاومت سطحی فیلم، R_{sh} ، از رابطه ۳ به‌دست می‌آید [۱۰]. درحالی‌که برای دستیابی به تأثیر پوشش مناسب، نیاز به افزایش ضخامت فیلم هادی داریم، بنابر رابطه (۲)، این کار باعث کاهش شفافیت نوری آن می‌شود. بنابراین در طراحی صحیح محفظه‌های غیرفلزی شفاف، باید با توجه به نوع کاربرد مورد نیاز، بین این دو عامل، مصالحه ایجاد نمود.

$$R_{sh} = \frac{1}{\sigma_c T_c} \quad (3)$$

۲-۲- روش تحلیل محفظه‌های غیرفلزی

محفظه غیرفلزی شفاف را با استفاده از دیواره مرکب متشکل از یک دی‌الکتریک شفاف (مانند شیشه، پلکسی‌گلاس و نوار پلیمری PET) که با فیلم هادی نانولایه شفاف پوشش داده شده است، می‌توان ساخت. به‌هرحال برای اهداف این مقاله، یعنی بهبود تأثیر پوشش محفظه‌های شفاف، نیاز به لایه‌نشانی فیلم نازکی از طلا در دیواره‌های مرکب بالا خواهیم داشت که منجر به ایجاد دیواره‌های سه‌لایه خواهد شد. ازاین‌رو، بدون صدمه به کلیت موضوع، محفظه‌های غیرفلزی شفاف سه‌لایه‌ای با آرایش مختلف روزنه‌ها (مستطیلی، دایروی، مربعی، آرایه‌ای) برای تحلیل در نظر گرفته شده که چند نمونه از آن‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده است. فرض کنیم مانند مرجع [۱۲]، محفظه‌ی شفاف شکل ۱-الف در برابر تابش نرمال یک موج صفحه‌ای با پلاریزاسیون خطی و مؤلفه عمودی میدان الکتریکی (در راستای محور Z) قرار گرفته باشد (که در آن طول بلند روزنه مستطیلی در جهت عمود بر میدان الکتریکی است و بدترین حالت برخورد موج محسوب می‌شود). شایان ذکر است در صورتی‌که در مسائل عملی، زاویه برخورد موج به صورت مایل باشد، با استفاده از تجزیه میدان برخوردی به عوامل افقی و عمودی، می‌توان تأثیر پوشش را محاسبه نمود و به کلیت موضوع صدمه‌ای وارد نمی‌شود.

روش رابینسون، یک روش ساده تحلیلی مبتنی بر نظریه خطوط انتقال است (شکل ۲ الف)، که برای تخمین تأثیر پوشش محفظه‌های فلزی با هادی کامل کاربرد دارد [۱۲]. اگرچه این روش برای محفظه‌های عملی فلزی با هادی غیرکامل و تلف‌دار نیز توسعه داده شده است [۱۴]، اما توانایی تخمین تأثیر پوشش محفظه‌های غیرفلزی را به علت وجود دیواره‌های مرکب چندلایه، ندارد. در اینجا بر مبنای روش رابینسون و با استفاده از نظریه انعکاس موج از محیط‌های چندلایه، یک روش تحلیلی (شکل ۲-ب) برای محفظه‌های غیرفلزی (شکل ۱-الف) پیشنهاد نموده‌ایم

خط انتقال چشم‌پوشی نماییم، بنابراین، امپدانس مشخصه محفظه در مد غالب آن از رابطه (۹)، قابل محاسبه است.

$$Z_g = Z_0 / \sqrt{1 - (\lambda_0/2b)^2}, k_g = k_0 / \sqrt{1 - (\lambda_0/2b)^2} \quad (9)$$

که در آن، λ_0 ، Z_0 و k_0 به ترتیب طول موج، امپدانس مشخصه و ثابت انتشار فضای آزاد هستند. امپدانس بار، Z_L ، که ناشی از اثر وجود دیواره مرکب شفاف سه‌لایه در محفظه بوده و به‌منظور در نظر گرفتن تلفات موج ناشی از ناکامل بودن هادی استفاده شده و اثر لایه دی‌الکتریک در انتهای خطوط انتقال گنجانیده شده است، با استفاده از تئوری انعکاس موج از محیط چندلایه (شکل ۳- الف را مشاهده نمایید)، از روابط ۱۰ تا ۱۷ قابل محاسبه است [۱۷].

$$Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma_{in}}{1 - \Gamma_{in}} \quad (10)$$

$$\Gamma_{in} = \frac{\Gamma_0 + \Gamma'_1 e^{-j2(k_g T_g)}}{1 + \Gamma_0 \Gamma'_1 e^{-j2(k_g T_g)}} \quad (11)$$

$$\Gamma'_1 = \frac{\Gamma_1 + \Gamma'_2 e^{-j2(k_d T_d)}}{1 + \Gamma_1 \Gamma'_2 e^{-j2(k_d T_d)}} \quad (12)$$

$$\Gamma'_2 = \frac{\Gamma_2 + \Gamma'_3 e^{-j2(k_c T_c)}}{1 + \Gamma_2 \Gamma'_3 e^{-j2(k_c T_c)}} \quad (13)$$

$$\Gamma_0 = \frac{Z_g - Z_0}{Z_g + Z_0}, Z_g = \sqrt{\frac{j\omega\mu_g}{\sigma_g + j\omega\epsilon_g}}, k_g = \omega\sqrt{\mu_g\epsilon_g} \quad (14)$$

$$\Gamma_1 = \frac{Z_d - Z_g}{Z_d + Z_g}, Z_d = \sqrt{\frac{j\omega\mu_d}{\sigma_d + j\omega\epsilon_d}}, k_d = \omega\sqrt{\mu_d\epsilon_d} \quad (15)$$

$$\Gamma_2 = \frac{Z_c - Z_d}{Z_c + Z_d}, Z_c = \sqrt{\frac{j\omega\mu_c}{\sigma_c + j\omega\epsilon_c}}, k_c = \omega\sqrt{\mu_c\epsilon_c} \quad (16)$$

$$\Gamma_3 = \frac{Z_0 - Z_c}{Z_0 + Z_c}, Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (17)$$

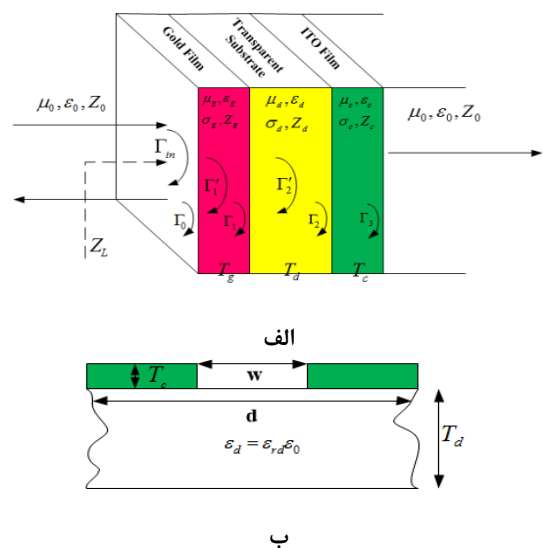
که در آن‌ها، k_c ، k_d و k_g به ترتیب ثابت‌های انتشار در ITO، دی‌الکتریک و فیلم نازک طلا هستند. درواقع به‌کمک روش فوق، امپدانس بار هر نوع دیواره مرکب با هر تعداد لایه دلخواه را می‌توان محاسبه نمود به شرط این که مشخصات ذاتی لایه‌ها در دسترس باشد. از این مرحله به بعد، مشابه روش رابینسون، عمل می‌شود. به این ترتیب که ابتدا امپدانس روزنه را با توجه به شکل ۲- ب به‌صورت زیر محاسبه می‌نماییم، که در آن عامل l/b به‌دلیل اثر تزویج روزنه و موج‌بر در نظر گرفته شده است.

$$Z_{ap-half} = \frac{l}{b} Z_{ds} \frac{Z_L + jZ_{ds} \tan(k_0 l/2)}{Z_{ds} + jZ_L \tan(k_0 l/2)} \quad (18)$$

$$Z_{ap} = \frac{1}{2} \frac{l}{b} Z_{ds} \frac{Z_L + jZ_{ds} \tan(k_0 l/2)}{Z_{ds} + jZ_L \tan(k_0 l/2)} \quad (19)$$

با مراجعه به شکل ۲- پ و استفاده از قوانین تونن و نورتین امپدانس‌های Z_2 و Z_3 به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند:

درواقع، امپدانس بار درنظر گرفته‌شده در انتهای خطوط انتقال، در روش تحلیلی پیشنهادی (شکل ۲- ب)، ناشی از وجود دیواره چندلایه است که ساختار سه‌لایه‌ای آن (در این مقاله استفاده شده است)، در شکل ۳- الف، نمایش داده شده است. با این فرض که ضخامت فیلم نانولایه طلا در مقایسه با ضخامت دی‌الکتریک ناچیز بوده و قابل چشم‌پوشی است (که در عمل فرض صحیحی است)، روزنه مستطیلی را می‌توان مانند آنچه که در شکل ۳- ب نشان داده شده، با یک خط انتقال نوار هم‌صفحه (Coplanar Strip) معادل‌سازی نمود. در این صورت، امپدانس مشخصه خط انتقال یادشده، Z_{ds} ، از رابطه زیر به‌دست می‌آید، که در آن K و K' انتگرال‌های بیضوی هستند.



شکل ۳: محاسبه امپدانس معادل: (الف) امپدانس بار معادل دیواره شفاف سه‌لایه، (ب) امپدانس معادل روزنه مستطیلی محفظه

$$Z_{ds} = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{K(k_1)}{K'(k_2)}, k_1 = \frac{w}{d} \quad (4)$$

$$\epsilon_{re} = 1 + q(\epsilon_{rd} - 1) \quad (5)$$

$$q = \frac{1}{2} \frac{K(k_2)}{K'(k_2)} \frac{K'(k_1)}{K(k_1)}, k_2 = \frac{\sinh(\pi w/2T_d)}{\sinh(\pi d/2T_d)} \quad (6)$$

اگر در شکل ۳- ب، $w < d/\sqrt{2}$ باشد (که در کاربردهای عملی محفظه‌ها، چنین است)، بر اساس مرجع [۱۵، ۱۶]، می‌توانیم از روابط تقریبی زیر به‌جای روابط بالا استفاده نماییم:

$$Z_{ds} = \frac{120\pi^2}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \left[\ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{1 - (w_e/d)^2}}{1 - \sqrt{1 - (w_e/d)^2}} \right) \right]^{-1} \quad (7)$$

$$w_e = w - \frac{5T_c}{4\pi} (1 + \ln(\frac{4\pi w}{T_c})) \quad (8)$$

که در آن‌ها، T_c و T_d به ترتیب، ضخامت فیلم ITO و دی‌الکتریک هستند. به عنوان یک تقریب، می‌توانیم با توجه کوچک فرض نمودن ابعاد محفظه (در نتیجه طول خط انتقال) از تضعیف دی‌الکتریک در مسیر

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، روش بهبودیافته پیشنهادی، دارای توافق خوبی با نتایج شبیه‌سازی است و برای انواع محفظه‌های غیرفلزی، تأثیر پوشش را با دقت مناسبی تخمین می‌زند. البته روش پیشنهادی، با استفاده از نتایج اندازه‌گیری نیز صحت‌گذاری شده که در بخش بعدی به آن خواهیم پرداخت. برای درک بهتر دقت روش پیشنهادی، نتایج حاصل از روش رابینسون را برای محفظه فلزی مشابه، در شکل‌های ۴ پ و ۴ ت، نمایش داده‌ایم.

جدول ۱: مشخصات نمونه دیواره‌های مرکب

نمونه	دیواره مرکب شفاف	ضخامت
۱	Plexiglas - ITO	۱۰۰ نانومتر - ۱ میلی‌متر
۲	Glass - ITO	۱۰۰ نانومتر - ۱ میلی‌متر
۳	Gold - Glass - ITO	۱۰۰ نانومتر - ۱ میلی‌متر - ۱۰ نانومتر
۴	PET Polymer - ITO	۱۰۰ نانومتر - ۱ میلی‌متر

نکته قابل توجه این که، تخمین تأثیر پوشش برای هر محفظه با استفاده از روش تحلیلی در چند ثانیه امکان‌پذیر است درحالی‌که انجام شبیه‌سازی و اجرای آن برای هر محفظه، با توجه به وجود ابعاد نانومتری در لایه‌های دیواره محفظه‌های غیرفلزی شفاف، با کمک رایانه‌های قوی، مستلزم صرف چندین ساعت است. در هر صورت مطابق آنچه که در بخش تحلیل نتایج خواهیم دید، روش تحلیلی پیشنهادی، تنها امکان تخمین تقریبی تأثیر پوشش محفظه‌های شفاف را دارد، زیرا برخی از شرایط تأثیرگذار، از قبیل امکان نفوذ موج از طریق دیواره‌های شفاف (به‌دلیل کامل نبودن و ضخامت کم هادی مورد استفاده در دیواره‌ها به‌جای فلز استفاده شده در محفظه‌های فلزی) و مختلط بودن ثابت دی‌الکتریک دیواره‌ها (ناشی از مرکب بودن دیواره‌ها) در این روش وارد نشده است. از این‌رو در این مقاله، از روش تحلیلی پیشنهادی در گام اول برای شناسایی گزینه اولیه مطلوب محفظه شفاف استفاده شده، سپس با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی، ضخامت و ابعاد محفظه برای دستیابی به شفافیت نوری و تأثیر پوشش مطلوب، بهینه‌سازی شده و در نهایت فرایند ساخت انجام می‌شود.

۳- ساخت و بهبود عملکرد محفظه‌های غیرفلزی شفاف

در این بخش، ابتدا نحوه ساخت محفظه‌های غیرفلزی شفاف دولایه را بیان کرده و عوامل مؤثر بر عملکرد آن‌ها را ارائه می‌نماییم. در گام بعدی، روش بهبود عملکرد این محفظه‌ها را با استفاده از لایه‌نشانی فیلم‌های بسیار نازک (نانولایه) طلا و با ایجاد مصالحه بین عوامل عملکردی، به‌صورت عملی بیان نموده و در انتها نتایج اندازه‌گیری نمونه‌های مختلف را تحلیل خواهیم نمود.

۳-۱- محفظه شفاف با دیواره دولایه

در گام نخست برای ساخت محفظه غیرفلزی شفاف، یک نمونه دیواره شفاف دولایه‌ای شیشه - ITO طراحی نموده‌ایم. در محفظه‌های فلزی، عامل مؤثر در عملکرد محفظه (علاوه بر محدودیت در وزن و ابعاد)، تأثیر

$$v_1 = \frac{Z_{ap}}{Z_0 + Z_{ap}} v_0, Z_1 = Z_0 \parallel Z_{ap} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c \cos(k_g P) & jZ_g \sin(k_g P) \\ j \frac{1}{Z_g} \sin(k_g P) & c \cos(k_g P) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_2 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$v_2 = \frac{v_1}{c \cos(k_g P) + j \frac{Z_1}{Z_g} \sin(k_g P)} \quad (22)$$

$$Z_2 = Z_g \frac{Z_1 + jZ_g \tan(k_g P)}{Z_g + jZ_1 \tan(k_g P)} \quad (23)$$

$$Z_3 = Z_g \frac{Z_L + jZ_g \tan(k_g(a-P))}{Z_g + jZ_L \tan(k_g(a-P))} \quad (24)$$

از آن‌جا ولتاژ نقطه مشاهده، v_p و v'_p ، به‌ترتیب در حضور و غیاب محفظه از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$v_p = v_2 \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3}, v'_p = \frac{v_0}{2} \quad (25)$$

درنهایت، تأثیر پوشش محفظه غیرفلزی از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$SE = -20 \log_{10} |v_p / v'_p| = -20 \log_{10} |2v_p / v_0| \quad (26)$$

$$SE = -20 \log_{10} \left| 2 \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} \frac{1}{\cos(k_g P) + j \frac{Z_1}{Z_g} \sin(k_g P)} \frac{Z_{ap}}{Z_0 + Z_{ap}} \right| \quad (27)$$

در یک محفظه غیرفلزی با روزنه دایروی (شکل ۱-ب)، بر اساس مرجع [۱۲]، از رابطه زیر استفاده می‌شود که r شعاع روزنه است:

$$w = l = r \sqrt{\pi} \quad (28)$$

در محفظه غیرفلزی با n روزنه مشابه (شکل ۱-پ)، با اغماض از اثر تزویج متقابل بین آن‌ها، از رابطه زیر می‌توان استفاده نمود [۱۲]:

$$Z_{ap} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{b} Z_{dsi} \frac{Z_L + jZ_{dsi} \tan(k_0 l_i / 2)}{Z_{dsi} + jZ_L \tan(k_0 l_i / 2)} \quad (29)$$

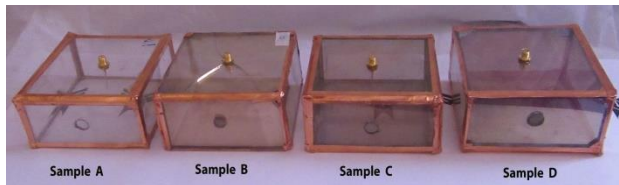
۳-۲- تصدیق روش تحلیلی

قبل از ساخت محفظه غیرفلزی شفاف، لازم است ابتدا از کفایت و مؤثر بودن روش تحلیلی ارائه شده در بخش قبلی، اطمینان حاصل نماییم. از این‌رو تأثیر پوشش انواع محفظه‌های غیرفلزی، با دیواره‌های چندلایه جدول ۱ و در ابعاد مختلف، با استفاده از نرم‌افزار CST، شبیه‌سازی و در معرض تابش نرمال موج صفحه‌ای با مؤلفه عمودی میدان الکتریکی قرار داده شده است. نقطه مشاهده میدان الکتریکی در وسط محفظه در نظر گرفته شده و نتایج محاسبه تأثیر پوشش آن با نتایج حاصل از روش تحلیلی مقایسه شده است.

همان‌طور که قبلاً بیان شد، افزایش ضخامت لایه هادی شفاف از یک سو باعث بهبود تأثیر پوشش می‌شود و از سوی دیگر شفافیت نوری محفظه را کاهش می‌دهد. بنابراین در یک طراحی مناسب باید بین این دو عامل مصالحه ایجاد نمود. با این اوصاف به کمک روش ارائه شده در بخش قبلی، یک دیواره شفاف دولایه طراحی شده که با پوشش ۱۰۰ نانومتر ITO روی زیرلایه شیشه با ضخامت ۲/۲ میلی‌متر و به کمک روش اسپاترینگ قابل ساخت است. نمونه A در شکل ۵، این دیواره ساخته شده را نمایش می‌دهد. برای ساخت یک محفظه شفاف با ابعاد $100 \times 50 \times 100$ میلی‌متر مکعب و روزنه دایروی به شعاع ۵ میلی‌متر، ابتدا دیواره‌های مختلف، ساخته شده سپس با استفاده از چسب نقره، به هم متصل شده‌اند. این کار باعث حفظ خاصیت رسانایی در لبه‌های محفظه می‌شود. همچنین برای اطمینان بیش‌تر، لبه‌های بیرونی محفظه نیز توسط نوارهای باریکی از چسب مسی (نمونه A در شکل ۶) به هم متصل شده‌اند.



شکل ۵: نمونه دیواره‌های چندلایه شفاف



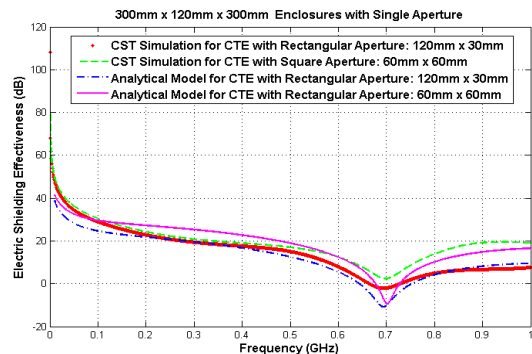
شکل ۶: نمونه محفظه‌های غیرفلزی شفاف ساخته شده

۳-۲- اندازه‌گیری

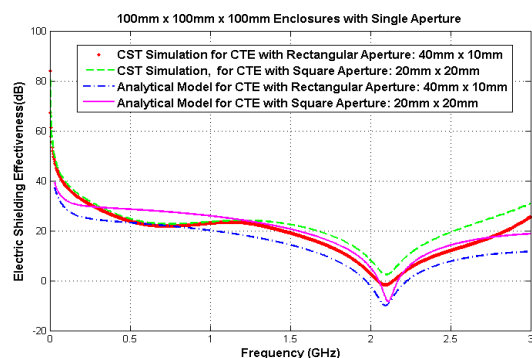
همان‌طور که قبلاً بیان شد، برای بررسی عملکرد محفظه‌های شفاف باید دو عامل تأثیر پوشش و شفافیت نوری آن‌ها را اندازه‌گیری نماییم. عامل اول میزان شفافیت نوری است که به کمک طیف‌نگاری نوری قابل توصیف است. طیف عبوری دیواره شفاف اشاره شده، با استفاده از دستگاه طیف‌نگار نوری در بازه ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر توسط آزمایشگاه اپتیک جهاد دانشگاهی شریف، اندازه‌گیری شده، که نتایج آن در شکل ۷ نمایش داده شده است.

برای اندازه‌گیری تأثیر پوشش محفظه‌ی شفاف، در آزمایشگاه سازگاری الکترومغناطیسی مرکز تحقیقات صنایع انفورماتیک، یک آنتن بوقی استاندارد، به منظور تابش امواج الکترومغناطیسی در فاصله یک متری محفظه و در گستره بسامدی ۱ تا ۳ گیگاهرتز به کار گرفته شده است. پروب اندازه‌گیری شدت میدان الکتریکی نیز در مرکز محفظه قرار داده شده است. به منظور حصول اطمینان از یکنواخت بودن میدان در محل اندازه‌گیری، ابتدا فرایند کالیبراسیون مطابق استاندارد CISPR 16-4-1 انجام می‌شود.

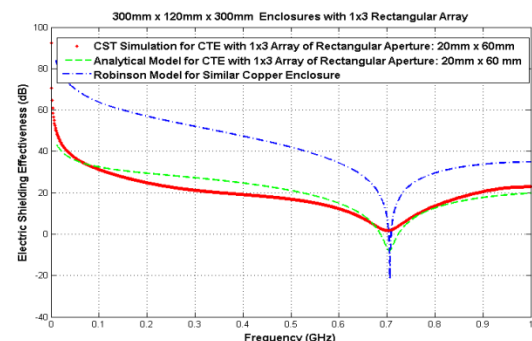
پوشش آن است درحالی‌که در محفظه‌های شفاف، میزان شفافیت نوری نیز به‌عنوان یک عامل اثرگذار تلقی می‌شود.



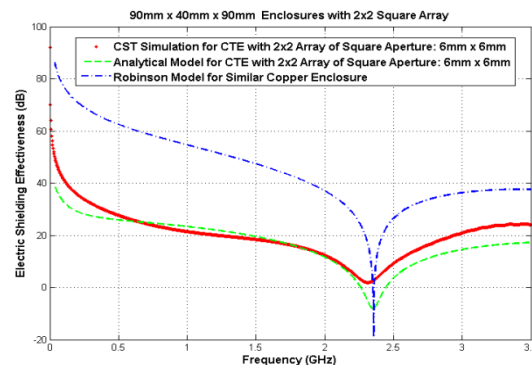
الف



ب



پ



ت

شکل ۴: تخمین تأثیر پوشش محفظه غیرفلزی شفاف با دیواره مرکب

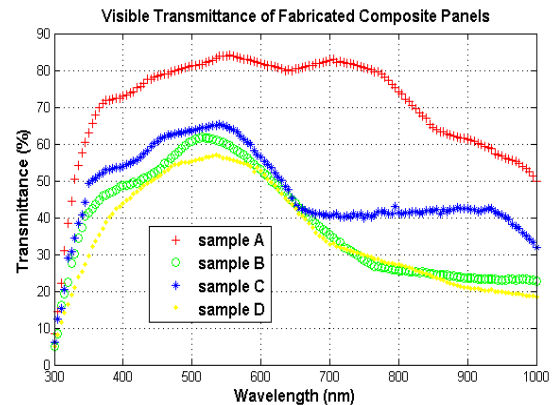
(CTE): (الف) نمونه ۱، (ب) نمونه ۲، (پ) نمونه ۳، (ت) نمونه ۴

۳-۳- لایه‌نشانی نانولایه طلا

اگرچه با مشاهده نتایج اندازه‌گیری شفافیت نوری و تأثیر پوشش محفظه شفاف نوع A، می‌توان دریافت که محفظه غیرفلزی با دیواره دولایه شفاف فوق، به صورت هم‌زمان تأثیر پوشش و شفافیت نوری مناسبی را ارائه می‌دهد، با این حال در مقام مقایسه با محفظه فلزی مشابه، تأثیر پوشش این نوع محفظه‌ها نیازمند بهبود است. از این رو، یک راهکار عملی مبتنی بر پوشش‌دهی فیلم نانولایه‌ای طلا در دیواره مرکب شفاف بخش قبلی، ارائه نموده‌ایم که ساختار آن در شکل ۳-الف، نشان داده شده است. نکته مهم در این راهکار، انتخاب ضخامت فیلم طلا است، چراکه بر اساس نتایج روش تحلیلی، مشاهده نمودیم که با افزایش ضخامت فیلم نانولایه‌ای طلا، تأثیر پوشش افزایش یافته، درحالی‌که شفافیت نوری کاهش پیدا می‌کند. بنابراین لازم است در یک طراحی بهینه و قبل از فرایند ساخت، با ایجاد مصالحه بین دو عامل شفافیت نوری و تأثیر پوشش، ضخامت مناسب فیلم طلا را انتخاب نمود. در این مرحله با توجه به تقریبی بودن روش تحلیلی، به‌منظور بهینه‌سازی عملکرد محفظه از نتایج شبیه‌سازی و روابط ۱ تا ۳ استفاده شده است تا امکان مصالحه بین دو عامل یادشده در محدوده ضخامت ۵ تا ۱۵ نانومتر فیلم طلا، فراهم شود. نتایج نشان داد که در ضخامت‌های بالای ۱۲ نانومتر، میزان شفافیت دیواره به حدود ۴۰ درصد افت می‌نماید. همچنین در مرجع [۱۰] مشاهده شده است که پوشش‌دهی فیلم طلا با ضخامت‌های کمتر از ۳ نانومتر علاوه بر مشکل نمودن کنترل فرایند ساخت، تأثیر چندانی بر مقاومت سطحی نخواهد داشت. درنهایت بر اساس یافته‌های بالا، دیواره‌های شفاف سه‌لایه‌ای با لایه‌نشانی فیلم‌های ۵، ۷ و ۱۰ نانومتری طلا روی دیواره شفاف دولایه بخش قبلی، با استفاده از روش تبخیر حرارتی (Thermal Evaporation)، ساخته شد که مشخصات آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده و نمونه آن‌ها نیز در شکل ۵ نمایش داده شده است. مانند آنچه که در بخش قبلی بیان شد، برای ساخت محفظه‌ها، نمونه‌های ساخته شده با استفاده از چسب نقره به هم متصل شده‌اند. از نوار چسب مسی نیز برای اتصال لبه لایه‌های بیرونی استفاده شده است. محفظه‌های شفاف ساخته شده را در شکل ۶ نمایش داده‌ایم. نتایج اندازه‌گیری شفافیت نوری همه نمونه‌ها در شکل ۷ نمایش یافته است. نتایج اندازه‌گیری تأثیر پوشش محفظه‌های شفاف نیز در مقایسه با نتایج حاصل از روش تحلیلی و شبیه‌سازی نیز در شکل ۹ نشان داده شده است.

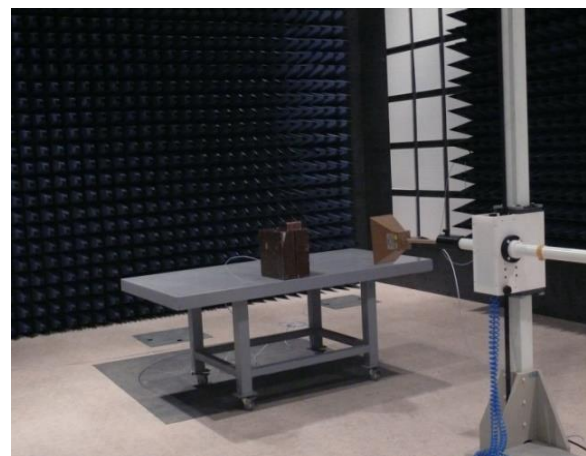
جدول ۲: مشخصات نمونه دیواره‌های مرکب شفاف ساخته شده

نمونه	دیواره مرکب شفاف	ضخامت لایه‌ها
A	Glass - ITO	۱۰۰ نانومتر - ۲/۲ میلی‌متر
B	Gold - Glass - ITO	۱۰۰ نانومتر - ۲/۲ میلی‌متر - ۷ نانومتر
C	Gold - Glass - ITO	۱۰۰ نانومتر - ۲/۲ میلی‌متر - ۵ نانومتر
D	Gold - Glass - ITO	۱۰۰ نانومتر - ۲/۲ میلی‌متر - ۵ نانومتر



شکل ۷: نتایج اندازه‌گیری شفافیت نوری دیواره‌های مرکب شفاف

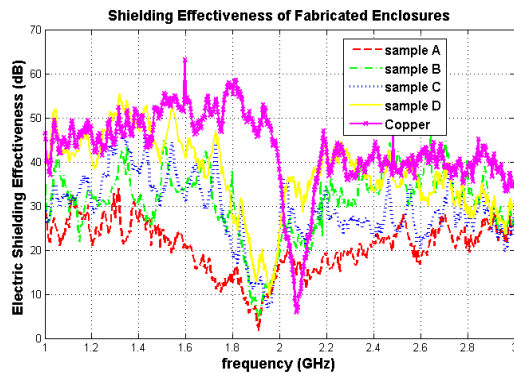
به‌منظور اندازه‌گیری تأثیر پوشش محفظه، ابتدا پروب اندازه‌گیری شدت میدان الکتریکی، بدون حضور محفظه در نقطه مشاهده در معرض تابش نرمال موج صفحه‌ای با مؤلفه عمودی میدان الکتریکی در راستای محور Z، قرار داده شده و شدت میدان الکتریکی به‌دست می‌آید. سپس شدت میدان الکتریکی دریافتی در همان نقطه با حضور محفظه، اندازه‌گیری شده و درنهایت تأثیر پوشش محفظه محاسبه می‌شود (شکل ۸ را ببینید). روش اندازه‌گیری تأثیر پوشش محفظه‌ها به‌صورت کامل‌تر در مرجع [۱۲] ارائه شده است.



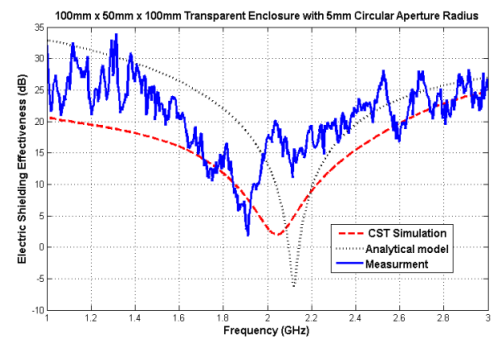
شکل ۸: اندازه‌گیری تأثیر پوشش محفظه شفاف با استفاده از مولد سیگنال Agilent, 8257C، گیرنده R&S model ESU26 و آنتن بوقی استاندارد جهت تابش نرمال موج صفحه‌ای در آزمایشگاه EMC

نتایج اندازه‌گیری تأثیر پوشش محفظه نوع A، در شکل ۹-الف، نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از روش تحلیلی بهبود یافته، شبیه‌سازی و اندازه‌گیری دارای توافق خوبی با هم هستند، به‌جز اینکه در نتایج اندازه‌گیری، جابه‌جایی بسامد تشدید وجود دارد که این موضوع در بخش تحلیل نتایج مورد بررسی بیشتری قرار خواهد گرفت.

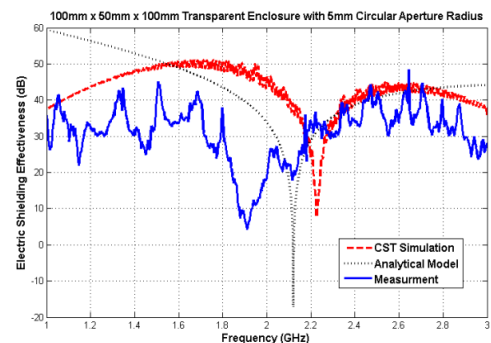
و تقریبی تأثیر پوشش در محفظه‌های غیرفلزی کوچک شفاف، می‌توان از این روش تحلیلی استفاده نمود. چند نکته قابل توجه در این نتایج قابل بحث است. نکته اول این که در نتایج تجربی، بسامد تشدید مانند روش تحلیلی و شبیه‌سازی ایده‌آل (تیز) نیست که به‌طور طبیعی جابه‌جایی بسامد تشدید ناشی از سه لایه‌شدن دیواره محفظه‌ها، را در نتایج اندازه‌گیری نمی‌توان مشاهده نمود



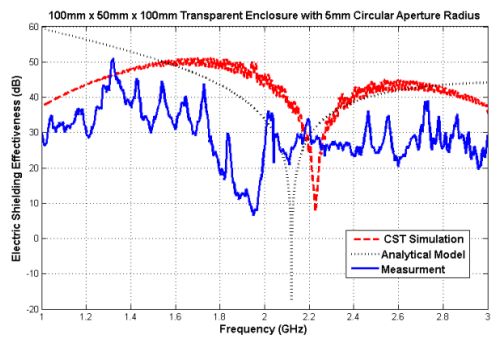
شکل ۱۰: مقایسه نتایج اندازه‌گیری تأثیر پوشش محفظه‌های مختلف این موضوع را می‌توان ناشی از عدم کیفیت لایه‌نشانی در ابعاد نانومتری دانست. زیرا از یک طرف لایه‌نشانی در ابعاد کمتر از ۱۰ نانومتر با دستگاه‌های غیرصنعتی، بسیار پیچیده است و از طرف دیگر به‌دلیل کوچکی دستگاه‌ها، نمونه‌هایی با ابعاد بالاتر از ۳ سانتی‌متر، به‌صورت غیریکنواخت پوشش‌دهی می‌شوند، یعنی در مرکز نمونه‌ها لایه‌نشانی بیشتر و در اطراف آن کمتر می‌شود که تأثیر زیادی روی مقاومت سطحی و در نهایت تأثیر پوشش محفظه می‌گذارد. به‌علاوه چسباندن دیواره‌های پوشش‌داده‌شده برای ساخت محفظه به‌صورت دستی، خود باعث ایجاد روزنه‌هایی می‌شود که می‌توانند منافذ نشت موج را تشکیل داده و نتایج تجربی را از حالت ایده‌آل خارج نمایند. از طرف دیگر جابه‌جایی بسامد تشدید در نتایج اندازه‌گیری را نسبت به نتایج شبیه‌سازی می‌توان ناشی از دو اثر عمده دانست. اثر اول ناشی از وجود ثابت دی‌الکتریک مختلط در دیواره‌های مرکب محفظه شفاف است که در روش تحلیلی لحاظ نشده اما در شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. اثر دوم ناشی از وجود پروب اندازه‌گیری شدت میدان الکتریکی است که باعث جابه‌جایی بسامد تشدید می‌شود. اما نکته مهم در اینجا است که در کاربرد عملی، بسامد تشدید واقعی محفظه بیش‌تر نزدیک به بسامد تشدید است که در آن پروب وجود ندارد (و از بسامد تشدید اندازه‌گیری‌شده دورتر است)، زیرا در عمل، پروبی درون محفظه‌ها قرار ندارد. بنابراین در کاربردهای عملی، باید بسامد تشدید اندازه‌گیری را با ضریب تصحیح به بسامد شبیه‌سازی نزدیک نماییم. همان‌طور که از نتایج اندازه‌گیری مشاهده می‌شود، افزایش ضخامت طلا باعث می‌شود که محفظه به حالت ایده‌آل (قفس فارادی) نزدیک‌تر شود و در نتیجه تأثیر پوشش افزایش یابد، که با دیدگاه تئوری نیز توافق دارد، البته نتایج تحلیلی، این بهبود را به صورت محسوس نشان نمی‌دهند. علت آن است که با تغییرات بسیار کم ضخامت طلا، اثر پدیده نفوذ موج از دیواره‌ها تغییر می‌کند درحالی‌که روش تحلیلی مبتنی بر



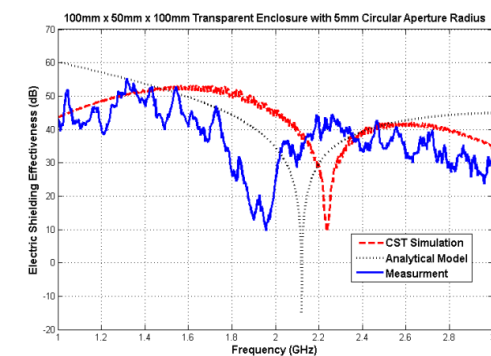
الف



ب



پ



ت

شکل ۹: مقایسه نتایج اندازه‌گیری، شبیه‌سازی و تحلیل محفظه غیرفلزی شفاف: الف) نمونه A، ب) نمونه B، پ) نمونه C، ت) نمونه D

۴-۳- تحلیل نتایج

همان‌گونه که از شکل ۹ مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از روش تحلیلی با دقت قابل قبولی نزدیک به نتایج اندازه‌گیری بوده و برای تخمین سریع

سپاسگزاری

نویسندگان، از همکاری صمیمانه مهندس ایرج ارقند در آزمایشگاه سازگاری الکترومغناطیسی مرکز تحقیقات صنایع انفورماتیک، در طول اندازه‌گیری تأثیر پوشش نمونه‌ها، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع

- [1] S. H. Kim, D. C. Park and J. H. Lee, "Shielding effectiveness of an enclosure with a dielectric backed aperture using slot line method", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 432-435, 2007.
- [2] J. H. Kwon, H. D. Choi and H. H. Park, "Numerical modeling and measurements on the shielding effectiveness of enclosure with apertures", *19th Zurich International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 887-890 2008.
- [3] F. Hodjat, R. Moini and M. Shafiee, "Shielding effectiveness of rectangular enclosure with aperture using multi resolution method of moments", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1-3, 2007.
- [4] M. Bahadorzade and A. A. Lotfi-Neyestanak, "A novel and efficient technique for improving shielding effectiveness of a rectangular enclosure using optimized aperture load", *Elektronika IR Elektrotehnika*, vol. 18, no. 10, pp. 89-92, 2012.
- [5] L. Wang, Y. Gao and Y. Shen, "Analysis on shielding effectiveness of aperture arrays with different spacing", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 333-336, 2007.
- [6] D. Seetharamdoo, M. Berbineau and A. C. Tarot, "Evaluating the potential shielding properties of periodic meta-material slabs", *IEEE Europe International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1-4, 2009.
- [7] H. Saadi and R. Oussaid, "Materials effect on shielding effectiveness", *IEEE International Conference on Signal Processing and Communications (ICSPPC)*, Dubai, United Arab Emirates, pp. 999-1002, 2007.
- [8] M. S. Sarto, F. Sarto, M. C. Larciprete and et al. "Nanotechnology of transparent metals for radio frequency electromagnetic shielding", *IEEE Transaction on EMC*, vol. 45, no. 4, pp. 586-594, 2003.
- [9] A. Tamburrano, S. Greco, G. D. Bellis and et al. "Transient shielding performances against UWB pulses of transparent enclosures loaded with Nano-composites for resonances damping", *IEEE International Symposium on EMC*, pp. 1-6, 2012.
- [10] M. R. Haraty, M. Naser-Moghaddai, A. A. Lotfi-Nyestanak and A. Nikfarjam, "Improving the efficiency of transparent antenna using gold Nano layer deposition", *IEEE Antennas and Wireless Propagation letters*, vol. 15, PP. 4-7, 2016.
- [11] M. R. Haraty, M. Naser-Moghaddai, A. A. Lotfi-Nyestanak and A. Nikfarjam, "Circular ring optically transparent antenna for ultra-wideband applications", *ACES Journal*, vol. 30, no. 2, pp. 208-212, 2015.
- [12] M. P. Robinson, T. M. Benson, C. Christopoulos and et al., "Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures", *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, vol. 40, pp. 240-248, 1998.
- [13] Z. Yu-Tong, W. Bian, Z. Yu and H. Yang, "Transparent electromagnetic shielding enclosure with CVD graphene", *Applied Physics Letters*, vol. 109, pp. 103507, 2016.
- [14] F. T. Belkacem, M. Bensetti, A. G. Boutar and et al., "Combined model for shielding effectiveness estimation of a metallic enclosure with apertures", *IET Science Measurement and Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 88-95, 2011.
- [15] R. Garg, P. Bhartia, I. J. Bahl and et al., *Microstrip Antenna Design Handbook*, App. B, Artech House, Norwood, 2001.
- [16] K. C. Gupta, R. Garg and I. J. Bahl, *Microstrip Lines and Slot lines*, Chapter 7, Artech House, Norwood, 1979.
- [17] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, Chapter 5, pp. 220- 236, John Wiley & Sons, New york, 1989.

محاسبه اثر القای موج از روزه‌ها استوار بوده و توانایی در نظر گرفتن اثر نفوذ موج را ندارد. موضوع قابل توجه دیگر این است که بهبود تأثیر پوشش در یک گستره بسامدی، قابل تعریف است و به‌صورت نقطه‌ای (در یک بازه بسامدی خیلی کوچک) نمی‌توان در رابطه با آن تحلیلی ارائه نمود، زیرا علاوه بر بسامد تشدید محفظه، اثرات تشدید دیگری مانند اثر متقابل روزه- محفظه، اثر مدهای بالاتر موج تابشی، اثر لبه‌های محفظه و اثر پروب اندازه‌گیری وجود دارد که در شکل موج دریافتی تأثیرگذار هستند. از این رو برای قضاوت صحیح در مورد بهبود تأثیر پوشش باید در کل گستره بسامدی مورد نظر، اثر تغییر ضخامت پوشش‌ها را مورد مطالعه قرار داد. از طرفی با مقایسه نتایج شفافیت نوری نمونه‌ها در شکل ۸ نیز مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت نانولایه طلا، شفافیت نوری آن کاهش می‌یابد که با نتایج حاصل از روابط تئوری نیز موافقت دارد. با این اوصاف، همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، درحالی‌که محفظه شفاف دولایه دارای تأثیر پوشش مناسبی نیست، محفظه شفاف با پوشش ۱۰ نانومتر از فیلم طلا، تأثیر پوششی نزدیک به تأثیر پوشش محفظه فلزی (از جنس مس) مشابه دارد (حدود ۲۰ دسی‌بل بهتر از محفظه شفاف دولایه در کل گستره بسامدی به‌جز ناحیه تشدید) و درعین حال شفافیت نوری آن در حد قابل قبولی برای کاربردهای عملی (حدود ۶۰ درصد) قرار دارد، درحالی‌که محفظه فلزی مشابه، قابلیت شفافیت نوری ندارد.

۴- نتیجه‌گیری

محفظه‌های فلزی، در کاربردهایی که نیاز به وزن کم، ابعاد کوچک و شفافیت نوری به‌صورت هم‌زمان با حفاظت الکترومغناطیسی دارد، گزینه‌های مناسبی به‌شمار نمی‌آیند. محفظه‌های غیرفلزی شفاف ارائه شده در این مقاله می‌توانند گزینه‌های مناسبی برای این کاربردها باشند. در گام اول توسعه چنین محفظه‌هایی، یک روش تحلیلی برای تخمین تقریبی تأثیر پوشش محفظه‌های غیرفلزی، ارائه شد که نتایج آن دارای توافق قابل قبولی با نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری بوده، درعین حال نسبت به روش شبیه‌سازی دارای سرعت بسیار بهتری است. در هر صورت، محفظه‌های شفاف دولایه دارای تأثیر پوشش مناسبی نسبت به نمونه مشابه فلزی نیستند، بنابراین در گام دوم، یک راه‌حل عملی برای بهبود تأثیر پوشش این محفظه‌ها ارائه شد. به‌طور خاص، با لایه‌نشانی فیلم‌های بسیار نازک طلا، محفظه‌های غیرفلزی شفاف با دیواره سه‌لایه توسعه داده شد. سرانجام با ایجاد مصالحه بین دو عامل تأثیر پوشش و شفافیت نوری و در نتیجه انتخاب ضخامت بهینه فیلم نانولایه طلا، عملکرد محفظه‌های غیرفلزی شفاف، بهینه‌سازی شد. نتایج نشان می‌دهد محفظه شفاف پوشش‌داده‌شده با فیلم ۱۰ نانومتری از طلا، دارای تأثیر پوششی، نزدیک به محفظه فلزی (حدود ۲۰ دسی‌بل بهتر از محفظه شفاف دولایه) بوده، درعین حال دارای شفافیت نوری قابل قبولی (در حدود ۶۰ درصد) است درحالی‌که محفظه فلزی قابلیت شفافیت نوری ندارد.