دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۴
پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۰۷

(علمی–ترویجی)

فناوری آنتن‌های شفاف و نقش ویژه آن‌ها در کاربردهای فضایی

نگین کوروسدری[۱]، دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده شریعتی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای
زهرا شاطریان[۲]، استادیار، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده شریعتی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای
علی کرمی هرستانی[۳*]، استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

* نویسنده مخاطب، آدرس: تهران، کدپستی: ۸۳۴-۱۴۶۶۵

این مقاله به بررسی آنتن‌های شفاف به عنوان راه حلی برای حل مشکلاتی مانند زیبایی، آیرودینامیک بودن آنتن در کاربردهای مختلف و نقش آن در کاربردهای فضایی می‌پردازد. در این مقاله، دو دستهٔ کلی آنتن‌های شفاف بررسی شده است. در دستهٔ اول، ساختار آنتن که در آنتن‌های متداول معمولاً از فلزات ساخته می‌شود، با استفاده از تکنولوژی فیلم نازک و یا با مشبک نمودن قسمت‌های فلزی آنتن محقق می‌شود. دستهٔ دوم، آنتن‌های تشدیدکنندهٔ دی‌الکتریک (DRA) شفاف است. آنتن‌های DRA متداول از جنس ماده‌ای غیررسانا ساخته می‌شود. بنابراین، با جایگزین کردن دی‌الکتریک‌های متداول با دی‌الکتریک‌های شفاف، مانند شیشه، می‌توان آنتن‌های DRA شفاف را محقق نمود. در انتها، به تبیین این نکته پرداخته خواهد شد که آنتن‌های شفاف می‌توانند در کاربردهای فضایی با ادغام با سایر ادوات، مانند سلول‌های خورشیدی به کاهش حجم و وزن ماهواره‌ها کمک کنند.

واژه‌های کلیدی: آنتن‌های شفاف، فیلم نازک، سلول خورشیدی، ماهواره

Transparent Antenna Technology and Its Application in Space

N. Kourosdari[1], B.Sc. Student, Department of Electrical and Computer Engineering, Shariaty Technical College, Technical and Vocational University
Z. Shaterian[2], Assistant Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Shariaty Technical College, Technical and Vocational University
A. Karami Horestani [3*], Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research, and Technology

*Corresponding Author, Postal Code: 14665-834, Tehran, IRAN
karami@ari.ac.ir

This paper is focused on the application of transparent antennas to address the issues related to the unpleasant appearance and non-aerodynamic behavior of traditional antennas. Transparent antennas are divided in two main categories. In the first category, the resonant structure and the ground plane of an antenna, which is usually made of metal, is made of thin film transparent materials or a metallic mesh. In the second category, the structure of a dielectric resonator antenna (DRA), which is made opaque dielectrics, is realized, using a transparent dielectric, such as glass. In this paper, common types of transparent antennas and the methods of realizing each of these antennas are reviewed. The paper also discusses different potential applications of such antennas, especially space applications to save the limited available mass budget in small satellites.

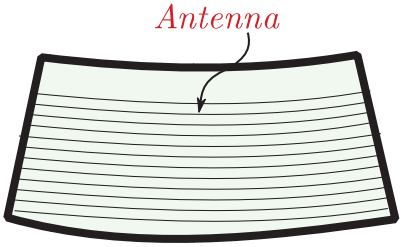
Keywords: Transparent Antennas, Thin Film, Solar Cell, Satellite

۱- مقدمه

عموماً آنتن‌هایی که با استفاده از رساناها یا دی‌الکتریک‌ها ساخته می‌شوند، نور را از خود عبور نمی‌دهند و بنابراین از نظر اپتیکی غیرشفاف هستند. در مقایسه، آنتن‌های شفاف[1]، آنتن‌هایی هستند که در عین حال که قابلیت تابش یا دریافت امواج الکترومغناطیسی را دارند، دارای ساختار یا مواد تشکیل‌دهنده با امکان عبور نور هستند [۱]. ابتدا، آنتن‌های شفاف در پاسخ به نیاز به نصب آنتن بر روی شیشهٔ خودروها برای فراهم کردن امکان دریافت و ارسال امواج و دسترسی به شبکه بی‌سیم موبایل بدون نیاز به آنتن‌های سنتی نصب شده بر روی بدنهٔ خودروها و بدون ایجاد مانع در میدان دید راننده ابداع شدند. از سوی دیگر، با توجه به پیشرفت هوش مصنوعی که سبب پیدایش نگرش ایجاد شهرهای هوشمند شده است، نیاز به زیرساخت‌هایی از جمله استفاده کارآمدتر از جاده‌ها، سیستم‌های انتقال توان الکتریکی و ارتباطات بی‌سیم به وجود آمده است. در این راستا، نیاز به انواع آنتن‌های کوچک، مسطح و همچنین آنتن‌های شفاف با قابلیت نصب در وسایل و دستگاه‌های کوچک مانند لوازم الکتریکی خانگی همچون یخچال‌ها، سیستم گرمایش و سرمایش و سیستم‌های امنیتی بیش از پیش احساس می‌شود.

کاربرد نوظهور دیگر آنتن‌های شفاف ادغام آن با سلول‌های خورشیدی به خصوص ماهواره‌هاست. هزینه‌های بسیار بالای قرار دادن و نگهداری ماهواره‌ها در مدار موجب شده است تا طراحان و سازندگان ماهواره حداکثر تلاش خود را بنمایند تا حجم و جرم کلیهٔ المان‌های ماهواره در حد امکان کوچک و سبک باشد. این مسئله به خصوص در مورد ادوات نسبتاً حجیم و سنگین مانند سلول‌های خورشیدی و آنتن‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار است. یکی از راه‌های رسیدن به این هدف استفاده از ادواتی است که با وجود حجم و جرم محدود عملکرد چندکاره[2] داشته باشد. در این راستا، پژوهشگران سعی می‌کنند تا با ادغام سلول‌های خورشیدی و آنتن‌ها در جرم و حجم ماهواره‌ها صرفه‌جویی کنند. با استفاده از آنتن‌های شفاف نصب شده بر روی سلول‌های خورشیدی، آنتن عملکرد دریافت و ارسال امواج رادیویی را انجام داده و درعین‌حال مانع جذب نور توسط سلول‌های خورشیدی نمی‌شود [۱].

آنتن‌های شفاف دارای جنبه زیبایی‌شناختی است. زیرا، امکان پنهان کردن آنتن از دید وجود دارد. به عنوان مثال، نصب آنتن‌هایی از جنس فیلم‌های شفاف بر روی پنجره‌های ساختمان‌ها می‌تواند مانع از زشت شدن چهرهٔ ساختمان‌ها و شهرها توسط انواع آنتن‌های فلزی سنتی نصب شده بر روی ساختمان‌ها شود. نمونه‌ای دیگر از کاربرد آنتن‌های شفاف، استفاده در شیشه‌های خودرو با کاربردی دوگانه است. به گونه‌ای که ساختار شفاف به عنوان آنتن عمل کرده و در عین حال عمل محافظت، مه‌گیری و یا یخزدایی شیشه‌ها را انجام دهد. چنین آنتنی بر زیبایی خودرو می‌افزاید و حالت آیرودینامیک خودرو را نیز حفظ می‌کند [۱]. شکل **۱** تصویر مه‌گیر نصب شده بر روی شیشهٔ عقب یک خودرو را نمایش می‌دهد که می‌تواند به صورت همزمان به عنوان یک آنتن مشبک نیز عمل کند. ساختار آنتن مشبک از یک سیم نازک تشکیل شده است که علاوه بر تشعشع یا دریافت امواج رادیویی، امکان گرم کردن شیشه برای مه‌گیری را فراهم می‌کند [۱].



شکل (۱): نمایشی از کاربرد دوگانه یک آنتن شفاف پیاده‌سازی شده با استفاده از خطوط مارپیچ بر روی شیشهٔ خودرو.

۲- انواع روش‌های پیاده‌سازی آنتن‌های شفاف

انواع بنابر پژوهش‌های مختلفی که تاکنون ارائه شده‌اند، آنتن‌های شفاف را می‌توان به دو دستهٔ کلی تقسیم کرد. در دستهٔ اول تشدیدکننده یا ساختار آنتن از یک ماده رسانا تشکیل شده است. اما از آنجاکه فلزات رسانا از دیدگاه نوری شفاف نیستند، در طراحی این دسته از آنتن‌های شفاف معمولاً از ساختارهای مشبک و یا ساختارهای فیلم نازک رسانا استفاده می‌شود. در ادامهٔ این متن، به این دسته از آنتن‌ها با عنوان آنتن‌های شفاف مشبک و آنتن‌های فیلم نازک اشاره می‌شود. در دستهٔ دوم، تشدیدکننده آنتن از یک مادهٔ غیررسانا یعنی مواد دی‌الکتریک مانند انواع پلاستیک با ضریب دی‌الکتریک بالا تشکیل شده‌اند که اصطلاحاً به این دسته از آنتن‌ها آنتن‌های تشدیدکنندهٔ دی‌الکتریک[3] گفته می‌شود [۱]. اگر دی‌الکتریک استفاده شده در این نوع آنتن از موادی باشد که علاوه بر داشتن

1. Transparent Antennas
2. Multifunctional
3. Dielectric Resonator Antenna (DRA)

ضریب دی‌الکتریک بالا از نظر اپتیکی شفاف باشد (مثل شیشه) آنتن DRA شفاف خواهد بود.

آنتن‌های شفاف مشبک در مقایسه با آنتن‌های DRA می‌توانند راندمان تابشی نسبتاً بالاتری داشته باشند. اما این راندمان بالا با استفاده از شبکه‌های سیمی فشرده‌تر امکان‌پذیر است که به قیمت محدودیت بیشتر شفافیت در این دسته از آنتن‌ها به دست می‌آید. بنابراین، اگر بخواهیم با حذف فلز بیشتر، عبور نور را افزایش دهیم با کاهش راندمان تابشی آنتن مواجه خواهیم شد. آنتن‌های فیلم نازک درصد بیشتری از نور را از خود عبور می‌دهند اما به دلیل محدودیت رسانایی، تلفات بیشتری داشته و در نتیجه به‌طور معمول بهرهٔ آنتن نسبتاً کمتری دارند [۱].

ساخت بسیاری از آنتن‌های شفاف مشبک با استفاده از روش‌های مرسوم ساخت مدارها امکان‌پذیر است اما در برخی موارد خاص روندی وقت‌گیر، پیچیده و هزینه‌بر دارد. اما با پیشرفت فناوری چاپ امکان استفاده از جوهرهای رسانا و بسترهای شفاف در چاپگرهای تجاری فراهم شده است. استفاده از این فناوری‌ها باعث می‌شود فرآیند ساخت آنتن‌های شفاف مشبک به نسبت ساده‌تر شده و با هزینهٔ کمتری قابل انجام باشد [۱]. نانوذرات طلا، نقره و مس از جمله مواد چاپی هستند که می‌توان برای پایین آمدن مقاومت سطحی [۲] تا حد کمتر از یک اهم بر مترمربع استفاده کرد. مشکل تلفات به‌طور نسبی بالا و بهرهٔ نسبتاً پایین در آنتن‌های پیاده‌سازی شده با چاپ جوهرهای رسانا را می‌توان تا حدی با افزایش ضخامت چاپ بهبود داد. تکنیک‌هایی مانند جوهرافشان، فلکسوگرافی[4]، گراور[5]، صفحه نمایش و چاپ‌های اسپری برای تولید آنتن‌های شفاف مختلف [۳-۲] و همچنین در پیاده‌سازی تگ‌های RFID [۴] مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از چاپ جوهرهای رسانا به آنتن‌های صفحه‌ای محدود نشده و اخیراً آدامز[6] و همکارانش چاپ سه‌بعدی این آنتن‌ها را بررسی نموده‌اند [۵]. شکل **۲** یک نمونه آنتن سه‌بعدی که با استفاده از چاپ مواد رسانا به شکل خطوط مارپیچ بر روی نیم کرهٔ شیشه‌ای پیاده‌سازی شده است را نشان می‌دهد.

۳- بررسی انواع آنتن‌ها

در ادامه به تفضیل مهمترین آنتن‌های شفاف را مورد بررسی خواهیم داد. از آن جمله می‌توان به آنتن‌های مشبک، آنتن‌های فیلم نازک و تشدیدکنندهٔ دی‌الکتریک اشاره کرد.

شکل (۲): آنتن با خطوط پیچشی ساخته شده بر روی نیم‌کره شفاف شیشه‌ای [۶].

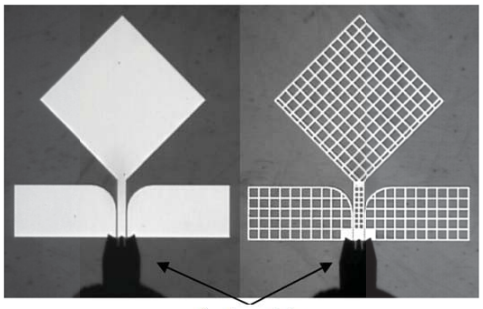
۳-۱- آنتن‌های مشبک

آنتن‌های مشبک با از بین بردن بخش‌هایی از صفحه یا قطعه رسانای فلزی (مانند مس یا نقره) برای عبور نور، ساخته می‌شوند و در نتیجه آنتن به دست آمده تا حدودی شفاف است. چنین آنتنی می‌تواند شفافیت لازم برای ادغام با سلول‌های خورشیدی را فراهم نموده و بدین منظور به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است.

از بین فرم‌های مختف آنتن‌های مشبک، آنتن‌های پچ مشبک با صفحه زمین یکپارچه و آنتن پچ مشبک با زمین مشبک به دلیل شفافیت بیشتر مورد توجه هستند. با وجود اینکه پارامترهای عملکردی این آنتن‌ها (از جمله بهره، راندمان و غیره) از مشابه‌های کاملاً یکپارچه و یکدست آن‌ها کمتر است، اما ویژگی شفاف بودن این آنتن‌ها که در بسیاری از کاربردها از اهمیت خاصی برخوردار است. از این‌رو، پژوهش‌های وسیعی در خصوص این آنتن‌ها و روش‌های افزایش راندمان آنها انجام شده است. بررسی‌های اخیر نشان داده‌اند که استفاده از بافت‌های مشبک نازک و متراکم با رسانایی بالا می‌تواند به‌طور قابل توجهی عملکرد آنتن‌های مشبک و راندمان تابشی آنها را افزایش دهد و تا حد خوبی کارآیی آن‌ها را قابل مقایسه با مشابه‌های غیر مشبک و غیر شفاف خود کنند [۶].

با رشد سریع دنیای اطلاعات و ارتباطات، داشتن انواع ارتباطات مخابراتی در همهٔ مکان‌ها از جمله خودروها اجتناب‌ناپذیر شده است. در نتیجه لازم است بر روی هر خودور آنتن‌های متعددی برای کاربردهای مختلف نصب شود. از طرفی، برای حفظ زیبایی ظاهری و خواص آیرودینامیکی، استفاده از آنتن‌های مسطح قابل نصب بر روی بدنه یا شیشه‌های خودروها به صورتی که از دید مخفی باشند (به عنوان مثال آنتن‌های شفاف) مطلوب است. در این مورد آنتن‌های مشبک پیاده شده بر روی زیرلایه های شفاف انتخابی مناسب است. چراکه به راحتی می‌توان آن را تولید نمود و به صورتی که مانع دید نشود بر روی شیشه‌های خودرو نصب کرد [۱].

4. Flexography
5. Gravure
6. Adams



شکل (۳): الف) آنتن تک قطبی فلزی و ب) آنتن تک قطبی شفاف پیاده‌سازی شده با فلز مشبک [۷].

۳-۲- آنتن‌های فیلم نازک

برخلاف آنتن‌های مشبک، آنتن‌های فیلم نازک شفافیت خود را مدیون موادی با شفافیت بالا و مقاومت الکتریکی کم هستند. فناوری فیلم‌های نازک رسانا و شفاف به‌طور گسترده‌ای به عنوان الکترود و همچنین برای سیم‌کشی در سلول‌های فتوولتائیک [۹] و صفحه نمایش‌های کریستال مایع (LCD) لمسی استفاده می‌شود. مواد متنوعی برای تحقق این نوع فیلم‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد. از جمله می‌توان به جوهرهای رسانا، پلیمرهای رسانا مانند فیلم پلی‌استر با روکش نقره (AgHT) [۱۳-۸]، اکسیدهای نیمه‌هادی و نیتریدهای فلزی و اکسیدهای شفاف رسانا[۷] که به صورت مخفف TCO نامیده می‌شود، اشاره کرد. همچنین، تحقیقات نشان می‌دهد که نانوتیوپ‌های کربنی [۱۴] و فیلم‌های نازک گرافنی [۱۵] از جمله فیلم‌های امیدوارکننده و شفاف در آینده هستند.

برای استفاده از فناوری فیلم نازک برای پیاده‌سازی آنتن‌های شفاف، فیلم باید به اندازه کافی نازک باشد تا در محدودهٔ طول موج نور مرئی شفاف بوده و در عین حال باید به اندازه کافی ضخیم باشد تا در محدودهٔ فرکانسی مایکروویو کارآمد باشد. توجه به این نکته لازم است که یک فیلم رسانای نازک با ضخامت کمتر از عمق پوستی، هدایت الکتریکی کمتری نسبت به حالت کلی خود دارد. در نتیجه آنتن‌های فیلم نازک رسانا معمولاً دارای راندمان تابشی کمتری نسبت به نوع مشبک هستند. پژوهش در خصوص افزایش رسانایی فیلم‌های نازک بدون کاهش شفافیت آنها ادامه دارد. برخی از این پژوهش‌ها نشان داده است که می‌توان خاصیت رسانایی TCOهایی از جمله ZnO، SnO2 و In2O3 را با دوپینگ[۸] زیاد با ناخالصی‌هایی مانند آلومینیوم یا قلع افزایش داد [۱]. فیلم‌های نازک دوپ شده با برخی اکسیدها مانند ای-زد-او[۹] یا آی-تی-او[۱۰] یا اف-تی-او[۱۱]، محبوب‌ترین فیلم‌هایی هستند که توسط صنایع سلول‌های خورشیدی و صنایع خودروسازی استفاده می‌شوند [۱].

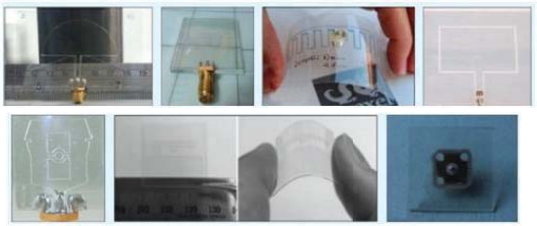
در حال حاضر، بین تمام فیلم‌های رسانای یک لایه، ITO به دلیل داشتن هدایت الکتریکی پایدار و شفافیت نسبتاً خوب، یکی از بهترین انتخاب‌ها است [۱۷-۱۶]. برای داشتن هدایت الکتریکی بالاتر می‌توان از ترکیب ITO با نقره (Ag) برای ساخت فیلم‌های چندلایه استفاده نمود. فیلم حاصل یک ساختار سه لایه است که با ساندویچ کردن یک لایه از پوشش نقره در بین دو فیلم ITO شکل گرفته است. این نوع فیلم رسانا از محبوبیت بالایی برخوردار است. چراکه دارای قابلیت نسبی انتقال نور مرئی بالاتر، رنگ تقریبی خنثی و مقاومت الکتریکی نسبی کمتر است. مهم‌تر از همه می‌توان آن را در پلی‌استر انعطاف‌پذیر قرار داد درحالی‌که امکان خم شدن و انعطاف‌پذیری خود را حفظ می‌کند و دارای مقاومت الکتریکی نسبتاً کمی است [۱].

اگرچه ITO از دیدگاه مشخصات مقاومتی و شفافیت انتخاب بسیار خوبی است [۱۹-۱۸]، ولی به دلیل کمیاب بودن عنصر ایندیوم و در نتیجه قیمت بالای آن پژوهشگران در جستجوی مواد جایگزین برای این عنصر هستند. در این میان AZOو GZO[۱۲] به دلیل شفافیت نوری زیاد و مقاومت کم که قابل مقایسه با ITO است از امیدوارکننده‌ترین کاندیداها محسوب می‌شود [۲۸-۲۰].

به دلیل شکننده بودن، فیلم‌های نازک الکتریکی و شفاف را معمولاً با استفاده از روش‌های سنتز از قبیل فناوری سپوترینگ[۱۳]، تبخیر[۱۴]، اسپری پیرولیز[۱۵] (تجزیه در اثر حرارت)، رسوب لیزر پالس[۱۶]، انباشت بخار شیمیایی[۱۷]، سول ژل[۱۸]، حمام رسوب شیمیایی[۱۹]، آبکاری[۲۰] و غیره بر روی سطح دی‌الکتریک پشتیبان دیگر پوشش می‌دهند [۲۹]. در میان همه روش‌ها، لکه‌دار کردن به‌طور گسترده‌ای در تولید انبوه فیلم‌های مختلف رسانای یک یا چندلایه و شفاف استفاده می‌شود [۳۰]. تصویر نمونه‌هایی از آنتن‌های شفاف فیلم نازک در شکل **۴** نمایش داده شده است.

7. Transparent Conducting Oxide (TCO)
8. Doping

9. AZO (Al-doped ZnO)
10. ITO (In2O3- doped Sn)
11. FTO (SnO2-doped F)
12. GalliumZincOxide
13. Sputtering
14. Evaporation
15. Spray Pyrolysis
16. Pulsed Laser Deposition
17. Chemical Vapor Deposition (CVD)
18. Sol–gel
19. Chemical Bath Deposition
20. Electroplating



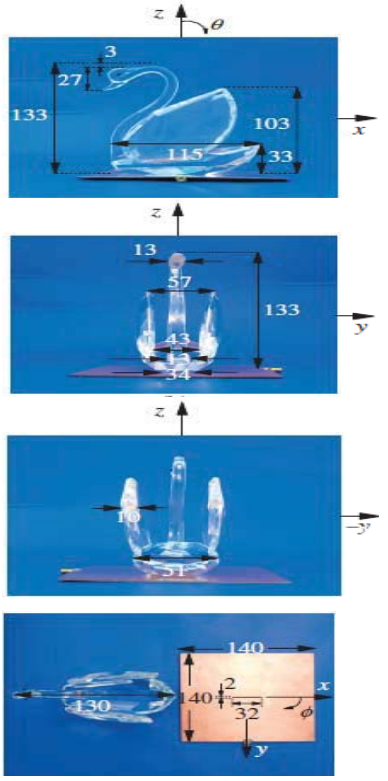
شکل (۴): نمونه‌هایی از انواع آنتن‌های فیلم نازک برای کاربرد در فرکانس‌های مختلف [۳۰].

۳-۳- آنتن‌های تشدیدکنندهٔ دی‌الکتریک (DRA)

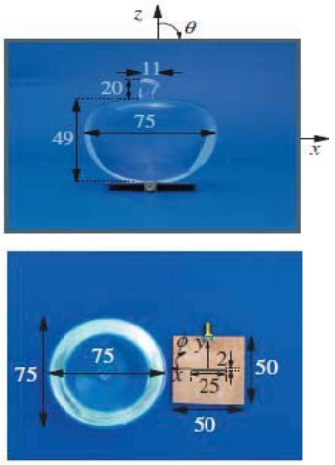
بر اساس پیشینهٔ در دسترس از دهه ۱۹۶۰ میلادی، از تشدیدکنندهٔ دی‌الکتریک در طراحی‌های فیلترها [۳۲-۳۱] و نوسان‌سازها [۳۱-۳۰] به وفور استفاده شده است. دلیل این استفادهٔ وسیع ضریب کیفیت[21] بالای این تشدیدکننده‌ها است که برای طراحی فیلترها و نوسان‌سازهای با راندمان بالا ضروری است. از جمله مزیت‌های دیگر تشدیدکننده‌های دی‌الکتریک داشتن تلفات کم، هزینهٔ نسبی کمتر، اندازهٔ کوچک، وزن کم و سهولت تحریک است که این مزایا باعث استفاده از این تشدیدکننده‌ها در طراحی ادوات مختلف مایکروویوی شده است [۳۵-۳۴].

به دلیل راحتی ساخت و نفوذپذیری بالای الکتریکی، بیشتر دی‌الکتریک‌های گزارش شده از سرامیک غیرشفاف یا ترکیبات شیمیایی ساخته می‌شود. اما برای به دست آوردن آنتن‌های شفاف لازم است از مواد دی‌الکتریک شفاف مانند شیشه استفاده نمود. با توجه به تلفات بسیار کم شیشه، راندمان آنتن‌های تشدیدکنندهٔ دی‌الکتریک شیشه‌ای به خوبی آنتن‌های تشدیدکنندهٔ دی‌الکتریک معمولی است. جالب اینجاست که ویژگی شفافیت آنتن‌های تشدیدکنندهٔ دی‌الکتریک شیشه‌ای را می‌توان برای اهداف چند منظوره مانند تزئینات هنری و کابردهای نورپردازی نیز مورد استفاده قرار داد. به عبارتی آنتن تشدیدکنندهٔ دی‌الکتریک در شکلی تزیینی طراحی می‌شود که علاوه بر کاربرد دریافت یا ارسال امواج دارای شکلی تزیینی باشد. شکل‌های **۷-۵** چند نوع از این آنتن با اشکال تزیینی متفاوت و همچنین شکل **۸** انواع تحریک متفاوت را نمایش می‌دهد. آنتن‌های آنتن‌های تشدیدکنندهٔ دی‌الکتریک شیشه‌ای صرف‌نظر از شکل و ضخامتشان، در صورت طراحی درست می‌توانند هم شفافیت نوری خوب و هم راندمان تابشی نسبتاً بالایی را به‌طور همزمان فراهم نمایند [۱].

نکتهٔ قابل توجه دیگر این است که بر خلاف مواد دی‌الکتریک معمولی که با افزایش ضخامت از شفافیت آنها کاسته می‌شود، به دلیل اینکه شیشه در هر ضخامت و شکلی همواره شفاف است، کاهش عمق پوستی در آنتن‌های شفاف شیشه‌ای مشکلی ایجاد نمی‌کند. نکتهٔ مهم دیگر اینکه دی‌الکتریک شیشه‌ای افت رسانایی بسیار ناچیزی دارد که این مشخصه می‌تواند در محدودهٔ موج میلی‌متری امری بسیار مهم باشد.

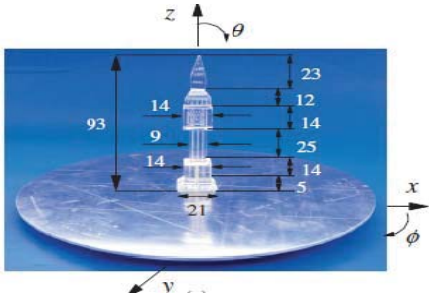


شکل (۵): آنتن تشدیدکنندهٔ دی‌الکتریک شفاف با پیکربندی تزیین قو همراه با شکاف در چهار نمای: الف) نمای عقب، ب) نمای جانبی، ج) نمای بالا و د) نمای جلو(اندازه‌ها برحسب میلی‌متر) [۳۶].

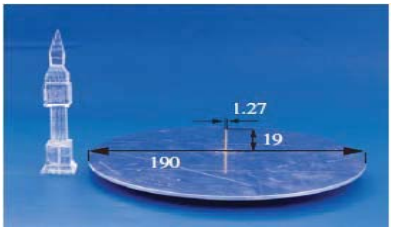


شکل (۶): آنتن تشدیدکنندهٔ دی‌الکتریک شفاف با پیکربندی سیب تحریک شونده به وسیلهٔ یک شکاف در دو نمای الف) نمای جانبی و ب) نمای بالا (اندازه‌ها برحسب میلی‌متر) [۳۶].

21. Quality Factor

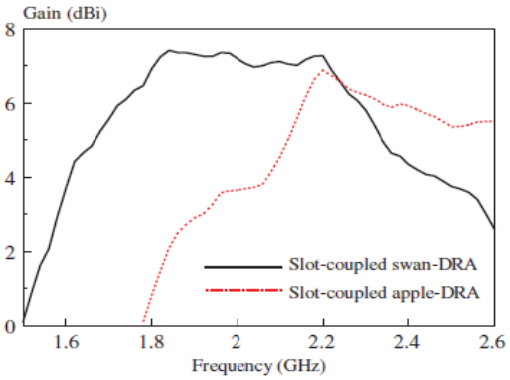


الف)



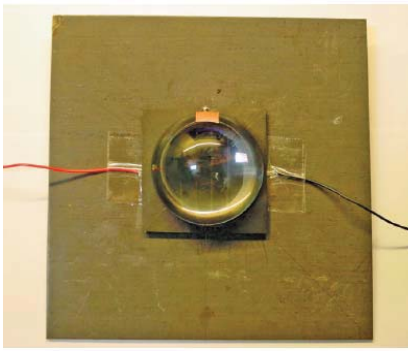
ب)

شکل (۷): تصویرهایی از یک آنتن تشدیدکنندهٔ دی‌الکتریک تزیینی از جنس شیشه به شکل ساختمان تحریک شونده به وسیلهٔ پروب، الف) آنتن تشدیدکنندهٔ دی‌الکتریک شیشه‌ای پوشاننده پروب و ب) تصویر آنتن تشدیدکنندهٔ دی‌الکتریک شیشه‌ای و پروب به‌طور جداگانه [۳۶].



شکل (۸): بهره اندازه‌گیری شده برای دو آنتن شفاف تشدیدکنندهٔ دی‌الکتریک شیشه‌ای با پیکرهٔ قو همراه با تحریک به وسیلهٔ شکاف آنتن و با پیکره سیب همراه با تحریک به وسیلهٔ پروب [۳۶].

امروزه پژوهشگران سعی می‌کنند سیستم‌های ارتباط بی‌سیمی طراحی کنند که به صورت دو یا چند منظوره مورد استفاده قرار گیرند [۳۷]. چراکه این طرح‌ها به‌طور قابل توجهی سبب کاهش حجم سیستم و کاهش هزینه‌ها می‌شود. در این راستا شکل **۹** کاربردی دوگانه از آنتن‌های تشدیدکنندهٔ دی‌الکتریک شفاف را نمایش می‌دهد که در آن ساختار نیم‌کره شفاف علاوه بر عملکرد آنتنی به عنوان لنز نوری برای یک صفحه سلول خورشیدی مورد استفاده قرار گرفته است [۳۸].



شکل (۹): آنتن نیم‌کرهٔ تشدیدکنندهٔ دی‌الکتریک شفاف شیشه‌ای عمل کننده به‌صورت یک پوشش برای سلول خورشیدی [۳۶].

۴- آنتن‌ها در کاربرد ماهواره‌ای

سلول‌های خورشیدی و سیستم‌های مخابراتی برای ماهواره‌های کوچک از اهمیت زیادی برخوردار هستند. ماهواره‌های کوچک (با جرم زیر ۵۰۰ کیلوگرم) به عنوان یکی از اصلی‌ترین ابزارها برای کاوش در فضا و ارایهٔ خدمات مختلف فضایی از جمله مخابرات ماهواره‌ای، سنجش از دور، ناوبری و غیره استفاده می‌شود و تمرکز بر تولید و ارسال آنها به فضا روند رو به رشدی دارد. دلیل این رشد مقرون به صرفه بودن این ماهواره‌ها است و می‌توان آن‌ها را با روش‌های اقتصادی‌تر به مدار پرتاب کرد. به دلیل این مزایا که ماهواره‌های بزرگ و سنگین متداول از آنها بهره‌مند نیستند، ماهواره‌های کوچک به‌طور روزافزونی در بسیاری از مأموریت‌های فضایی مانند ارتباطات از راه دور، مشاهدات زمین و طیف گسترده‌ای از تحقیقات علمی به کار گرفته می‌شود. این مزایا باعث شده است که استفاده از ماهواره‌های بسیار کوچک حتی با وزن‌های کمتر از چند کیلوگرم به صورت جدی مورد توجه قرار گیرند. در نتیجه، کوچک‌سازی و کم‌وزن کردن کلیهٔ ادوات ماهواره‌ها موضوع پژوهش در زمینه‌های مختلف مرتبط با طراحی ماهواره‌ها است. از سوی دیگر، کوچک‌سازی اندازهٔ ماهواره‌ها سطح سلول‌های خورشیدی و به عبارتی سطح در معرض تابش‌های خورشیدی را بسیار محدود می‌کند و محدودیت‌هایی را بر میزان انرژی تولید شده توسط سلول‌های خورشیدی اعمال می‌کند. به همین صورت، این کوچک‌سازی اثر نامطلوبی بر بهرهٔ آنتن‌های نصب شده بر روی ماهواره‌ها دارد. در نتیجه، طراحی سیستم آنتن و سلول خورشیدی برای ماهواره‌های کوچک، به ویژه برای ماهواره‌های مکعبی[۲۲]، یکی از بزرگترین چالش‌های این حوزه است [۳۹]. برای استفادهٔ آنتن‌های غیرشفاف در ماهواره‌های کوچک، یک رویکرد استفاده از آنتن میکرواستریپ کوچک است

22. CubeSats

که باعث می‌شود آنتن در هنگام قرار گرفتن در بالای پانل خورشیدی مانع کمتری برای عبور انرژی خورشیدی ایجاد کند [۴۰]. همچنین، آنتن را می‌توان در یکی از وجه‌های کوچک از ماهواره‌های مکعبی قرار داد، یعنی جایی که قرار دادن پانل‌های خورشیدی کمتر مطلوب است. اما به‌طور معمول این راهکارها مؤثر نیستند زیرا این نوع آنتن‌ها در ماهواره‌های کوچک برای تصاحب سطح بیشتر با سلول‌های خورشیدی رقابت می‌کنند. بنابراین در پاسخ به این نیاز، مجتمع‌سازی آنتن‌ها و سلول‌های خورشیدی به صورت جدی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، دو نوع طرح مورد بررسی قرار گرفته است:

۱) آنتن‌های غیرشفاف که در زیر پنل‌های خورشیدی قرار دارند [۴۱] و

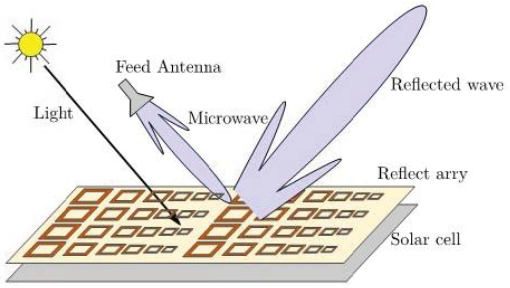
۲) آنتن‌های شفافی که در بالای پنل‌های خورشیدی قرار می‌گیرند و با وجود عملکرد آنتنی مناسب مانع رسیدن نور به سلول خورشیدی نمی‌شوند [۴۲، ۳۹].

مشکل روش اول تأثیرات نامطلوب سلول خورشیدی بر پارامترهای آنتن، تلفات مربوط به سلول خورشیدی و پیچیدگی بسیار زیاد طراحی آنتن با در نظر گرفتن اثرات سلول خورشیدی است. به عبارتی، چالش این روش اطمینان حاصل کردن از عدم تأثیر جدی صفحهٔ خورشیدی بالای آنتن بر عملکرد تابشی آنتن است. برای این امر باید مطمئن شویم که لبه‌های تابشی آنتن توسط پنل خورشیدی پوشانده نشده‌اند [۴۰].

با توجه به مشکلات استفاده از آنتن‌های غیرشفاف، استفاده از آنتن‌های شفاف می‌تواند راه‌حل مناسبی برای مجتمع‌سازی آنتن و سلول خورشیدی باشد. همان‌طور که قبلاً بیان شد، ساخت آنتن‌های شفاف با دو روش اصلی امکان‌پذیر است: ۱) استفاده از فیلم رسانای شفاف (فیلم نازک) و ۲) استفاده از طراحی آنتن مشبک.

دستهٔ اول یعنی آنتن‌های شفاف فیلم نازک، به‌ویژه آنتن‌های فیلم نازک TCO را می‌توان به‌طور مستقیم در بالای سلول‌های خورشیدی قرار داد. TCOها دارای شفافیت نوری بین ۸۰ تا ۹۰ درصد و در عین حال دارای هدایت الکتریکی قابل قبولی هستند. با این حال، در ضخامت‌های بسیار نازک کارآیی آنتن‌های پچ فیلم نازک به دلیل اثرات پوستی و اثرات زمین آنتن به شدت کاهش می‌یابد [۴۰]. برای مجتمع‌سازی آنتن با سلول‌های خورشیدی ما به آنتن‌هایی با شفافیت بالا ۹۰ درصد نیاز داریم. درحالی‌که اکثر آنتن‌های TCO شفافیتشان زیر ۹۰ درصد است. برای برطرف کردن این مشکل از آنتن‌های رسانای شفاف مانند AgHT-8 و اکسیدهای رسانای شفاف استفاده می‌شود. در این میان، فیلم‌های اکسید قلع ایندیوم (ITO) به دلیل داشتن تعادل مناسب بین شفافیت نوری و هدایت الکتریکی مورد توجه هستند. رسانایی الکتریکی و شفافیت نوری یک فیلم ITO به خواص مواد تشکیل‌دهنده آن بستگی دارد که بیشتر در فرآیند دوپینگ و رسوب‌گذاری مشخص می‌شود [۴۰].

دستهٔ دوم آنتن‌های شفاف آنتن‌هایی هستند که با استفاده از رساناهای مشبک محقق شده‌اند (شکل **۱۰**). به عنوان مثال، یک آنتن پچ شفاف مشبک که در واقع ساختار مشبکی از سیم‌های رسانا بر روی بستری شفاف است می‌تواند به‌طور مستقیم در بالای سلول‌های خورشیدی قرار گیرد و به حل مسئلهٔ محدودیت فضا در ماهواره‌های کوچک کمک کند. برای چنین ادغامی، شفافیت نوری حداقل ۹۰ درصد آنتن پچ برای سلول‌های خورشیدی ضروری است. از طرف دیگر، آنتن باید الزام حداقل خواص تابشی قابل قبول را به صورت هم زمان برآورده کند [۴۰]. با استفاده از ساختار مشبک در ساخت قسمت تشعشع‌کنندهٔ آنتن و صفحهٔ زمین شفاف می‌توان به‌طور خاص به راندمانی بالا و شفافیت بیش از ۹۰ درصد رسید و شفافیت مورد نیاز را تأمین کرد [۴۱].



شکل (۱۰): طرحی از مجتمع سازی آنتن‌های شفاف و سلول‌های خورشید.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به مرور پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه فناوری و کاربرد آنتن‌های شفاف پرداخته شد. به این مطلب اشاره شد که با توجه به مشکلات استفاده از آنتن‌های متداول فلزی در برخی کاربردها از جمله در خودروها به دلیل غیر آیرودینامیک بودن یا به عنوان گیرنده‌های تلوزیونی در ساختمان‌ها به دلیل زشت نمودن چهره ساختمان‌ها و شهرها، پژوهش بر روی آنتن‌های شفاف آغاز شد. نیاز به آنتن‌های شفاف با توسعهٔ ماهواره‌ها به خصوص ماهواره‌های کوچک احساس شد و پژوهش در این حوزه به‌طور جدی‌تری دنبال شد. دسته‌بندی آنتن‌های شفاف به دودسته کلی آنتن‌های شفاف فلزی و آنتن‌های شفاف دی‌الکتریک بیان شد و مزایا و معایب

هر کدام از نظر ساخت، میزان شفافیت و مشخصات آنتن به خصوص راندمان آنتن بررسی شد. با توجه به کاربری ویژه این آنتن‌ها در ماهواره‌های کوچک مسئلهٔ مجتمع سازی این آنتن‌ها با سلول‌های خورشیدی نصب شده بر روی ماهواره‌ها با جزییات بیشتری ارائه شد.

به‌طور خلاصه نتیجه‌گیری شد که اگرچه آنتن‌های مشبک می‌توانند به گونه‌ای طراحی شوند که ضمن حفظ بازده خوب، از شفافیت بالایی برخوردار باشند، اما ساخت این آنتن‌ها در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰ گیگاهرتز کمی مشکل است. بنابراین، آنتن مشبک یک راه‌حل مؤثر برای فرکانس‌های زیر ده گیگاهرتز است و در مقابل، فیلم‌های ITO برای فرکانس‌های بالاتر از باندهای Ku دارای مزایای بیشتری هستند. عموماً با توجه به نیاز به کوچک‌سازی در ماهواره‌ها، آنتن‌های DRA شفاف نیز در فرکانس‌های بالا ترجیح داده می‌شوند.

۶- مراجع

[1] Lim, E.H., Leung K.W., Fang X, and Pan, Y., *Transparent Antennas*, John Wiley & Sons, New York, 2015.

[2] Kanso, A., Arnaud, E., Chreim, H., Monédière, T., Thévenot, M., Beaudrouet, E., Dossou-Yovo, C., and Noguera, R., "Design and Fabrication of EBG and CWP Antennas, Using Inkjet Printing Technology", *Microw. Opt. Tech. Lett.*, Vol. 55, No. 7, pp. 1520–1526, 2013.

[3] Arellano, J.A. "Inkjet-Printed Highly Transparent Solar Cell Antennas", *M.Sc. Thesis*, Department of Electrical and Computer Engineering, Utah State University, Utah, USA, 2011.

[4] Riddle, B., Baker-Jarvis, J., and Krupka, J., "Complex Permittivity Measurements of Common Plastics over Variable Temperatures", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 51, No. 3, pp. 727–733, 2003.

[5] Adams, J.J., Duoss E.B., Malkowski, T.F., Motala, M.J., Ahn, B.Y., Nuzzo, R.G., Bernhard, J.T., and Lewis, J.A., "Conformal Printing of Electrically Small Antennas on Three-dimensional Surfaces", *Adv. Mater.*, Vol. 23, No. 11, pp. 1335–1340, 2011.

[6] Mias, C., Tsakonas, C., Prountzos, N., Koutsogeorgis, D.C., Liew, S.C., Oswald, C., Ranson, R., Cranton, W.M., and Thomas, C.B., "Optically Transparent Microstrip Antennas", *IEE Colloquium on Antennas for Automotives*, pp. 8/1–8/6, 2000.

[7] Lee, S., Choo, M., Jung, S., and Hong, W., "Optically Transparent Nano-Patterned Antennas: A Review and Future Directions", *Appl. Sci.*, Vol. 8, No. 6, pp. 901, 2018.

[8] Song, H.J., Hsu, T.Y., Sievenpiper, D.F., Hsu, H.P., Schaffner, J., and Yasan, E., "A Method for Improving the Efficiency of Transparent Film Antennas", *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, Vol. 7, pp. 753–756, 2008.

[9] Roo-Ons, M.J., Shynu, S.V., Ammann, M.J., McCormack, S.J., and Norton, B., "Transparent Patch Antenna on a-Si thin-film Glass Solar Module", *Electron. Lett.*, Vol. 47, No. 2, pp. 85–86, 2011.

[10] Li, Q.L., Cheung, S.W., Wu, D., and Yuk, T.I., "Optically Transparent Dual-band MIMO Antenna, Using Micro-metal Mesh Conductive Film for WLAN System", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, Vol. 16, pp. 920–923, 2016.

[11] Peter, T., Nilavalan, R., AbuTarboush, H.F., and Cheung, S.W., "A Novel Technique and Soldering Method to Improve Performance of Transparent Polymer Antennas", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, Vol. 9, pp. 918–921, 2010.

[12] Peter, T., Yuk, T.I., Nilavalan, R., and Cheung, S.W., "A Novel Technique to Improve Gain in Transparent UWB Antennas", *2011 Loughborough Antennas & Propagation Conference*, Loughborough University, UK, 2011.

[13] Katsounaros, A., Hao, Y., Collings, N., and Crossland, W.A., "Optically Transparent Antenna for Ultra Wide-band Applications", *The 3rd European Conference on Antennas and Propagation*, Berlin, Germany, 2009.

[14] Sierros, K.A., Cairns, D.R., Hecht, D.S., Ladous, C., Lee, R., and Niu, C., "P-184: Highly Durable Transparent Carbon Nanotube Films for Flexible Displays and Touch-screens", *SID Symposium Digest of Technical Papers*, Vol. 41, No. 1, pp. 1942–1945, 2010.

[15] Moon, J.-S. and Gaskill, D.K., "Graphene: Its Fundamentals to Future Applications", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 59, No. 10, pp. 2702–2708, 2011.

[16] Lee, J., Lee, S., Li, G., Petruska, M.A., Paine, D.C., and Sun, S., "A Facile Solution-phase Approach to Transparent and Conducting ITO Nanocrystal Assemblies", *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 134, No. 32, pp. 13410–13414, 2012.

[17] Wu, Z., Chen, Z., Du, X., Logan, J.M., Sippel, J., Nikolou, M., Kamaras, K., Reynolds, J.R., Tanner, D.B., Hebard, A.F., and Rinzler, A.G. "Transparent, Conductive Carbon Nanotube Films", *Science*, Vol. 305, No. 5688, pp. 1273–1276, 2004.

[18] Suzuki, A., Matsushita, T., Aoki, T., Mori, A., and Okuda, M., "Highly Conducting Transparent Indium Tin Oxide Films Prepared by Pulsed Laser Deposition", *Thin Solid Films*, Vol. 411, No. 1, pp. 23–27, 2002.

[19] Tuna, O., Selamet, Y., Aygun, G., and Ozyuzer, L., "High Quality ITO Thin Films Grown by DC and RF Sputtering without Oxygen", *J. Phys. D. Appl. Phys.*, Vol. 43, No. 5, pp. 402-411, 2010.

[20] H. Agura, A. Suzuki, T. Matsushita, T. Aoki, and M. Okuda, "Low Resistivity Transparent Conducting Al-doped ZnO Films Prepared by Pulsed Laser Deposition", *Thin Solid Films*, Vol. 445, No. 2, pp. 263–267, 2003.

[21] Dong, B.-Z., Hu, H., Fang, G.-J., Zhao, X.-Z., Zheng, D.-Y., and Sun, Y.-P., "Comprehensive Investigation of Structural, Electrical, and Optical

[31] Cohn, S.B., "Microwave Bandpass Filters Containing High-Q Dielectric Resonators", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 16, No. 4, pp. 218–227, 1968.

[32] Kajfez, D. and Guillon, P., *Dielectric resonators*, Scitech Publishing, Mumbai, India, 1998.

[33] Pavio A.M. and Smith, M.A., "A 20-40-GHz Push-Push Dielectric Resonator Oscillator", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 33, No. 12, pp. 1346–1349, 1985.

[34] Luk, K.M., Leung, K.W., *Dielectric Resonator Antennas*, Research Studies Press, Baldock, England, 2003.

[35] Petosa, A., *Dielectric Resonator Antenna Handbook (Artech House Antennas and Propagation Library)*, Artech House, Massachusetts, USA, 2007.

[36] Leung, K.W., Lim, E.H., and Fang, X.S., "Dielectric Resonator Antennas: From the Basic to the Aesthetic", *Proc. IEEE*, Vol. 100, No. 7, pp. 2181–2193, 2012.

[37] Lim, E.H. and Leung, K.W., *Compact Multifunctional Antennas for Wireless Systems*, John Wiley & Sons, New York, USA, 2012.

[38] Lim, E.H. and Leung, K.W., "Transparent Dielectric Resonator Antennas for Optical Applications", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 58, No. 4, pp. 1054–1059, 2010.

[39] Yasin, T. and Baktur, R., "Circularly Polarized Meshed Patch Antenna for Small Satellite Application", *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, Vol. 12, pp. 1057–1060, 2013.

[40] Yasin, T., "Transparent Antennas for Solar Cell Integration", *Ph.D. Desertation*, Department of Electrical and Computer Engineering, Utah State University, Utah, USA, 2013.

[41] Liu, X., Jackson, D.R., Chen, J., Liu, J., Fink, P.W., Lin, G.Y. and Neveu, N., "Transparent and Non-transparent Microstrip Antennas on a CubeSat: Novel Low-profile Antennas for CubeSats Improve Mission Reliability", *IEEE Antennas Propag. Mag.*, Vol. 59, No. 2, pp. 59–68, 2017.

[42] Hautcoeur, J., Talbi, L., and Hettak, K., "Feasibility Study of Optically Transparent CPW-fed Monopole Antenna at 60-GHz ISM Bands", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 61, No. 4, pp. 1651–1657, 2012.

Properties for ZnO: Al Films Deposited at Different Substrate Temperature and Oxygen Ambient", *J. Appl. Phys.*, Vol. 103, No. 7, pp. 737-748, 2008.

[22] Park, S.-M., Ikegami, T., and Ebihara, K., "Effects of Substrate Temperature on the Properties of Ga-doped ZnO by Pulsed Laser Deposition", *Thin Solid Films*, Vol. 513, No. 1–2, pp. 90–94, 2006.

[23] Liu, H.Y., Avrutin, V., Izyumskaya, N., Reshchikov, M.A., Özgür, Ü., and Morkoç, H., "Highly Conductive and Optically Transparent GZO Films Grown under Metal-rich Conditions by Plasma Assisted MBE", *Phys. status solidi (RRL)–Rapid Res. Lett.*, Vol. 4, No's. 3-4, pp. 70–72, 2010.

[24] Tiburcio-Silver, A., Sanchez-Juarez, A., and Avila-Garcia, A., "Properties of Gallium-doped ZnO Deposited Onto Glass by Spray Pyrolysis", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 55, No's. 1–2, pp. 3–10, 1998.

[25] Chen, T., Chiang, C.-C., and Chen, T.-Y., "The Characteristic of GZO Thin Film Deposited on Flexible Substrates by Using RF Magnetron Sputtering", *The 21st International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (AM-FPD)*, Kyoto, Japan, 2014.

[26] Ray, S., "Optical and Dielectric Properties of ZnO Nanostructures at Terahertz Frequencies", *M.S. Thesis*, Graduate College, Oklahoma State University, USA, 2001.

[27] Liu, Y. and Lian, J., "Optical and Electrical Properties of Aluminum-doped ZnO Thin Films Grown by Pulsed Laser Deposition", *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 253, No. 7, pp. 3727–3730, 2007.

[28] Kim, J., Naik, G.V., Gavrilenko, A.V., Dondapati, K., Gavrilenko, V.I., Prokes, S. M., Glembocki, O.J., Shalaev, V.M., and Boltasseva, A., "Optical Properties of Gallium-Doped Zinc Oxide—A Low-Loss Plasmonic Material: First-Principles Theory and Experiment", *Phys. Rev. X*, Vol. 3, No. 4, pp. 41037-41048, 2013.

[29] Gordon, R.G., "Criteria for Choosing Transparent Conductors", *MRS Bull.*, Vol. 25, No. 8, pp. 52–57, 2000.

[30] Colombel, F., Castel, X., Himdi, M., Legeay, G., Vigneron, S., and Cruz, E.M., "Ultrathin Metal Layer, ITO Film and ITO/Cu/ITO Multilayer Towards Transparent Antenna", *IET Sci. Meas. Tech.*, Vol. 3, No. 3, pp. 229–234, 2009.