

Caracterización de la conductividad en alta frecuencia de materiales para fabricación aditiva

Vicente Nova⁽¹⁾, Carmen Bachiller⁽¹⁾, Álvaro Ferrer⁽¹⁾, Aleksandr Voronov⁽¹⁾, Luis N. Ponce-González⁽²⁾, Lluç Sempere⁽³⁾, Mirko Kunowsky⁽³⁾, Asunción Martínez-García⁽³⁾

vinogi@iteam.upv.es, mabacmar@dcom.upv.es, alfercla@iteam.upv.es, alvo2@ade.upv.es, lnpongo@itq.upv.es, llucsempere@aiju.es, mirkokunowsky@aiju.es, sunymartinez@aiju.es

⁽¹⁾Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia, Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia.

⁽²⁾Instituto de Tecnología Química, Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia.

⁽³⁾AIJU Technological Centre, 03440, Ibi.

Resumen—Este trabajo presenta la caracterización de la conductividad efectiva de los materiales de fabricación aditiva utilizados para la manufactura de dispositivos para comunicaciones de alta frecuencia. Tanto el tipo de material, la porosidad, la rugosidad, como la oxidación disminuyen el valor de dicha conductividad llevando a un incremento en las pérdidas de inserción de los dispositivos fabricados. Para la caracterización se ha diseñado un resonador de cavidad en banda X sobre guía de onda rectangular y se ha medido el factor de calidad de diferentes realizaciones con técnicas y materiales diversos. Se han obtenido valores de hasta 17.70 MS/m para materiales poliméricos metalizados y de hasta 5.32 MS/m para aleaciones metálicas.

Index Terms—Fabricación aditiva, resonador de cavidad, conductividad efectiva, metalización, aleación metálica.

I. INTRODUCCIÓN

La aplicación de la fabricación aditiva (AM) para desarrollar componentes de comunicaciones ofrece la rápida materialización de prototipos de dispositivos de alta frecuencia con una masa y un costo reducidos, particularmente para volúmenes de producción pequeños y medianos donde el mecanizado tradicional es costoso. Estudios anteriores sobre AM han investigado su uso para una amplia gama de dispositivos [1]–[4] y demuestran su viabilidad, también para comunicaciones por satélite, como se demuestra en el estudio de cualificación para espacio [5] donde pasaron pruebas de estrés térmico, mecánico y de manejo de potencia.

Sin embargo, la aparición de nuevas tecnologías de fabricación aditiva y de nuevos materiales hacen necesario estudiar un aspecto clave para el correcto funcionamiento de los dispositivos y eso es la conductividad efectiva del material con el que el dispositivo finalmente se fabrica. Hay que considerar que los dispositivos de alta frecuencia se pueden fabricar directamente sobre aleaciones de polvo metálico o sobre un polímero, que posteriormente debe ser metalizado. Además en el caso de material polimérico puede realizarse una fabricación mediante reticularización de una resina curándola con luz ultravioleta o por láser, o mediante sinterizado de un polvo de polímero termoplástico. En todos los casos, la conductividad efectiva que tiene la superficie de la pieza no se va a corresponder con la conductividad nominal del material metálico (cobre, aluminio o alguna aleación), dado que la porosidad, rugosidad y la oxidación impactan en el resultado. Los trabajos previos en medida de conductividad efectiva en impresión aditiva se han centrado en otras técnicas: en [6] se

analiza la conductividad efectiva cuando el polímero se pinta con diferentes capas de pintura de plata, en [7] además de esta pintura de plata se utiliza una segunda metalización galvánica y en [8] se analizan los resultados de la fabricación con polvo metálico siguiendo la técnica del binder jetting.

En este trabajo se ha realizado un estudio exhaustivo, tal como se muestra en la sección 2, de la conductividad efectiva de los materiales más habituales utilizados en fabricación aditiva. En el caso de que se fabrique sobre metal esta conductividad corresponde al material, en el caso en el que se fabrique sobre polímero metalizado, correspondería al revestimiento. Para ello se diseñó un resonador de cavidad en guía de onda rectangular, en banda X. Como se explica en la sección 3, midiendo la respuesta en frecuencia de este dispositivo y su factor de calidad se puede extraer la conductividad efectiva del material con el que se fabricó. El trabajo termina con la presentación de los resultados obtenidos y su discusión.

II. PROCESO DE FABRICACIÓN

A. Fabricación aditiva de los resonadores

Se fabricaron piezas tanto en polímero para su posterior metalizado como directamente en metal.

Para la fabricación en polímero se buscaron materiales y técnicas que proporcionasen una buena precisión y que no se deformasen tras la fabricación. Además, se añadió una estructura de refuerzo alveolar para distribuir las fuerzas de deformación de manera más uniforme [9].

Se seleccionó la tecnología de fabricación aditiva VPP (Vat Photopolymerization) con curado por exposición a rayo láser ultravioleta, VPP-UVL/P con resina acrílica. Como las resinas dopadas con partículas sólidas presentan una contracción significativamente menor que las no dopadas, se utilizaron dos de estas resinas: la Rigid 10k de Formlabs, una resina con un 55-75 % de sílice (SiO_2), y la Composite X de Liqcreate, de similares características. Las piezas se fabricaron con el equipo de VPP-ULV Form 2 de Formlabs, que fue elegido por su alta resolución (alrededor de 80 μm), alta precisión dimensional ($> 25 \mu m$) y buen acabado superficial.

También se imprimieron piezas en poliamida 11 y 12, materiales en polvo para la tecnología de fusión en lecho de polvo (PBF-L/P). Para ello se emplearon, respectivamente, los equipos STRATASYS SAF 350 y DTMA Sinterstation 2500, ambos con precisión dimensional de 50 μm . Se eligieron estos materiales por su ligereza y buenas prestaciones mecánicas.

La fabricación de las muestras metálicas se llevó a cabo a través de la fusión de lecho de polvo por láser (PBF-L/M). La máquina utilizada (SLM280HL de Nikon SLM Solutions AG) tiene un láser de fibra de iterbio de 1070 nm con una potencia máxima de 400 W. Las muestras se fabricaron en $AlSi_{10}Mg$, Nikon SLM Solutions AG, con una distancia entre líneas de escaneo de 170 μm y un espesor de capa de 50 μm .

En todos los casos las piezas se orientaron en la plataforma de impresión de modo que se minimizase su área máxima de capa y no se necesitasen soportes en superficies críticas, como en las cavidades y las superficies de contacto.

B. Proceso de metalizado

En el caso en que la pieza se haya fabricado con un polímero, una vez impreso y endurecido el dispositivo, se recubre con una capa homogénea de un material eléctricamente conductor. Esto se hace comúnmente mediante el uso de dos procesos de revestimiento sucesivos. El primero implica la deposición de una fina capa conductora, que se utiliza para aplicar una última galvanoplastia para cubrir defectos menores, espesando y estabilizando así el recubrimiento metálico ya depositado.

Con respecto al primer proceso de revestimiento, existen tres métodos comúnmente utilizados: deposición física de vapor (PVD), pinturas eléctricamente conductoras y revestimiento no electrolítico. Las pinturas conductoras son, con diferencia, el método más sencillo, ya que consiste en aplicar una pintura conductora sobre la pieza impresa. Esta técnica consigue una adherencia altísima, sin embargo, la capa de pintura tiende a ser no homogénea y tiene una conductividad eléctrica muy baja. Por el contrario, el PVD permite el recubrimiento de una amplia gama de materiales, obteniendo un recubrimiento altamente conductor y de alta adherencia. Si bien este método es muy conveniente para recubrir sustratos planos, proporciona un recubrimiento no homogéneo en geometrías de formas arbitrarias y requiere procesos [10], [11] de alto costo y consumo de energía. Por el contrario, el revestimiento no electrolítico puede revestir homogéneamente piezas de formas arbitrarias de una manera económica y sencilla, y proporciona una gran flexibilidad de producción en volumen.

En este trabajo, el primer recubrimiento se aplicó mediante metalizado no electrolítico de cobre o níquel. Este método utiliza una reacción química para unir partículas del metal deseado a la superficie de las piezas poliméricas sin el uso de una corriente eléctrica [12]. Para hacerlo, la superficie de la pieza debe estar preparada para permitir una fuerte unión con la deposición de metal. El método más común para ello implica un atacado químico con compuestos oxidantes fuertes como las sales de cromo. Sin embargo, este producto no se recomienda porque es altamente corrosivo y contaminante. En este trabajo se sustituyó el atacado con sales de cromo por la combinación de un primer granallado y un posterior atacado químico con solución de hidróxido sódico. Luego, se deposita una capa catalítica de paladio sobre las superficies de las piezas. Esta capa es la encargada de iniciar la reacción de reducción química en la que el metal, bien sea cobre o níquel, se adhiere a la superficie. Este proceso se optimizó para adaptarlo a los materiales utilizados: resina dopada y poliamida para PBF. Hasta donde sabemos, esta es la primera vez que se aplica con éxito a estos materiales.

El proceso de revestimiento inicial da como resultado una deposición metálica relativamente uniforme y estable, aunque puede dejar algunas áreas pequeñas descubiertas, particularmente en las esquinas. En la metalización con cobre se observa que la superficie es conductora, en el caso del níquel se observa que, aunque la capa es uniforme, su conductividad es muy baja. Se aplica un proceso de galvanoplastia adicional para solucionar los defectos menores en el cobre y aumentar la conductividad en el níquel, produciendo una capa de cobre más gruesa y uniforme. La galvanoplastia se realizó utilizando el sistema comercial MiniContact-RS de LPKF [13].

Se han tomado imágenes de microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (FESEM) para evaluar el espesor del revestimiento de cobre resultante de cada paso. Para ello, se realizó una zanja en las diferentes etapas de metalización. La Fig. 1 (a) muestra una capa de 0,5 a 1,7 μm de cobre tras el primer revestimiento, mientras que la capa final de cobre, ver Fig. 1 (b), es más gruesa, de 6,5 a 12 μm .

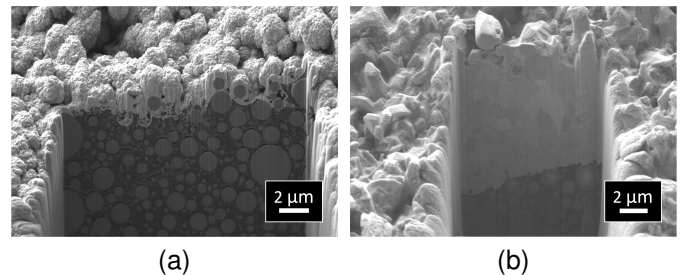


Fig. 1. Vista FESEM de una zanja realizada en el dispositivo polimérico metalizado con haz de iones enfocados de galio (Ga+ FIB). La capa de cobre (en blanco) está encima del material polimérico (en gris claro son partículas de SiO_2). (a) Después de la metalización no electrolítica. (b) Después de la metalización galvánica.

C. Consideraciones adicionales respecto a la fabricación

Existen varias etapas en los procesos de fabricación que pueden afectar al funcionamiento de los dispositivos:

- Tecnología de fabricación. Dependiendo de la tecnología y del tipo de material (si es polvo o resina) puede aparecer una mayor rugosidad. La rugosidad de la superficie de las piezas fabricadas puede aumentar la pérdida óhmica en dispositivos de alta frecuencia, llevando a unas mayores pérdidas de inserción de los dispositivos.
- Pulido. Las piezas fabricadas se sometieron a un tratamiento con chorro de arena de corindón, en el caso de las piezas metálicas para disminuir la rugosidad superficial de la pieza, en el caso de las piezas poliméricas para facilitar la adhesión de la capa metálica. Este tratamiento superficial puede suponer un cambio en las dimensiones de las piezas de decenas de micras.
- Revestimiento. El metalizado deposita una fina capa de cobre en la superficie del dispositivo. La microscopía muestra un rango de espesor de 6,5 a 12 μm .
- Oxidación. La capa de cobre depositada puede oxidarse con el tiempo, reduciendo su conductividad efectiva.

III. CARACTERIZACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD EFECTIVA

Para la caracterización de la conductividad efectiva (bien de la deposición de cobre, bien de la aleación de la impresión

metálica) se ha utilizado un resonador de cavidad rectangular en banda X impreso en 3D. Este enfoque permite definir una conductividad eléctrica efectiva que considera tanto la conductividad real del material metálico y el efecto de la rugosidad de la superficie.

El resonador propuesto se basa en una cavidad rectangular con $a = 19,05$ mm de ancho, $b = 9,53$ mm de altura y $l = 18,46$ mm de longitud, ver Fig. 2.(a), que opera a 11 GHz. La cavidad se excita mediante iris inductivos y se alimenta con guías de onda estándar WR75 y transiciones UBR120.

El resonador se fabricó en una configuración de dos piezas separadas longitudinalmente por el centro de la guía, ver Fig. 2.(b), minimizando las pérdidas de radiación causadas por los espacios de ensamblaje. Ambas partes del resonador fueron impresas con todos los materiales y técnicas de fabricación. Asimismo, se fabricó el resonador en una única pieza, Fig. 2.(c). Para conseguir implementar las cavidades huecas en las piezas sin necesidad de soportes interiores se aprovecharon las capacidades de las nuevas técnicas de fabricación aditiva y se utiliza una orientación adecuada de la pieza con respecto al plano de fabricación.

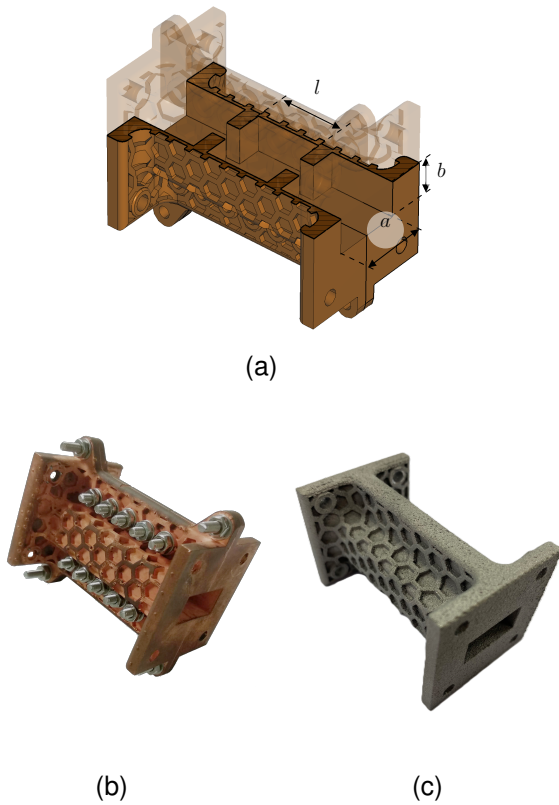


Fig. 2. Resonador de alta calidad utilizado para extraer la conductividad efectiva del revestimiento de cobre. (a) Diseño con las dimensiones más importantes. (b) Foto de resonador fabricado en dos piezas (resina Rigid10K en VPP-UVL, metalizado cobre autocatalítico+cobre galvanico). (c) Foto de resonador fabricado de una pieza (aleación $AlSi_{10}Mg$ PBF-L).

El factor de calidad cargado (Q_L) se extrajo del coeficiente de transmisión medido (S_{21}) usando la ecuación descrita en [14], $Q_L = \frac{f_0}{\Delta f_{-3dB}}$, donde f_0 es la frecuencia de resonancia y Δf_{-3dB} es el ancho de banda a 3 dB. El factor de calidad externo (Q_{ext}) y descargado (Q_u) se calculó con las conocidas expresiones (1) y (2), respectivamente.

$$Q_{ext} = \frac{Q_L}{S_{21Max}} \quad (1)$$

$$\frac{1}{Q_u} = \frac{1}{Q_L} - \frac{1}{Q_{ext}} \quad (2)$$

Posteriormente, se utilizó el Q_u para calcular la conductividad eléctrica efectiva, utilizando la expresión del factor de calidad de un resonador de cavidad TE_{101} aislado, y la ecuación para la conductividad de un buen conductor, como se aprecia en las expresiones (3) y (4):

$$R_s = \frac{(kal)^3 b \eta}{Q_u 2\pi^2} \times \frac{1}{2a^3b + 2bl^3 + a^3l + al^3} \quad (3)$$

$$\sigma_{eff} = \frac{2\pi f \mu_0}{2R_s^2} \quad (4)$$

donde R_s es la resistencia superficial, k el número de onda, σ_{eff} la conductividad efectiva y a , b y l el ancho, alto y largo de la cavidad, respectivamente. Dado que las dimensiones impactan en la respuesta del dispositivo, se hizo un control dimensional de los mismos y se utilizaron en las expresiones.

IV. RESULTADOS

En la tabla I se presentan las características físicas de cada realización del resonador. En la columna '1P' se especifica el tipo de resonador: si está fabricado en dos piezas aparece como 'No', si está fabricado en una única pieza como 'Sí'. Las dos siguientes columnas hacen referencia al material base de fabricación y tipo de metalizado, cuando el material es un metal, se atiende a si su superficie está arenada o no. La columna 'Tec.' define el tipo de tecnología de fabricación aditiva empleada. En las tres últimas columnas se detallan las dimensiones de los resonadores fabricados, donde a , b y l son las medidas en mm. En la tabla II se tienen las respuestas eléctricas de los resonadores, donde la frecuencia de resonancia f_0 está medida en GHz y la conductividad efectiva σ_{eff} calculada en MS/m .

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DE LOS RESONADORES WR75.

N.	1P	Material	Metaliz.	Tec.	a	b	l
1	No	Rigid 10K	Cu+Cu	VPP	19.03	9.43	18.40
2	No	Composite X	Cu+Cu	VPP	19.00	9.34	18.27
3	No	Poliamida 12	Cu+Cu	PBF	19.09	8.93	18.50
4	No	Poliamida 11	Cu+Cu	PBF	19.27	9.38	18.65
5	No	Rigid 10K	Ni+Cu	VPP	19.00	9.41	18.35
6	Sí	Rigid 10K	Cu+Cu	VPP	19.32	9.36	18.46
7	No	AlSiMg	arenado	PBF	19.06	9.44	18.18
8	Sí	AlSiMg	no aren.	PBF	19.01	9.22	18.49
9	Sí	AlSiMg	arenado	PBF	19.04	9.02	18.48

Para los resonadores fabricados en polímero metalizado se observa que el material de base, el tipo de metalizado y la forma en que se fabricó tienen un impacto en la conductividad, dado que factores como la porosidad, la rugosidad, la adhesión del metal y la oxidación influyen.

El mejor resultado se ha obtenido para piezas fabricadas en dos cuerpos de resina Rigid 10K metalizada con una doble capa de cobre autocatalítico y cobre galvanico (resonador 1). Se obtiene una conductividad efectiva promedio de 17,7 MS/m , que es de 4 a 8 veces mayor que la reportada en

TABLA II
FRECUENCIA CENTRAL, FACTOR DE CALIDAD DESCARGADO Y
CONDUCTIVIDAD EFECTIVA DE LOS RESONADORES WR75.

N.	f_0	Q_u	σ_{eff}
1	11.049	3880	17.70
2	11.084	3413.37	13.96
3	11.084	2253.35	6.14
4	10.933	2640.15	7.97
5	10.956	1818.33	3.93
6	11.032	183.14	0.038
7	10.939	1667.14	3.46
8	10.944	425.88	0.22
9	10.986	2087.45	5.32

otros estudios que emplean métodos de metalizado similares [6], [7]. Además, es 20 veces mayor que la conductividad efectiva obtenida al inyectar con aglutinante piezas impresas infiltradas con cobre [8]. Por otra parte cuando se utiliza como base el Composite X (resonador 2), la conductividad es muy parecida, ya que son materiales similares.

Si se utiliza como polímero base la poliamida, bien sea 11 o 12, con una tecnología de fusión en lecho de polvo (resonadores 3 y 4) la conductividad efectiva baja. Esto ocurre por dos motivos: por una parte, la tecnología de fabricación proporciona piezas más porosas y rugosas y, por otra, la poliamida es un material hidrófilo con lo que aumenta la oxidación del metal depositado sobre él, ambos factores impactan negativamente en la conductividad efectiva.

Asimismo, se observa que el uso de un doble metalizado de níquel autocatalítico y cobre (resonador 5), aún con la resina Rigid 10K, proporciona una conductividad efectiva menor, aunque razonable.

Finalmente, cuando se probó a fabricar piezas poliméricas de una sola pieza y metalizarlas (resonador 6), los resultados no fueron buenos. Aunque se utilizó el mismo material, tecnología de fabricación y tipo de metalizado que proporcionaba los resultados óptimos, el hecho de no tener un buen acceso a todas las superficies que se querían metalizar hacía imposible una cobertura uniforme de la cavidad resonante, como se pudo observar al seccionar el resonador para inspección visual.

Para los resonadores fabricados en metal, es importante hacer notar que el factor que realmente impacta en la conductividad es la aleación utilizada (en este caso una aleación de Al, Si y Mg) y si está pulido o no. Como puede observarse, los resonadores 7 y 9 presentan conductividades similares a pesar de haberse fabricado uno de ellos en dos piezas y el otro de una única pieza. El resonador 8 que presenta una conductividad efectiva menor es el que no se ha pulido, teniendo una rugosidad notable.

V. CONCLUSIONES

Como conclusión, es importante saber que, para maximizar la conductividad efectiva de una pieza fabricada aditivamente, se deben considerar factores como el material metálico empleado, la oxidación y la rugosidad de la superficie, dado que todos ellos impactan en la pérdida óhmica. Para la impresión directamente sobre metal, la aleación utilizada es un factor limitante y aún se están desarrollando nuevos materiales con diferentes características para esta tecnología. Hay que tener en cuenta que cuando se decide metalizar un polímero el acceso a todas sus caras va a ser determinante para poder

obtener un buen resultado. Por otra parte, el efecto de la rugosidad en las pérdidas óhmicas no se puede compensar fácilmente, dependerá del tipo de tecnología empleada para la fabricación y de si se puede utilizar o no un método de pulido posterior. Sin embargo, la degradación debida a la oxidación se puede reducir pasivando el recubrimiento de cobre con tratamientos comerciales anticorrosión, lo que deja margen de mejora.

En conjunto, los resultados de este trabajo demuestran que se pueden obtener dispositivos con altas conductividades efectivas mediante fabricación aditiva, lo que abre el campo para el desarrollo de dispositivos de alta frecuencia con buen rendimiento, ofreciendo las ventajas de materiales livianos y de bajo costo, creación rápida de prototipos y fácil integración.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de investigación INNEST/2022/124 de la Agencia Valenciana de la Innovación.

REFERENCIAS

- [1] R. Dahle, P. Laforge, and J. Kuhling, "3-D printed customizable inserts for waveguide filter design at X-band," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 27, no. 12, pp. 1080–1082, Dec. 2017.
- [2] M. D' Auria, W. J. Otter, J. Hazell, B. T. W. Gillatt, C. Long-Collins, N. M. Ridler, and S. Lucyszyn, "3-D printed metal-pipe rectangular waveguides," *IEEE Trans. Compon., Packag. Manuf. Technol.*, vol. 5, no. 9, pp. 1339–1349, Sep. 2015.
- [3] J. Rao, K. Nai, P. Vaitukaitis, Y. Li, and J. Hong, "3-D metal printed compact high-q folded waveguide filter with folded antenna," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 70, no. 1, pp. 112–121, 2022.
- [4] Y. Chen, G. Zhang, J. Hong, Z. Sun, J. Yang, W. Tang, and C. Feng, "3-D printed dual-band filter based on spherical dual-mode cavity," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 31, no. 9, pp. 1047–1050, 2021.
- [5] C. Bachiller, V. Nova, Ferrer, and V. E. B. Esbert, "Space qualification of metalized additive manufactured filters," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 96952–96966, 2022.
- [6] S. Johann, F. William, P. Aurélien, T. Olivier, D. Nicolas, S. Bila, V. Serge, P. Jean-Baptiste, and R.-P. Gramond, "Plastic and metal additive manufacturing technologies for hyperfrequency passive components up to ka band," in *2016 46th Eur. Microw. Conf. (EuMC)*, 2016, pp. 373–376.
- [7] M. Dionigi, C. Tomassoni, G. Venanzoni, and R. Sorrentino, "Simple high-performance metal-plating procedure for stereolithographically 3-D-printed waveguide components," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 27, no. 11, pp. 953–955, 2017.
- [8] E. A. Rojas-Nastrucci, J. T. Nussbaum, N. B. Crane, and T. M. Weller, "Ka-band characterization of binder jetting for 3-D printing of metallic rectangular waveguide circuits and antennas," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 65, no. 9, pp. 3099–3108, 2017.
- [9] Q. Zhang, S. Weng, C. M. Hamel, S. M. Montgomery, J. Wu, X. Kuang, K. Zhou, and H. J. Qi, "Design for the reduction of volume shrinkage-induced distortion in digital light processing 3D printing," *Extreme Mech. Lett.*, vol. 48, p. 101403, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235243162100136X>
- [10] M. G. Eberhardt, A. M. Hodge, and P. S. Branicio, "Atomistic modeling of physical vapor deposition on complex topology substrates," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 203, p. 111111, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927025621007795>
- [11] H. A. Jehn, "PVD and ECD-competition, alternative or combination?" *Surf. Coatings Technol.*, vol. 112, no. 1, pp. 210–216, 1999. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897298007506>
- [12] K. Moraczewski, R. Malinowski, P. Rytlewski, and M. Zenkiewicz, "Autocatalytic metallization of polylactide," *Polimery*, vol. 60, no. 07/08, pp. 492–500, Jul. 2015.
- [13] LPKF. [Online]. Available: <https://www.lpkf.com/en/industries-technologies/research-in-house-pcb-prototyping/pcb-prototyping-process-steps/through-hole-plating-solutions>
- [14] R. J. Cameron, C. M. Kudsia, and R. R. Mansour, *Microwave Filters For Communication Systems : Fundamentals, Design and Applications*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018.