

# 3D プリンタで作製可能なテラヘルツ帯直線-円偏波変換素子の実験と評価

## Experiments and Evaluations for Linear-Circular Polarization Converter Fabricated by 3D Printer in Terahertz Band

○廣川昌之介(産技高専・専) 浅川澄人(産技高専) 下川床聖(都立大・院) 須原理彦(都立大)

Shonosuke HIROKAWA, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 1-10-40 Higashi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo 140-0011

Kiyoto ASAKAWA, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 1-10-40 Higashi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo 140-0011

Hijiri SIMOKAWADOKO, Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minami-ohsawa, Hachioji-shi, Tokyo 192-0397

Michihiko SUHARA, Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minami-ohsawa, Hachioji-shi, Tokyo 192-0397

### 1. はじめに

近年、無線通信においてより高速・大容量な Beyond5G や 6G などと呼ばれている次世代無線通信システムが期待されている。そこでは超高速・大容量化が求められており、その方策として現在商用利用されていない 300 GHz 以上の周波数であるテラヘルツ帯を利用することが期待されている。テラヘルツ帯を無線通信に利用するためにはテラヘルツ波を搬送波として送信・受信が可能なデバイスが必要になってくる。特に一般のエンドユーザにまで利用させるためには、移動端末に搭載するために小型のテラヘルツ送受信デバイスが求められる。しかし現状の小型テラヘルツデバイスでは直線偏波アンテナがよく採用されている。しかし、移動端末同志での通信では送受信デバイスの相対角度が一定ではないため、直線偏波アンテナでは偏波効率の低減が無視できない。そしてこれは通信速度や通信距離の低減につながり、実用化するにあたって課題となってしまう。そのため近年ではテラヘルツ帯の円偏波変換素子が研究されている[1]。ここではテラヘルツ帯ガウスビームを光渦に変換する光学素子を光造形 3D プリンタで作製されている。そこで本研究では、光造形 3D プリンタで作製可能なテラヘルツ帯直線-円偏波変換素子 (LCPC) を提案し、電磁界シミュレータによる理論解析と、その結果から得られた形状で実際に作製・測定することで、LCPC の実現可能性を明らかにすることを目的とする。

### 2. 電磁界シミュレータによる解析と結果

Fig.1 に有限要素法電磁界シミュレータ COMSOL で作成した解析モデルを示す。Fig.1(a)は解析モデルの全体像を示している。Fig.1(b)は本研究で提案する LCPC の x-y 平面での形状を示している。解析空間は球状で半径 5 mm としている。解析空間外側の境界条件としては、全方向の電界を反射させないために完全吸収層(PML)を厚さ 0.5 mm で設定した。Fig.1(a)に示すように解析空間の上部に半径 1 mm の励振面を配置した。この励振面から 243 GHz の直線偏波を Fig.1(a), (b)のように LCPC に対して電界ベクトルが角度  $\theta = 45^\circ$  となるような方向で発生させた。Fig.1(b)の青い部分が光造形 3D プリンタの材料であるレジンの存在する部分であり、その隣の白い部分は空気である。LCPC はこのようなスリット形状となっており、厚み  $h$  は Fig.1(a)に示すように  $h = 2.5$  mm, スリット幅  $w$  は Fig.1(b)に示すように  $w = 600$   $\mu\text{m}$  に設定した。Fig.1(b)の青色のレジンの材料定数は 300GHz 帯の比誘電率  $\epsilon_r = 2.72$ , 誘電正接  $\tan \delta = 0.0258$  を文献[2]から暫定的に決定した。

Fig.2 に解析結果として電磁波の電界ベクトルを示す。Fig.2(a)(b)の赤い矢印は励振面中心から解析空間下部へ向かう軸上の電界ベクトルを示している。Fig.2(a)では、上部

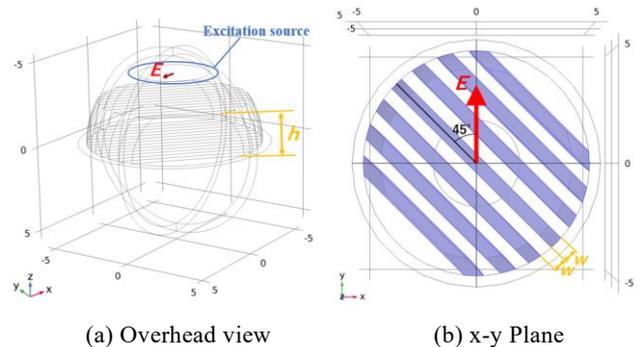


Fig.1 Analysis Model of Linear-Circular Polarization Converter (LCPC) for EM Simulator

にある励振面から照射された直線偏波が LCPC を通過することで円偏波に変換されている結果が得られた。また Fig.2(b)では、LCPC を通過後の電界ベクトルを示しており、入射波の電界方向を長軸とする楕円偏波となる結果が得られた。これは、入射波に対して  $45^\circ$  傾けるように LCPC を配置することで、LCPC に入射した電磁波の電界に対して直交する方向の電界成分が生じ、LCPC を適切な厚みにすることで入射電界と LCPC で生じた直交成分の電界との間に適度な位相差が生じたことで、円偏波に変換されたと考えている。

### 3. 直線-円偏波変換素子の作製と測定

Fig.3 に 3D プリンタで作製するための LCPC の 3DCADmodel を示す。LCPC のサイズは  $h = 2.5$  mm,  $w = 600$   $\mu\text{m}$  と電磁界シミュレータで解析した構造を採用し、全体サイズとして  $D = 40$  mm とした。光造形 3D プリンタは sonic mini 4k SK Edition を使用した。XY 解像度が 35  $\mu\text{m}$ , Z 解像度が 10  $\mu\text{m}$  となっている。光造形 3D プリンタ材料

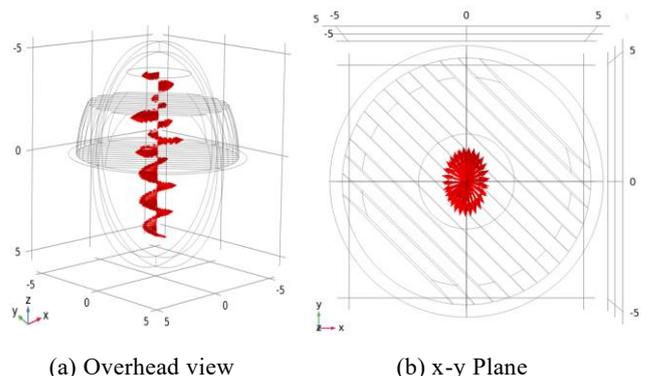


Fig.2 Analysis Results

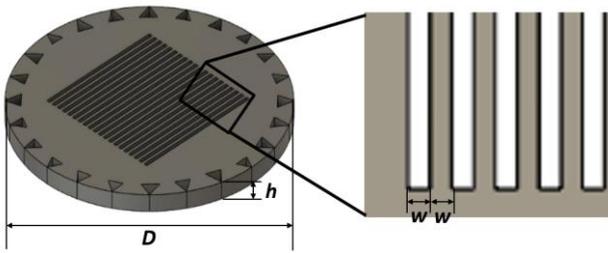


Fig.3 3D CAD Model of LCPC

のレジンはイソプロピルアルコールによる洗浄が不要な水洗いレジン（黒色）を使用した。実際の測定環境での LCPC の固定方法を考慮し、LCPC の角度を変えた測定を行うことも想定し、円形形状で15°刻みの印を入れた構造に設計した。

Fig.4 に周波数特性測定系を示す。信号発生器から周波数 12.2~18.3 GHz, 出力電力 0 dBm の信号を周波数通倍器で周波数を 18 通倍して 220~330 GHz にしたものをダイアゴナルホーンアンテナから直線偏波の電磁波を受信デバイスに照射する。通倍器には直流 9 V 電源とアッテネータ電源を接続し、アッテネータ電源電圧は 5 V に設定した。ダイアゴナルホーンアンテナと受信デバイスの距離は 3 cm 離している。受信デバイスには、p-GaAsSb/n-InGaAs バックワードダイオードと自己補対ボウタイアンテナを一体集積した 300GHz 帯ゼロバイアスレクテナ[3]を用いた。ゼロバイアスレクテナには入力インピーダンスが 10 MΩ のデジタルマルチメータ (DMM) で検波電圧を測定している。作製した LCPC はダイアゴナルホーンアンテナと受信デバイスの間に配置した。測定する周波数範囲は 220~280 GHz となるように設定し、1 GHz 刻みで測定した。また送信アンテナの偏波方向を基準にすると、LCPC は 45° 傾け、受信デバイスは Fig.4 のようにアンテナアームの軸からの角度を  $\theta_d$  とし、 $\theta_d = 0^\circ \sim 165^\circ$  まで 15° 刻みで変化させた。

Fig.5 に測定した LCPC の周波数特性を示す。横軸は周波数、縦軸は DMM で測定した電圧を示している。また図中の凡例は受信デバイスを回転させた角度  $\theta_d$  を示している。結果として 243 GHz で電圧ピークが出ていることが分かる。このピークは受信デバイスとして用いたゼロバイアスレクテナの特性が反映されている。また 243 GHz の時には受信デバイス角度  $\theta_d = 60^\circ$  の時に約 11 mV と最大電圧が測定されている。

次に偏角を受信デバイス角度  $\theta_d$ 、動径を受信デバイスが検波した電圧として極座標プロットした結果を Fig.6 に示す。図中の黒丸が測定点であり、曲線は楕円関数の近似曲線である。また、180°~345°の測定結果は、ボウタイアンテナが対称構造であることから 0°~165°の測定結果を再プロ

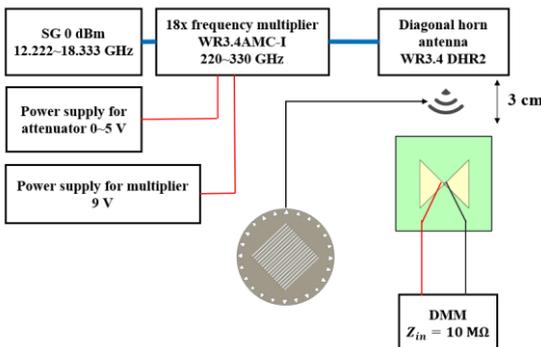


Fig.4 Measurements System of Frequency Characteristics

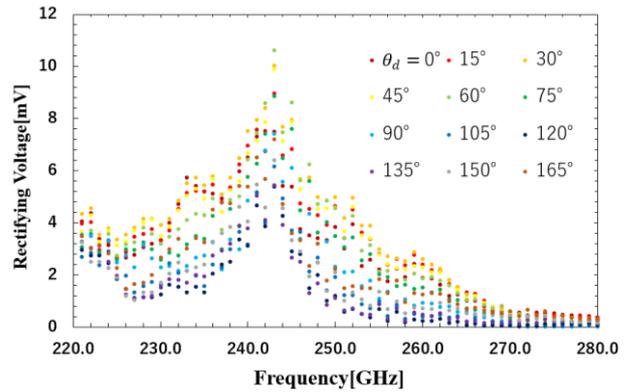


Fig.5 Frequency Characteristics from 220 to 280 GHz for Linear-Circular Polarization Converter

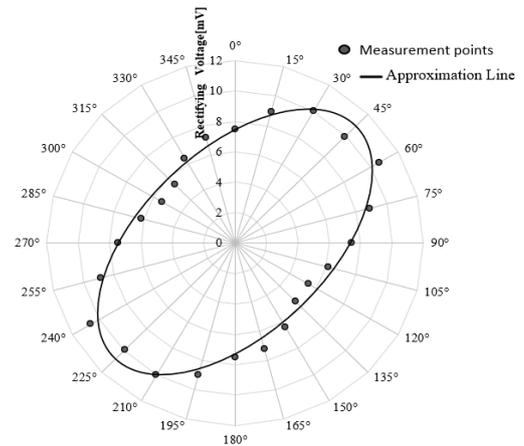


Fig.6 Polar plot for Rectifying Voltage and Rectenna Angle

ットしている。結果より、LCPC 通過後の電磁波は約 45° を長軸方向とする楕円偏波になっていることが分かる。これより、本研究で提案した LCPC は直線偏波を楕円偏波へ変換できることが明らかになった。しかし、シミュレーション結果と比較すると、シミュレーションでは LCPC への入射波の電界方向を長軸方向とする楕円偏波となっていたのに対して、測定結果はそこから約 45° 傾いた楕円偏波となった。これはシミュレーションで使用しているレジンの比誘電率と誘電正接を文献[2]から引用しており、実際に使用したレジンの材料定数とは違うことが偏波の形に影響していると考えている。

#### 4. まとめ

本研究ではテラヘルツ帯直線-円偏波変換素子の実現を目指して、電磁界シミュレータによる理論解析と、実際に作製・測定した。その結果、シミュレーションとは長軸方向が異なるものの、提案デバイスによって直線偏波を楕円偏波に変換できることが明らかになった。今後はこれを円偏波にするためにレジンの比誘電率、誘電正接の検討などを行っていく。

#### 参考文献

- [1] C. Liu, J. Liu, L. Niu, X. Wei, K. Wang, Z. Yang, Scientific reports vol.7, No.1, p.3891, 20 Jun. 2017.
- [2] N. Duangrit, B. Hong, A.D. Burnett, P. Akkaraekthalin, I.D. Robertson, N. Somjit, IEEE Access, vol.7, pp.12339-12347, 2019.
- [3] K. Usui, M. Suhara, 2022 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices, B2-4, Hybrid(virtual/Busan), July 2022.