偶奇選択的結合モード発振に基づくサブテラヘルツビームスイッチング

代表研究者 門内 靖明 東京大学 先端科学技術研究センター 准教授

1 概要

100 GHz 程度のサブテラヘルツ波に対して、結合発振状態を電圧制御することで出力をスイッチングし、 それを応用して偏波状態を制御する技術を提案・実証した。具体的には、マジックティを介して2つのガン ダイオード発振器を結合発振させ、バイアス電圧によってそれぞれの自励周波数を調整することで発振器間 の位相差を変化させる。マジックティの2つの出力ポートからは、2つの入力ポートに与えられる信号の和 と差が出力されるため、結合発振している2つの発振器間の位相差を調整することで出力ポート間のパワー 比を任意に制御することができるようになる。そこに直交する2つのホーンアンテナを接続すれば、任意の 偏波比を得ることができる。以上の動作を実験的に確認した。提案手法により、サブテラヘルツ波のスイッ チングや偏波制御を機械的な駆動を伴うことなく電気的に行えるようになるため、今後の通信や計測におい て重要な役割を果たすと考えられる。さらなるコンパクト化や高周波化に向けて、マイクロストリップライ ンを用いたハイブリッドカプラ等を用いることも可能と考えられる。

2 はじめに

周波数が 100 GHz 程度のサブテラヘルツ帯は、非破壊検査、レーダーイメージング、Beyond 5G 通信など 様々な応用が検討されるようになってきている[1]-[3]。そのため、サブテラヘルツ波を発生させる固体デバ イスの研究が精力的に続けられている[4]-[6]。しかし、サブテラヘルツ帯の信号のスイッチングや変調、あ るいは偏波[7]などを制御する技術については、低損失な可変材料(半導体や誘電体)が現時点で存在してい ないため、十分な研究開発がなされていない。無線信号伝送において高い S/N 比を得るためには、送信器と 受信器の間の偏波を整合させることが不可欠である。また、キラル性を有する材料や構造を評価する上でも、 偏波の制御は重要である[8]-[10]。そのような偏波の制御手法として、これまでレーザーを光電変換する際 の電子軌道の制御[11]や二色レーザー誘起ガスプラズマ[12]、レーザーパルスの光整流[13]などが検討され てきた。しかし、これらの光学的アプローチは電子的な発振器に対して直接応用できるものではない。電子 的な偏波制御法としては、CMOS 集積回路ベースのアプローチが提案されており[14]、2×2 フェーズドアレイ

への拡張も検討されている[15]。この方法により 集積的な偏波制御が可能となる反面、アンテナの 偏波比に制約が生じる。また、反射型[16]あるい は透過型[17]のメタサーフェスの利用も検討され ているが、酸化バナジウム[18]や液晶[19]などの 可変媒質は大きな損失を伴う。

本研究では、サブテラヘルツ帯において機械的 駆動を伴わずに偏波制御を実現する新しい方法と して、マジックティを介して2台の発振器を結合 発振させる方法を提案する。マジックティとは、2 つの入力ポートからの信号の和と差を2つの出力 ポート(本稿ではΣポートおよびΔポートと呼ぶ) から出力する4ポート素子である[20]。本研究で は、2 つのガンダイオード発振器の結合発振時の 位相差を、各発振器の自励周波数を調整すること で制御する。それによって、ΣポートおよびΔポ ートから任意のパワー比で合成電力を取り出せる ようになる。そして、各ポートに直交する偏波ア ンテナを一対接続すれば、任意の偏波比を得るこ



図1(a)提案手法のシステム構成.(b)システムの写真.(c) 伝送実験系の写真.受信器は周波数ダウンコンバータを介し てスペクトラムアナライザに接続されている.



図2(a) 0SC1 および(b) 0SC 2 の自励周波数の実験的 評価.図1に示すシステム中に組み込まれた状態での実 測値.横時は移相器の移相量を調整するマイクロメータ のダイアルの読みを表す.

とが可能となる。これまでにマジックティを用い る電力合成の先駆的な研究[21]-[26]があるが、従 来は2つの出力ポートのうち1つだけを使用して 合成電力を取り出し、もう1つのポートは信号を 発振器に反射する目的のみに使用されていた。一



図3 バイアス電圧の関数としての自励周波数の変化. 図2を 再構成することにより作成. ただし、OSC1、OSC2の移相器の ダイアルはそれぞれ (a) (5.25 mm, 4.80 mm), (b) (5.20 mm, 4.85 mm), (c) (5.10 mm, 4.90 mm)の場合を示している. 対 応する OSC1 と OSC2 の自励周波数の差を (d)-(f) に示す.

方、本研究では2つの出力ポートが両方とも電力の取り出しと発振器への反射に使用される。このとき、も し2つの出力ポートからの反射信号が完全に等振幅で、互いに打ち消し合うようであれば相互注入同期によ る結合発振が成立しないことに注意が必要である。しかし、現実には反射率に有限の違いがあるため、この ようなことは生じないものと考えて差し支えない。

3 実験結果

図1 (a)、(b) に示すような実験系を、WR10 帯のディスクリート部品を組み合わせて構築した。94GHz 付近で発振周波数を電圧制御可能な2つのガンダイオード発振器(OSC1、2)を、移相器(PS1、2)およびマジックティを介して接続する。マジックティの2つの出力ポートは、VSWR が約1.4 dB のアイソレータ(ISO1、2) にそれぞれ接続されている。そして、2つのアイソレータは、水平偏波(H-ANT)と垂直偏波(V-ANT)とで直交する2つのホーンアンテナにそれぞれ接続されている。一般に、自励周波数が $f_1 \ge f_2$ である2つの発振器を結合し、それらの関数として定まるある周波数 $f_c(f_1, f_2)$ で発振させると、発振位相差 θ は次のように係数 η と関係づけられる[27]。

$$\sin\theta \propto \eta \equiv \frac{f_1 - f_2}{f_c(f_1, f_2)} \tag{1}$$

したがって、 f_1 の値を f_2 の近傍で変化させることで、 θ の値を連続的に変化させることができる。一般に、 位相差が ϕ で同振幅の信号を 2 つの入力ポートに与えるとき、 Σ ポートと Δ ポートから出力される信号の パワー比は $1 + \cos \phi : 1 - \cos \phi$ によって与えられる。ここで、PS1 と PS2の挿入位相を $\phi = \mp 90^\circ + \theta$ と なるように調整すれば、パワー比は $1 \pm \sin \theta : 1 \mp \sin \theta$ と表される。したがって、 $f_1 - f_2$ を調整して $\sin \theta$ の値を -1 から +1 まで変化させることで、任意のパワー比を実現することができる。

実験に先立ち、まず個々の発振器の自励周波数の評価を行った。そのために、2 つのホーンアンテナの代わりに、スペクトラムアナライザ(SA)をΣポートに、整合負荷をΔポートに直接接続した。測定開始前には、接続された状態で30分間以上ウォームアップした。まず、2 つの発振器のうち1 つだけを駆動し、挿入位相とバイアス電圧とを変化させながら発振周波数を測定した。なお、今回使用した SA は周波数上限が26.5GHzの装置であるが、周波数ダウンコンバートによって94GHz 帯の測定に用いた。具体的には、15.60GHzの局部発振信号を6 逓倍して得られる93.60GHz の固定周波数と、94GHz 付近の発振周波数との差周波数を測定した。測定の結果を図2にまとめる。(a)は 0SC1、(b)は 0SC2 についての結果を示す。横軸は移相器のマイクロメーターのダイヤル値を表しており、挿入位相と読み替えることができる。2 つの発振器は同じ仕



図 4 (a) 0SC1 のバイアス電圧を 8.90 V に固定し、 0SC2 を 8.75 V と 9.20 V の間で切り替えたときの受 信スペクトル. 青(赤)破線は、受信側ホーンアンテ ナが垂直(水平) 偏波のときの結果を表す.

様で製作されているため同様の応答を示している が、若干の個体差がある。約0.3mm 間隔で現れる 発振周波数の周期的変化(片道 90°、往復 180°) は、負荷(ここではアイソレータ)によって定ま るリアクタンスの周期的変化によるものであるこ とがわかる[28]。次に、図 2 (a) と (b) の結果 をプロットし直すことで、異なる挿入位相条件下 において、自励周波数の変化をバイアス電圧の関 数として示した結果を図3(a)-(c)に示す。また、 それに対応する OSC1 と OSC2 の自励周波数差を図 3 (d)-(f) に示す。図 3(a)と(c)では 2 つの自励 周波数がほぼ同じ傾向を示しているが、図3(b)で は0SC1と2の間で大小が交互に入れ替わる様子が 見られ、OSC1と2の間でリアクタンスが反転して いることが示唆される。それに対応して、図3(e) では周波数差が周期的な変化している。このとき、 PS1 と PS2 の位相差は片道で 45°、往復で 90° に近いと考えられる。したがって、この条件下で 結合発振を成立させることにより、マジックティ の2つの入力信号間の位相差 φ は φ = ∓90° + θ の形で変化すると考えられ、5V または 9V 程度の バイアス電圧により θ を線形的に調整できると 考えられる。この状態で以降の実験を行うことと した。



図 5 垂直・水平偏波時の受信信号レベルをバイアス電圧の 関数として比較した結果. (a) 0SC2 側を 4.65V に固定して 0SC1 側を変化させた結果. (b) 0SC1 側を 8.90V に固定して 0SC2 側を変化させた結果. (c) 受信側ホーンアンテナを 45° に傾けた時の結果. いずれの場合も、結合発振周波数を右軸 に示す.

次に、V-ANT と H-ANT をそれぞれ Σ ポート、 Δ ポートに接続し、30cm 離れた場所に設置された受信器での 受信信号を SA を用いて測定した(図1(c))。受信器に取り付けられたホーンアンテナの角度は 0°、45°、 90°に変化させられるようにした(0°は V-ANT に平行と定義)。図4は、OSC1 のバイアス電圧を 8.90V に固 定したうえで、OSC2 のバイアス電圧を 8.75V から 9.20V に切り替えたときの受信スペクトルを示す。青線 (V-pol)は受信ホーンアンテナが垂直偏波であるときの結果、赤線(H-pol)は水平偏波であるときの結果 を表す。バイアス電圧を変化させると、2 つの偏波の信号レベルが交互に変化していることが分かる。バイ アス電圧の影響をより詳細に調べるために、それぞれの偏波の信号レベルをバイアス電圧の関数としてプロ ットした結果を図5(a)、(b)に示す。右軸には結合発振周波数を併せて示している。図5(a)では OSC2 の バイアス電圧を 4.65 V に、図5(b)では OSC1 のバイアス電圧を 8.90 V にそれぞれ固定した。いずれの 場合も電圧によって偏波比を制御可能なことが確認でき、図5(a)では最大 31.8 dB (5.25 V 時)、(b)で は 28.2 dB (9.25 V 時) となることが分かった。一方、 反対側の偏波比は 7.57 dB (4.60 V 時)、13.1 dB (8.75 V 時) に留まった。これは、今回の実験系では電圧調 整の分解能が 0.05 V 刻みに限られているためであり、 より細かい電圧調整を行うことで位相の微調整が可能 になると考えられる。また、受信ホーンアンテナを 45°回転させ、両偏波を受信できるようにした場合の 結果を図 5 (c) に示す。この場合、予想通り、バイア ス電圧によらず信号レベルが一定となることが確認さ れた。

なお、本研究で使用したホーンアンテナ自体の偏波 の純度を確認する実験も併せて行った。図1(c)と同 様に、ISO1とホーンアンテナを介して、OSC1と受信器 とを向かい合わせに配置した(マジックティや OSC2 などの他の部品は用いていない)。受信器側のホーンア ンテナに対するOSC1のホーンアンテナの角度を0°か 90°かで切り替えることで、偏波整合状態と直交状態 での信号伝送を比較した。OSC1のバイアス電圧を 8.90Vに固定して、2つの偏波状態で信号レベルを比較



図 6 実験に使用したホーンアンテナの偏波純度を確認 するための測定.バイアス電圧を8.90V とした 0SC1 か ら受信器に伝送された信号のスペクトルを偏波整合状 態と直交状態とで比較.

した結果を図 6 に示す。2 つのスペクトルピークの比は 34.6dB となった。図 5 (a)、(b)の最大偏波比はそ れぞれ 31.8dB、28dB であり、この 34.6dB に近いものの若干それより低い値となっている。この結果は、電 圧調整の分解能が最大偏波純度を制限しているという先の考察と整合するものである。

以上の結果から、本研究において提案するサブテラヘルツ帯の結合発振状態の電圧制御、およびそれに基づく偏波制御を実証した。なお、結合発振状態の電圧制御は発振周波数のシフトを伴うものであることを付記しておく。偏波を完全に切り替えるために必要な周波数シフト量は、図 5 (a) では 26.6MHz (0.03%)、(b) では 15.6MHz (0.016%) である。しかし、今後 2 つのバイアス電圧を同時に調整することで、この周波数シフトを打ち消すことができると考えられる。今回は、 f_2 を固定し、 f_1 のみを f'_1 と変化させることで、式(1)における η の変化から位相シフトが得られるようにした。

$$\eta' = \frac{f'_1 - f_2}{f_c(f'_{1'}f_2)} \neq \eta.$$
⁽²⁾

このとき、 $f_c(f'_1, f_2) \neq f_c(f_1, f_2)$ であることから周波数シフトが生じる。しかし、 f_1 と共に f_2 を変化させることで、同じ位相シフトでも周波数シフトが生じないようにすることができると考えられる。すなわち、

$$\eta' = \frac{f''_1 - f''_2}{f_c(f''_1, f''_2)},\tag{3}$$

$$f_c(f''_1, f''_2) = f_c(f_1, f_2) \tag{4}$$

となるような f''_1 と f''_2 のペアを、与えられた η' に対して見つけることができる。これを実験的に実現 するためには、2 つのバイアス電圧を独立・同時に制御する必要がある。

なお、本研究では直線偏波を扱ったが、V-ANTと H-ANT の間に 90°の位相差を設けると円偏波を得ることも可能である。また、今回は 2 つのアンテナを分離して使用したが、1 つのパッケージで両方の偏波を扱える 直交モード変換器[29]-[31]を使用すれば、1 つのアンテナに統合することが可能である。

また、提案手法をさらに高い周波数帯で実装することも可能であると考えられる。例えば、1THz 以上での 発振も可能な共鳴トンネルダイオードにおいてはアレイ化による結合発振が解析されている[27]。このよう な高い周波数では、マジックティのような導波管デバイスの実装は困難になるが、マイクロストリップライ ンベースのハイブリッドカプラ[32]等への置き換えを考えることができる。

4 おわりに

本研究では、100GHz 程度のサブテラヘルツ帯において、結合発振状態の電圧制御、およびそれに基づく偏

波制御を実現する方法を提案した。提案手法はマジックティを介した2つの発振器の結合発振に基づいている。2つの発振器間の位相条件を調整することで、マジックティの2つの出力ポートから任意のパワー比で 電力を取り出すことが可能となる。そして、それらを直交する2つのホーンアンテナを導入することで任意 の偏波比を実現できる。実験的に確認された最大偏波比は31.8dBであり、偏波を電圧制御するため必要な周 波数シフトは26.6MHz(0.03%)であった。しかし、今後2つの自励周波数を独立に調整することで、この 周波数シフトを打ち消すことができると考えられる。また、マイクロストリップラインを用いたハイブリッ ドカプラ等を用いることで、よりコンパクトなシステム構築やさらなる高周波化が可能になると考えられる。

【参考文献】

T. Nagatsuma, G. Ducournau, and C. C. Renaud, "Advances in terahertz communications accelerated by photonics," *Nat Phot.*, vol. 10, no. 6, pp. 371–379, 2016, doi: 10.1038/nphoton.2016.65.
 D. M. Mittleman, "Twenty years of terahertz imaging," *Opt. Express*, vol. 26, no. 8, p. 9417, 2018, doi: 10.1364/oe.26.009417.

[3] H. Matsumoto, I. Watanabe, A. Kasamatsu, and Y. Monnai, "Integrated terahertz radar based on leaky-wave coherence tomography," *Nat. Electron.*, 2020, doi: 10.1038/s41928-019-0357-4.

[4] R. A. Lewis, "A review of terahertz sources," *Journal of Physics D: Applied Physics.* 2014, doi: 10.1088/0022-3727/47/37/374001.

[5] K. Sengupta, T. Nagatsuma, and D. M. Mittleman, "electronic – photonic systems," *Nat. Electron.*, vol. 1, no. December, 2018, doi: 10.1038/s41928-018-0173-2.

[6] M. Asada and S. Suzuki, "Terahertz emitter using resonant-tunneling diode and applications," *Sensors (Switzerland)*, vol. 21, no. 4, pp. 1–20, 2021, doi: 10.3390/s21041384.

[7] X. You, C. Fumeaux, and W. Withayachumnankul, "Tutorial on broadband transmissive metasurfaces for wavefront and polarization control of terahertz waves," *J. Appl. Phys.*, vol. 131, no. 6, 2022, doi: 10.1063/5.0077652.

[8] N. C. J. van der Valk, W. A. M. van der Marel, and P. C. M. Planken, "Terahertz polarization imaging," *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 20, p. 2802, 2005, doi: 10.1364/ol.30.002802.

[9] C. M. Morris, R. Vald, A. V Stier, and N. P. Armitage, "Polarization modulation time-domain terahertz polarimetry," vol. 20, no. 11, pp. 418–430, 2012.

[10] M. Okano and S. Watanabe, "Anisotropic optical response of optically opaque elastomers with conductive fillers as revealed by terahertz polarization spectroscopy," *Nat. Publ. Gr.*, no. November, pp. 1–11, 2016, doi: 10.1038/srep39079.

[11] H. Wen and A. M. Lindenberg, "Coherent Terahertz Polarization Control through Manipulation of Electron Trajectories," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 103, no. 2, pp. 2–5, 2009, doi: 10.1103/PhysRevLett.103.023902.

[12] J. Dai, N. Karpowicz, and X. C. Zhang, "Coherent polarization control of terahertz waves generated from two-color laser-induced gas plasma," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 103, no. 2, pp. 1–4, 2009, doi: 10.1103/PhysRevLett.103.023001.

[13] M. Sato *et al.*, "Terahertz polarization pulse shaping with arbitrary field control," *Nat. Photonics*, vol. 7, no. 9, pp. 724–731, 2013, doi: 10.1038/nphoton.2013.213.

[14] S. M. Bowers, A. Safaripour, and A. Hajimiri, "Dynamic polarization control," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 50, no. 5, pp. 1224–1236, 2015, doi: 10.1109/JSSC.2015.2403313.

[15] A. Safaripour, S. M. Bowers, K. Dasgupta, and A. Hajimiri, "Dynamic Polarization Control of Two-Dimensional Integrated Phased Arrays," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 64, no. 4, pp. 1066–1077, 2016, doi: 10.1109/TMTT.2016.2530704.

[16] Y. Z. Cheng *et al.*, "Ultrabroadband reflective polarization convertor for terahertz waves," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, no. 18, 2014, doi: 10.1063/1.4901272.

[17] L. Cong, N. Xu, W. Zhang, and R. Singh, "Polarization Control in Terahertz Metasurfaces with the Lowest Order Rotational Symmetry," *Adv. Opt. Mater.*, vol. 3, no. 9, pp. 1176–1183, 2015, doi:

10.1002/adom.201500100.

[18] M. T. Nouman, J. H. Hwang, M. Faiyaz, K.-J. Lee, D.-Y. Noh, and J.-H. Jang, "Vanadium dioxide based frequency tunable metasurface filters for realizing reconfigurable terahertz optical phase and polarization control," *Opt. Express*, vol. 26, no. 10, p. 12922, 2018, doi: 10.1364/oe.26.012922.

[19] T. Sasaki *et al.*, "Active Terahertz Polarization Converter Using a Liquid Crystal-Embedded Metal Mesh Using a Liquid Crystal-Embedded," *IEEE Photonics J.*, vol. 11, no. 6, pp. 1–7, 2019, doi: 10.1109/JPHOT.2019.2950021.

[20] P. A. Loth, "Recent Advances in Waveguide Hybrid Junctions," *IRE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 4, no. 4, pp. 268–271, 1956, doi: 10.1109/TMTT.1956.1125076.

[21] S. Mizushina, "2n oscillators combined with 3-dB directional couplers for output power summing," *Proc. IEEE*, vol. 55, no. 12, pp. 2166–2167, 1967, doi: 10.1109/PROC.1967.6101.

[22] J. R. Nevarez and G. J. Herskowitz, "Output Power and Loss Analysis of 2/sup n/

Injection-Locked Oscillators Combined through an Ideal and Symmetric Hybrid Combiner," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 17, no. 1, pp. 2–10, Jan. 1969, doi: 10.1109/TMTT.1969.1126871.

[23] K. Kurokawa, "Injection locking of microwave solid-state oscillators," *Proc. IEEE*, vol. 61, no. 10, pp. 1386–1410, 1973, doi: 10.1109/PROC.1973.9293.

[24] K. Fukui and S. Nogi, "On the Phase Adjusting of a Magic T-Coupled Oscillators System," *Mem. Sch. Eng. Okayama Univ.*, vol. 8, no. 2, pp. 66–74, 1973.

[25] S. Hamaya, "Analysis of the stability of oscillation modes in parallel - running oscillators," *Electron. Commun. Japan (Part I Commun.*, vol. 66, no. 12, pp. 90–99, 1983, doi: 10.1002/ecja.4400661212.

[26] K. Fukui, S. Nogi, S. Tanaka, and S. Ohishi, "Parallel - running of two cylindrical cavity multiple - device oscillators," *Electron. Commun. Japan (Part II Electron.*, vol. 72, no. 10, pp. 40–51, 1989, doi: 10.1002/ecjb.4420721005.

[27] M. Asada and S. Suzuki, "Theoretical analysis of coupled oscillator array using resonant tunneling diodes in subterahertz and terahertz range," *J. Appl. Phys.*, vol. 103, no. 12, 2008, doi: 10.1063/1.2947600.

[28] R. A. York and R. C. Compton, "Quasi-Optical Power Combining Using Mutually Synchronized Oscillator Arrays," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 39, no. 6, pp. 1000–1009, 1991, doi: 10.1109/22.81670.

[29] G. Pisano *et al.*, "A broadband WR10 turnstile junction orthomode transducer," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 17, no. 4, pp. 286–288, 2007, doi: 10.1109/LMWC.2007.892976.

[30] A. Navarrini and R. Nesti, "Symmetric reverse-coupling waveguide orthomode transducer for the 3-mm band," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 57, no. 1, pp. 80–88, 2009, doi: 10.1109/TMTT.2008.2008943.

[31] C. A. Leal-Sevillano, T. J. Reck, G. Chattopadhyay, J. A. Ruiz-Cruz, J. R. Montejo-Garai, and J. M. Rebollar, "Development of a wideband compact orthomode transducer for the 180-270 GHz band," *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 4, no. 5, pp. 634–636, 2014, doi: 10.1109/TTHZ.2014.2336540.

[32] C. Y. Pon, "Hybric-Ring Directional Coupler for Arbitrary Power Divisions," *IRE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. MTT-9, no. 6, pp. 529–535, 1961, doi: 10.1109/TMTT.1961.1125385.

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Voltage-Controlled Polarization at 0.1 THz Based on Phase-Tuned Coupled Oscillation via a Magic-Tee	IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology	2022 年 7 月採録決定

〈発表資料〉