

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：12608
 研究種目：挑戦的萌芽研究
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23656251
 研究課題名（和文） 積層薄板中空導波路を用いた 300GHz 帯高利得高効率広帯域平面アンテナの研究
 研究課題名（英文） High-gain, High-efficiency and Wide-band Planar Antennas using Plate-laminated Hollow Waveguides in the 300GHz Band
 研究代表者
 廣川 二郎 (Hirokawa Jiro)
 東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
 研究者番号：00228826

研究成果の概要（和文）：

下層に並列給電回路，上層に放射スロットアレーを有する 2 層構造の導波管型平面アンテナを 300GHz 帯で検討した。エッチング銅薄板積層拡散接合を用いて 16x16 素子アレーを試作した。形状値を 10um 減少させたアンテナにおいて損失を含めたアンテナ効率のピーク値が約 75% と高い値が得られた。光技術を用いた送信機を接続して，送受間距離 50cm，送信電力 20uW でビット誤り率が 10E-10 以下となる中心周波数範囲が 10GHz あり，最大可能伝送速度は約 17Gbps と見積もられた。

研究成果の概要（英文）：

We have discussed a double-layer waveguide-type planar antenna with a corporate-feed circuit on the bottom layer and a radiating slot array on the top layer in the 300GHz band. 16x16-element arrays have been fabricated by diffusion bonding of laminated thin copper plates. A high antenna efficiency of about 75% has been achieved at the peak in an antenna by decreasing all the parameters by 10um. The maximum available transmission rate is estimated to be about 17Gbps by obtaining 10GHz bandwidth of the center frequency for bit-error-rate less than 10E-10 in an experiment with 50cm distance and 20uW transmission power.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：アンテナ・ミリ波・テラヘルツ・先端的通信・情報通信工学

1. 研究開始当初の背景

(1) 電波と光波の境界に位置する未開拓，未利用の電磁波領域であるテラヘルツ帯の電波を，超高速無線通信に利用することに，近年強い関心が寄せられていた。

(2) 60GHz 帯で試作した積層銅薄板 2 層構造導波路 16x16 素子スロットアレーアンテナ（大きさ約 70mm 四方）において，損失が約 0.3dB と小さく，約 80% の実験値が比帯域約 8% にわたり得られている。マイクロストリッ

プ線路を用いた同程度の利得の平面アンテナでは効率は 60GHz 帯で約 25% と低い。また，エッチング薄板積層拡散接合技術により，利得の実験値のエラーバーに示すように 8 個のアンテナのばらつきも小さい。

(3) 60GHz での試作では厚さ 0.2mm の銅板を 6 枚積層して 1 層分の導波管を構成している。導波管部を厚さ 0.2mm 1 枚でも構成できるので，厚さが 1/6 となり動作周波数は 6 倍の 360GHz までは現在用いている技術で製作で

きる可能性が高い。さらに、数十 μm の厚さの銅箔を用いて構成できれば、テラヘルツ帯へ適用できる。

2. 研究の目的

(1) ①積層銅薄板 2 層構造導波路スロットアレーアンテナを 300GHz 帯で試作し、30-50dBi の高利得の範囲で、比帯域 10%程度かつ効率が材料損失と大きさから決まる限界値から 1dB 低下以内の実現を目指す。
②ウィスパリングギャラリ共振器法により銅板、銅箔の導電率を 300GHz 帯で測定する。

(2) 300GHz 帯で、EO サンプリング技術による 2 次元近傍界分布大面積微細測定システム、ショットキーバリアダイオードによる指向性・利得測定システムを構築する。

(3) 誘電体基板表面に用いられている厚さが 35, 18, 9 μm の銅箔を用いて構成する手法を見出しテラヘルツ帯(最高 3THz 程度)へ適用する。

3. 研究の方法

(1) ①図 1 に示す積層銅薄板 2 層構造導波路 16x16 素子スロットアレーアンテナを、60GHz 帯モデルからのスケールダウンを基本にして設計周波数 350GHz で設計した。アンテナは、下層に並列給電回路、上層に放射スロットアレーを有する 2 層構造となっている。また、エッチングした銅薄板を複数積層して加圧高温下で拡散接合し、微細な導波路構造を完全電気接合で実現する。銅薄板の厚さの種類は限られているため 0.2mm とした。スロットの角の曲率半径は銅薄板の厚さの 80%とする必要があるため 0.16mm とした。整合用の金属壁の厚みもエッチング精度の制限から 0.2mm とする必要がある。これらを考慮し形状を決定した。

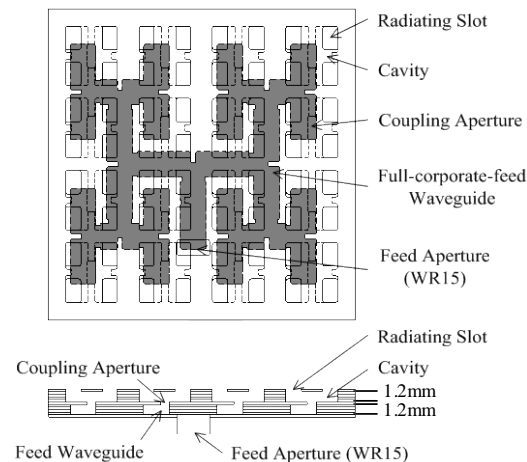


図 1 積層銅薄板 2 層構造導波路スロットアレーアンテナ

②エッチング銅薄板積層拡散接合を用いて 16x16 素子アレーを製作した。図 2 に試作アンテナの写真を示す。

形状変化による周波数変化を確認するため、設計値そのままのもの、すべての形状値を 10 μm 増加あるいは 10 μm 減少させたものの 3 種類を製作した。素子間隔は 0.7mm (350GHz で 0.82 波長) でアレーの大きさは 11.2mm 四方である。また、2 層構造の導波路の厚さは全体で 0.6mm である。

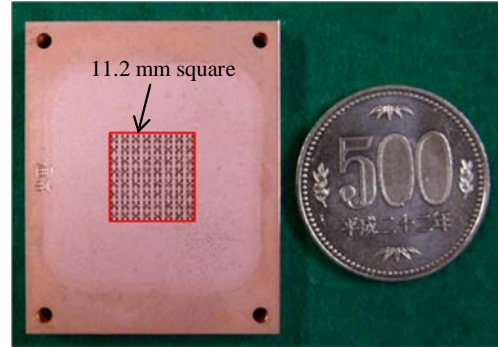


図 2 試作アンテナ

③②での実験結果に基づき、形状値を 30 μm 減少させて、2 台のアンテナの試作を再度行い、特性を評価した。

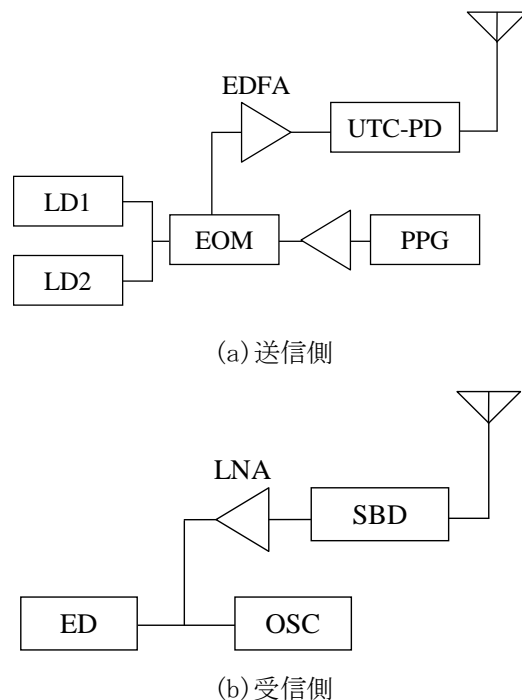


図 3 300GHz 帯実験システム (LD: レーザダイオード, EOM: 光変調器, EDFA: 増幅器, UDP-PD: フォトダイオード, SBD: ショットキーバリアダイオード, LNA: 定雑音増幅器, ED: エラー検出器, OSC: オシロスコープ, PPG: パルス波形成器)

(2) ①図3に示す光技術を用いた300GHz帯実験システムの送信側に本アンテナを接続し、10Gbpsの無線データ伝送実験を行った。異なる2つの波長の光信号は、ASKのパルス波形生成器でデジタル変調される。そしてフォトダイオードで300GHz帯の信号に変換された後、アンテナから送信される。別のアンテナで受信された信号はショットキバリアダイオードで検出され、エラー検出器でビット誤り率を測定する。

②100~300GHz帯のアンテナ評価技術に関して、周波数通倍器を用いたシステムの導入と、アンテナの近傍電界測定技術の向上を行った。

(3) 研究の優先度、経費を考慮し、目的の(1)②および(3)の項目については実施せず、(1)①および(2)の項目へ注力した。

4. 研究成果

(1) ①16x16素子アレーアンテナの設計の結果、反射の程度を表す電圧定在波比が1.5以下となる帯域が5.6%となった。また、図4の利得の周波数特性の設計値に示すように、340GHz~365GHzの範囲にわたってアンテナ効率約70%が得られている。

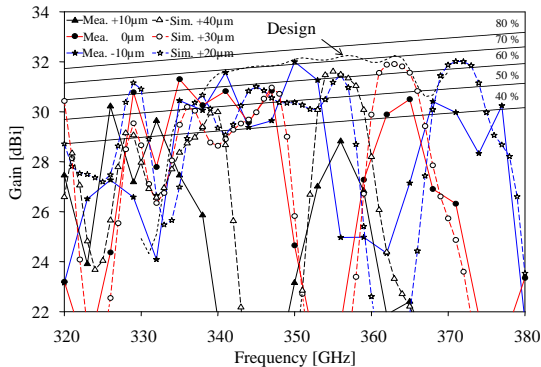


図4 利得の周波数特性

② 利得の周波数特性を測定したが、図4に示すように、設計値と実験値は一致しなかった。しかし、30umのオーバーエッチングを仮定して形状値を変化させて再計算をしたところ、設計値そのままの形状のアンテナでの実験値とおおむね良好に一致した。形状値を10um増加あるいは10um減少させた場合の周波数特性の変化も実験により確認できた。損失を含めたアンテナ効率に関しては、形状値を10um減少させたものにおいてピーク値が350GHzで約75%(利得は約31.5dBi)と高い値が得られた。334GHzから354GHzまでにわたりアンテナ効率40%以上を実現した。

③利得の周波数特性の実験値は図5に示すように、②に比べ設計値に近づき、形状値を

10um減少させた周波数特性に近くなった。試作した2台のアンテナの周波数特性には若干の差が見られた。良いほうのアンテナについて、アンテナ効率が約70%越える周波数範囲は364GHz~369GHzの5GHzの幅となり、アンテナ効率が約40%越える周波数範囲は357GHz~372GHzの15GHzの幅となった。

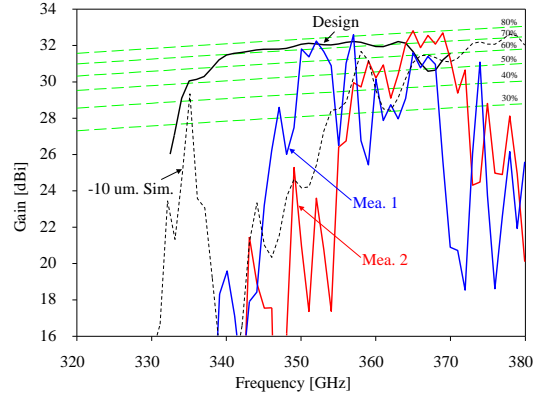


図5 利得の周波数特性

(2) ①中心周波数338GHz、送受アンテナ間距離50cmで、10Gbpsデータ伝送を行った時のビット誤り率を図6に示す。送信機のフォトダイオード電流5.5mA(送信電力20uWに対応)の時、ビット誤り率 $10E-11$ を達成した。

図7に10Gbpsデータ伝送の中心周波数を変化させた時のビット誤り率とアンテナ利得を示す。ビット誤り率が $10E-10$ 以下となる中心周波数範囲は10GHzあった。10Gbpsデータ伝送に必要なRF帯域を14GHzとすれば、最大利用可能RF帯域は約24GHzとなる。よって、最大利用可能伝送速度は約17Gbpsと見積もられる。

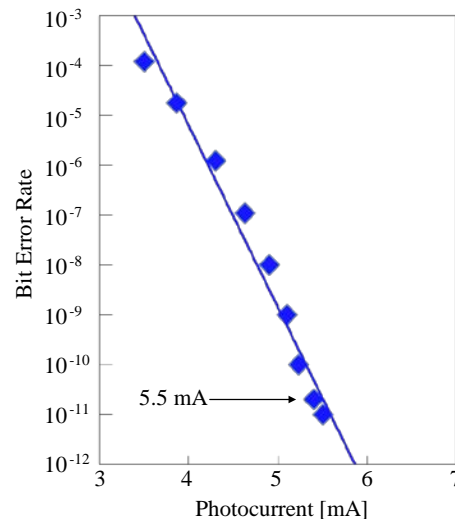


図6 ビット誤り率

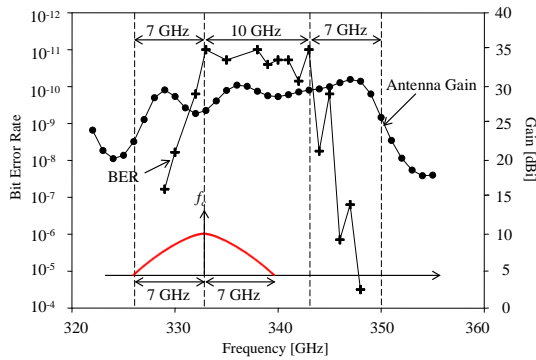


図7 ビット誤り率とアンテナ利得

②周波数通倍器を用いたシステムにより送信出力が一桁向上するとともに周波数の可変が容易になり、アンテナの測定時間が大幅に改善(1/3以下)された。また、アンテナの近傍電界測定技術として、フリーランの周波数可変レーザ光源を用いながらも、周波数精度 $\pm 200\text{MHz}$ 、位相精度 0.2rad で3次元の電磁界分布を測定できる手法を開発した。本計測は、電気光学結晶を電界センサーとして用い、レーザ光を該結晶に照射して、電界によるレーザ光の偏光変化から電界強度、位相を測定するものである。図8は一例としてアレーアンテナの開口近傍の電界分布を測定した例である。

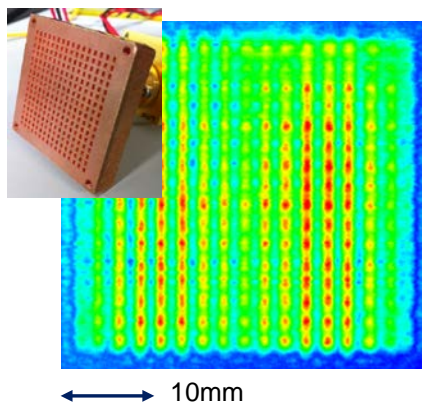


図8 アレーアンテナの近傍電界分布(開口から1mm)の測定例

(3) ①非常に弱い電波を利用するテラヘルツ無線では、高効率で高利得のアンテナ技術が必要であるが、これまでほとんど研究例がない。本研究は、ミリ波帯(100GHz程度以下)でのアンテナ設計技術がテラヘルツ帯まで適用できるか、すなわち、研究代表者がミリ波帯で開発した導波管平面アンテナ技術をテラヘルツ帯にスケールダウンし実用的なアンテナが実現できるかどうかを世界に先駆けて実験的に検討したものである。本研究の成果により、ミリ波帯の設計手法がテラヘ

ルツ帯まで適用できることが証明されたと共に、実用化に向けて今後解決していくべき課題も明確にできた。

②試作アンテナの特性改善には、エッチング精度ならびに積層時の位置合わせ精度のさらなる向上(10 μm 以下)が必要と考える。そのためには、既存の金属板エッチング技術だけでなく、半導体デバイス加工技術などを取り込んでいく必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計24件)

①永妻忠夫, 新たなフェーズに入りつつあるテラヘルツ技術とその展望, 2013年電子情報通信学会総合大会, CK-1, エレクトロニクスソサイエティプレナリーセッション特別講演, 2013年3月20日, 岐阜大学, 岐阜市

② T.Nagatsuma, Present and Future of Terahertz Communications, THz Opportunities for Industry, 2013年2月11日, Lausanne, スイス

③ T.Nagatsuma, Enabling Technologies for THz Communications: Electronics vs. Photonics, IEEE Radio & Wireless Week Workshop on Towards THz Communications Systems and Applications, 2013年1月20日, Austin, アメリカ

④ D.Kim, Double-layer Corporate-feed Hollow-waveguide Slot Array Antenna and Its Data Transmission Test Results in Millimeter Wave Band, 電子情報通信学会マイクロ波研究会, 2013年1月17日, 機械振興会館, 東京都

⑤ T.Nagatsuma, Radio Spectral Evolution with Photonics Technologies, Regional Annual Fundamental Science Symposium 2012, 2012年12月11日, Johor Bahru, マレーシア

⑥永妻忠夫, 300GHz~1THzを利用した無線通信の将来展望, 電子情報通信学会電子デバイス研究会, 2012年12月7日, 東北大学, 仙台市

⑦ T.Nagatsuma, Photonic Generation of Terahertz Waves for Communications and Sensing, 2012 THz Workshop Focusing on Radio-Over-Fiber Communication, 2012年12月3日, National Tsing Hua University, 台湾

⑧ T.Nagatsuma, Extreme Bandwidth THz Communications based on Photonic Technologies, International Symposium on Frontiers in THz Technology, 2012年11月28日, 奈良市

⑨永妻忠夫, 電波と光波の境界にある電磁波

「テラヘルツ波」の科学と応用，電気四学会関西支部「准員及び学生員のための講演会」，2012年11月22日，京都工繊大学，京都市

⑩永妻忠夫，テラヘルツ技術の研究動向と今後の展望，日本学術振興会 真空ナノエレクトロニクス第158委員会 第93回研究会，2012年8月20日，大阪大学中之島センター，大阪市

⑪永妻忠夫，テラヘルツ波通信の研究動向と今後の展望，ワイヤレス・テクノロジー・パーク2012，2012年7月5日，パシフィコ横浜、横浜市

⑫永妻忠夫，テラヘルツ波の応用を支えるデバイス技術の動向，URSI-C委員会 第22期 第3回公開研究会，2012年6月1日，鹿児島大学，鹿児島市

⑬T.Nagatsuma, Terahertz Communications Technologies based on Photonic and Electronic Approaches, 18th European Wireless Conference, 2012年4月19日, Poznan, ポーランド

⑭永妻忠夫，ミリ波/テラヘルツ波通信の研究動向，学術振興会シリコン超集積化システム第165委員会，2012年4月13日，弘済会館，東京都

⑮廣川二郎，Millimeter-wave band array antennas using transmission-loss reduced waveguide structures, European Conference on Antennas and Propagation, 2012年3月27日, Prague Congress Centre, チェコ

⑯廣川二郎，Plate-laminated Waveguide Slot Array Antennas for 120GHz Band and 350GHz Band, 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会，2012年1月10日，てんぶす那覇，那覇市

⑰廣川二郎，Designs and Measurements of Plate-laminated Waveguide Slot Array Antennas for 120GHz Band and 350GHz Band, Asia Pacific Microwave Conference, 2011年12月6日，Melbourne Convention Exhibition Center, オーストラリア

⑱高田卓馬，Characterization of Waveguide Slot Antenna Array for 300-GHz-band Wireless Link Systems, International Symposium on Terahertz NanoScience, 2011年11月28日，大阪大学中之島センター，大阪市

⑲金東眞，Design and Fabrication of Double-Layer Waveguide Slot Array Antennas using Diffusion Bonding of Laminated Thin Plate for 350 GHz-band,

電子情報通信学会通信ソサイエティ大会，2011年9月14日北海道大学，札幌市

⑳高田卓馬，350 GHz 帯導波管スロットアレーアンテナを用いた無線通信実験，電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会，2011年9月14日，北海道大学，札幌市

㉑廣川二郎，ミリ波帯アレーアンテナにおける伝送損失低減導波路構造のいろいろ，電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会，2011年9月8日，大阪大学，豊中市

㉒廣川二郎，Design extensibility of plate-laminated millimeter-waveguide slot array antennas, 2011 Thailand-Japan MicroWave, 2011年8月11日, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, タイ

㉓金東眞，Design and Measurement of a Corporate-feed Plate-laminated Waveguide Slot Array Antenna for 120 GHz-band, 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会，2011年7月15日，信州大学，長野市

㉔金東眞，Design and Fabrication of a Corporate-feed Plate-laminated Waveguide Slot Array Antenna for 120GHz-band, 2011 IEEE AP-S URSI International Symposium, 2011年7月7日，Spokane Convention Center, アメリカ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣川二郎 (Hirokawa Jiro)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：00228826

(2) 研究分担者

永妻 忠夫 (Nagatsuma Tadao)
大阪大学・基礎工学研究科・教授
研究者番号：00452417

(3) 連携研究者

安藤 真 (Ando Makoto)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：90159533

浅田 雅洋 (Asada Masahiro)
東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授
研究者番号：30167887

張 ビョウ (Zhang Miao)
東京工業大学・大学院理工学研究科・産学官
連携研究員

研究者番号：90535866