

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630171

研究課題名(和文) シリコンウェハ加工技術を用いた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) Study of 300GHz-band high-gain high-efficiency wide-band planar antennas using silicon process

研究代表者

廣川 二郎 (Hirokawa, Jiro)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：00228826

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：300GHz帯積層薄板2層構造中空導波管並列給電16x16スロットアレーアンテナを、製作精度が約数 μm であるシリコン加工技術により設計、製作した。設計周波数350GHzで一様励振設計した。直径4インチ、厚さ0.2mmのシリコンウェハ5枚を用いて試作する手法を確立した。利得3dB低下比帯域が約10%(帯域幅35GHz)を実験により得た。

また、2つのアンテナを向き合わせた近接無線通信を検討し、位相変調を施すことで、アンテナ間の距離が0～10mmの範囲において、定在波の影響を受けない安定した通信を、理論とともに実証した。

研究成果の概要(英文)：300GHz-band plate-laminated double-layer hollow-waveguide corporate-feed 16x16-slot array antennas have been designed for uniform excitation at 350GHz and fabricated by silicon process with tolerance of about several micrometers. Five silicon wafers with 4-inch diameter and 0.2mm thickness are used. 3dB-down gain bandwidth is about 10% (35GHz) in measurements. Close-proximity communication has been done by facing two antennas to each other. By phase modulation, stable communication not affected by a standing waveguide is confirmed in a range of 0-10mm by theory and measurement.

研究分野：電気電子工学

キーワード：アンテナ サブミリ波

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領域であるテラヘルツ波を超高速度無線通信に利用することに近年関心が寄せられていた。

(2)現在までにアンテナ内の中空導波路形成にエッチング銅薄板の積層および拡散接合技術により製作を進めてきた。120GHz帯において64x64素子アンテナを利得約43dBi、アンテナ効率約60%、利得1dB低下比帯域約10%で世界で初めて実現していた。

300GHz帯への適用を図ったが、エッチング精度を10 μ m程度に追い込んで、実験値が設計値よりも大きく劣化することが分かった。

(3)加工精度が数 μ mのシリコンウェハ加工技術を導入することとした。複数のシリコンウェハに導波路パターンをエッチングし、その全面を金メッキで覆い、積層して接合することとで左上のアンテナ構造が実現できる。

2. 研究の目的

(1)①シリコンウェハ加工技術を用いて、積層薄板2層構造導波管スロットアレーアンテナを300GHz帯で試作し、33~45dBiの高利得の範囲で、比帯域約10%かつ材料損失と大きさから決まる限界値から1dB低下以内のアンテナ効率の実現を目指す。

②シリコンウェハ加工技術を用い、長さの異なる複数の直線導波路を300GHz帯で試作し、伝送特性を測定して導波路壁面の実効導電率を測定する。金の基準導電率4.5x10⁷S/mの70%を目指す。

(2)①アレーアンテナ小型評価システムを構築し利得・効率等を260GHz~400GHzで評価する。

②試作アンテナを300GHz帯無線システムに導入し、15Gbit/sを超える超広帯域性と実用性を実証する。

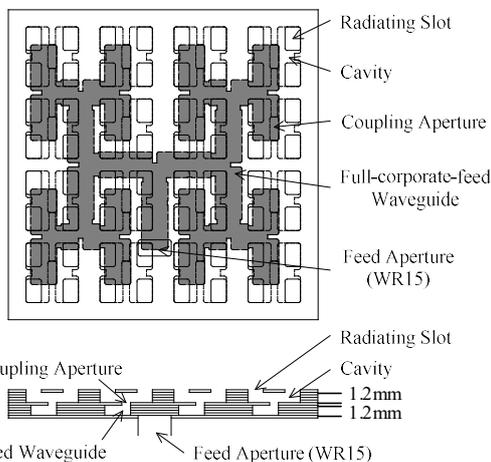


図1 積層薄板2層構造導波路スロットアレーアンテナ

3. 研究の方法

(1)①図1に積層銅薄板2層構造導波路スロットアレーアンテナを示す。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、表面を金メッキしたシリコンウェハ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。

②5枚のシリコンウェハを用いて、アンテナ、導波路、共振器を作成した。ウェハの厚さは0.2mm、直径は4インチである。製作手順は、(i)パターンエッチング、(ii)メッキ、(iii)接合、(iv)ダイシングである。

(i)パターンエッチング

まず、電子線蒸着装置Crを蒸着し、厚膜フォトリソ用スピニング装置でHMDSを塗布した。そして、マニュアルスピナーでレジストを塗布し、ホットプレートでプレベイクした。さらに、レーザー直接描画装置で露光し、ホットプレートでPEB工程を行って、レジスト現像装置で現像した。次に、Siトレイにエレクトロニックワックスを塗布し、Siトレイにパターンニングしたウェハを張り合わせた。最後に、深堀ドライエッチング装置でエッチングし、Siトレイからウェハを取り外し、エレクトロニックワックスとCr膜を除去した。

(ii)メッキ

下地としては、クロムを電子ビーム蒸着した場合と、さらに無電解ニッケルメッキを施した場合を検討した。いずれもその後、電気めっきで金メッキを厚さ3 μ m以上形成した。その際の浴温は65度、5mA/cm²の電流を12分間流した。

(iii)接合

温度300度、加重9kN、気圧5x10⁻⁴mBarで1枚ずつ行った。

(iv)ダイシング

ダイシングソーを用いて、ウェハからアンテナを切り出した。

(2)①周波数通倍器を用いた信号発生器、ミキサによるダウンコンバータとスペクトラムアナライザを組みあわせ、それらを約100cmx80cmx80cmの簡易暗室に配置した。アンテナ利得・放射パターン測定システムを構築した。周波数帯域は、260GHz~400GHzであり、これにより、中心周波数350GHzに対して \pm 50GHzの広帯域評価を可能とした。

②100GHz~300GHz帯無線は、実用化に向け、国内外で研究開発が活発化していることから、アレーアンテナの特徴を見出し、それを最大限に活用するための応用を検討するため、キャリアの周波数やコヒーレンス性、変調速度を容易に制御することのできる、光技術を送信機に用いた通信システム(図3)を構築した。

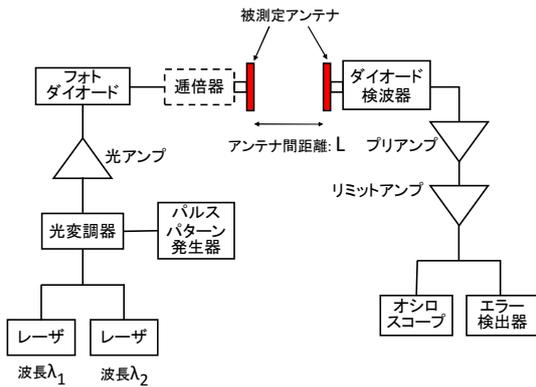


図 3 試作したアンテナを用いた無線通信システムのブロック図 (周波数通倍器は、高出力が必要な場合に用いる)

4. 研究成果

(1) ①16x16 素子アレーアンテナを設計周波数 350GHz で一様励振設計した。素子間隔は設計周波数において 0.86 波長である。図 4 に、指向性利得 (directivity), 利得 (gain), 実現利得 (realized gain) の周波数特性の設計値を示す。導電率としては金の基準導電率 $4.1 \times 10^7 \text{S/m}$ を用いた。設計周波数において、指向性利得は 32.7dBi, 実現利得は 31.8dBi になっている。アンテナ効率は 72% である。実現利得が 31dBi を超える周波数範囲は 338GHz から 372GHz までであり、比帯域は約 10% である。並列給電回路により広帯域特性が実現されている。

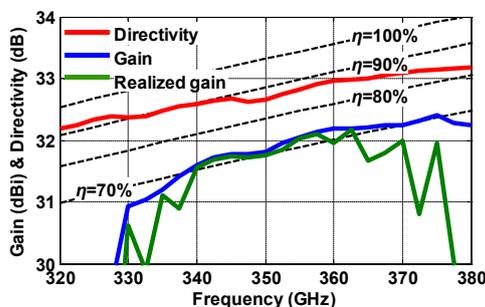


図 4 指向性利得, 利得, 実現利得 (設計値)

②アンテナのパターンをエッチングした 5 枚のシリコンウェハ (厚さ 0.2mm, 直径 4 インチ) に、前処理のあと下地を施した。下地としては、(a)クロムを電子ビーム蒸着した場合、(b)さらに無電解ニッケルメッキを施した場合を検討した。いずれもその後、電気めっきで金メッキを厚さ $3 \mu\text{m}$ 以上形成した。

下地にクロムを電子ビーム蒸着した場合で、長さ 20, 40, 60mm の直線導波路の透過量を測定した。図 5 に単位長さあたりの透過量をしめす。リップルは導波路両端の開口による。350GHz 付近での損失は約 0.9~1.3dB である。この結果からの等価導電率は $2.6 \sim 5.4 \times 10^7 \text{S/m}$ の範囲となり、銅の基準値 ($5.8 \times 10^7 \text{S/m}$) の 45~90% の範囲となっている。下地にさらに無電解メッキを施した場合も

同様な測定を行ったが、長さに対して損失が逆転した例があり、原因を検討する必要がある。そこで、まず下地としてクロムを電子ビーム蒸着した場合でアンテナを試作した。しかし、その時の利得は設計値に比べ約 20dB 低い結果となった。下地としてクロムを電子ビーム蒸着で場合、直線導波路や共振器のような簡単な構造では、導波路側面に金属膜をきちんと形成できるのに対し、アンテナでは、並列給電回路や放射スロット層などが複雑な構造であるために、きちんと形成できなかったと考えられる。アンテナでは、下地にさらに無電解ニッケルメッキを施すことにした。

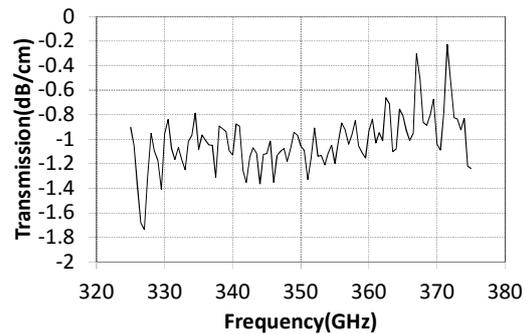


図 5 クロムを下地とした直線導波路の伝送損失

③図 6 に示すように、16x16 素子アレーアンテナ 4 個の利得の周波数特性を測定した。設計周波数の 350GHz を中心として、利得 3dB 低下比帯域が約 10% (帯域幅 35GHz) と、並列給電の特長である広帯域特性が初めて実験で確認できた。また、4 つのアンテナの特性のばらつきも小さい。パターンエッチング、メッキ、接合のいずれの工程もおおむね成功したといえる。しかし、図 6 では、測定に用いた導波管の伝送損失やアンテナの反射損失を定量的に評価できていない。また、利得の実験値は設計値に比べ、約 3dB 低くなっており、損失の定量的評価、測定の精度向上を今後、行っていく必要がある。

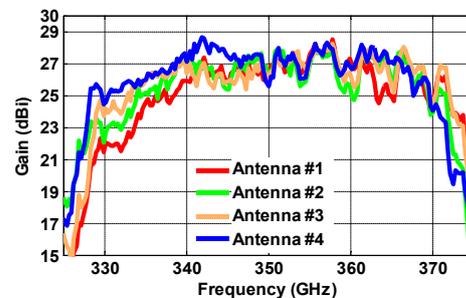


図 6 試作した 4 つのアンテナの利得

(2) ①については、それを用いた評価結果をすでに上記で説明したので省く。

②-1 図7は、図3に示した実験系において、2つのレーザの波長差を変えることで、キャリア周波数を変化させながら、1Gbit/sのデータ信号を伝送させた場合の、ビット誤り率の測定結果である。アンテナ間距離Lは、10mmとした。

同図(a)は、送信機のフォトダイオードに流す電流を変えることで送信出力を変化させ、ビット誤り率を測定したものである。若干のばらつきがあるが、340GHz、350GHz、360GHzのいずれのキャリア周波数においても、ビット誤り率が 10^{-9} （エラーフリー）に達していることが分かる。同図(b)は、キャリア周波数と最小のビット誤り率との関係をプロットしたものである。329GHz~368GHzの約40GHzの帯域でエラーフリーとなり、今回試作したアンテナが、オンオフ変調でも20Gbit/sを超える十分な実効帯域を有することが確認できた。

今後、実際に20Gbit/sを超える無線伝送実験を行う予定である。

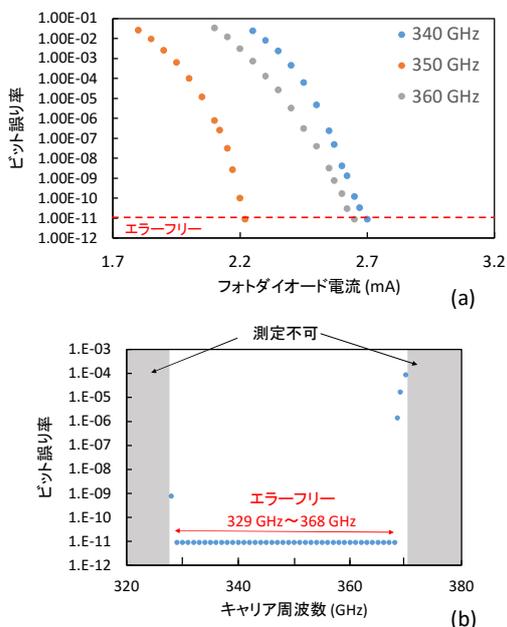


図7 無線通信実験結果（試作したアンテナを送受信系に用い、1Gbit/sのオンオフ変調により、送信電力とキャリア周波数を変えてビット誤り率を測定）

②-2 本アレーアンテナの特長を生かした応用として、アンテナ間距離が10mm以内の近接無線の検討を行った。上述の300GHz帯アンテナは、この検討を行った時期においては試作途上であったため、報告者等が既開発の120GHz帯のアレーアンテナを用いた。

一般に近接無線では、送受信アンテナ間に生じる定在波の影響により、伝送特性がアンテナ間距離Lに大きく依存する。例えば、ビット誤り率はアンテナ間距離によって大きく変化する。電磁界シミュレータを用いて、送受信でスロットアレーアンテナを近接させた場合の定在波の振舞いを調べたところ、ホ

ーンアンテナに比べて、定在波の振幅が非常に小さくなることが分かった。

さらに、図3に示した実験系において、レーザ光源のひとつに適度な位相変調を与えて、キャリア周波数のコヒーレンス性を若干低くすると、定在波が通信に及ぼす影響をほとんど無くすることができた。

図8は、非圧縮HDTV信号(1.5Gbit/s)の近接無線伝送において、アンテナ間距離を変えた時の様子を、ホーンアンテナとアレーアンテナで比較したものである。同図の写真の背景に見えるのはTV画面で、黒い画面は定在波の影響で正常に伝送ができなかったことを示す。アレーアンテナの場合、アンテナ同士を接触させた場合(L=0mm)でも伝送ができていることが分かる。

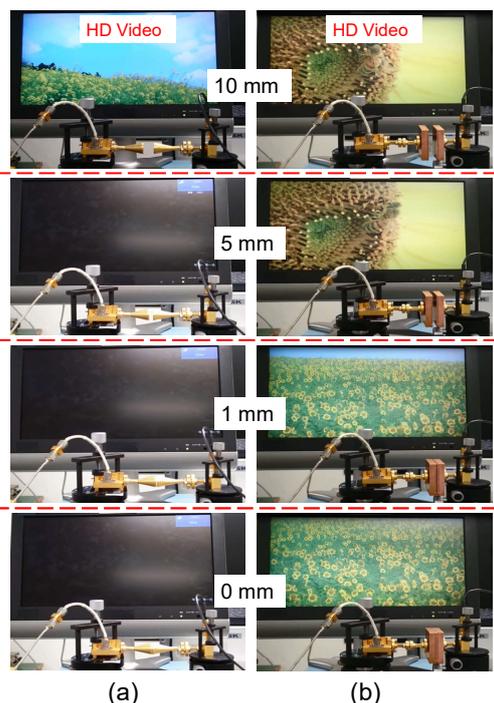


図8 近接無線による非圧縮HDTV伝送実験の様子 ((a)ホーンアンテナ, (b)アレーアンテナ)

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7件)

① T. Nagatsuma, Present and Future of THz Communications, Swedish Microwave Days, GigaHertz Symposium, 2016年3月16日, リーショッピング市(スウェーデン)

② K. Oogimoto, Y. Inubushi, J. Hirokawa, and T. Nagatsuma, Close-Proximity Terahertz Communications Using Phase Modulation and Array Antennas, International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT 2015), 2015年8月31日, ACT CITY 会議場(静岡県・浜松市)

③ J. Hirokawa, S. Suetsugu, Y. Minamikata, T. Nagatsuma, H. Seto, Y. Inoue, and M. Saito, Plate-laminated Waveguides for

350GHz Band Fabricated by Silicon Process,
Vietnam-Japan MicroWave, 2015年8月10日,
ホーチミン市(ベトナム)

④J. Hirokawa, S. Suetsugu, Y. Minamikata,
T. Nagatsuma, H. Seto, Y. Inoue, and M.
Saito, Fabrication of Plate-laminated
Waveguide for 350GHz Band by Silicon
Process, URSI Atlantic Radio Science
Conference, 2015年5月17日, グランカナ
リア市(スペイン)

⑤扇本一輝, 南方佑介, 廣川二郎, 桑野 茂,
寺田 純, 枚田明彦, 永妻忠夫, 平面アレー
アンテナを用いたテラヘルツ帯近接無線通
信における伝送品質の改善, 電子情報通信学
会 2015 総合大会, C-14-15, 2015年3月11
日, 立命館大学(滋賀県・草津市)

⑥T. Nagatsuma, Ultra-high Speed Terahertz
Communications Empowered by Photonics,
The 2014 Benjamin Franklin Symposium on
Microwave and Antenna Sub-systems (BenMAS
2014), SA3A-1, 2014年9月27日, フィアデ
ルフィア市(アメリカ)

⑦廣川二郎, 戸村崇, 南方佑介, 永妻忠夫,
瀬戸弘之, 井上良幸, 加藤邦男, シリコンプ
ロセスを用いた 350GHz 帯積層薄板接合導波
路アンテナの試作, 電子情報通信学会通信ソ
サイアティ大会, B-1-49, 2014年9月24日,
徳島大学(徳島県・徳島市)

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・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
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