

平成22年5月27日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19360158

研究課題名（和文） 超高分解能ミリ波マイクロスコピーの開発

研究課題名（英文） Development of Ultra-High Resolution Millimeter-Wave Microscopy

研究代表者

荻戸 立夫 (NOZOKIDO TATSUO)

富山大学・大学院理工学研究部（工学）・准教授

研究者番号：00261149

研究成果の概要（和文）：超高分解能画像計測技術の開発を、電波の高周波帯に位置するミリ波帯で実施した。本研究では、従来ミリ波帯で達成されている空間分解能を格段に改善し得る高感度画像計測用センサー（プローブ）を開発することにより、観測波長の1000分の1以下、ミクロンオーダーでの画像取得を初めて可能とした。本研究の成果はミリ波帯における超高分解能画像計測技術の実用化に寄与するところが大きく、未だ十分でないミリ波帯電磁波の有効利用を促進し得るものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this research project, ultra-high resolution imaging techniques have been developed by scanning near-field microscopy in the millimeter waveband located in the high-frequency region of the radio-frequency spectrum. We have designed and fabricated novel high-sensitivity near-field probes which can attain much better spatial resolution than that obtained with conventional near-field probes used in the millimeter-wave region. The record image resolution of the order of few microns has been experimentally demonstrated. The results obtained during this research project contribute greatly to the development of high-resolution imaging technology in the millimeter-wave region and could therefore advance utilization of the millimeter wave whose potential has not been fully exploited.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
2008年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：ミリ波、マイクロスコピー、走査型近接場顕微鏡技術、プローブ、高分解能、高感度、画像化

1. 研究開始当初の背景

通常の光学系と伝搬波を用いる画像化システムでは、分解能は用いる波の波長程度に制限されるが、走査型近接場顕微鏡ではこの限界以下の分解能、すなわち波長よりも十分小さい分解能で物体を観察し画像化することが可能である。近年、光領域における走査型近接場顕微鏡技術の開発は飛躍的に進歩しており、既に実用の域に達していると考えられる。走査型近接場顕微鏡技術は当初 10 GHz のマイクロ波を用いて実験的検証が行われたものであり、電波領域においても実現可能である。マイクロ波からテラヘルツ波に至る高周波帯の電波領域で動作するシステムが実用化されれば、光領域のシステムと同様に様々な分野への応用が展開されると期待され、現在、世界各国で研究開発が実施されている。しかしながら、本研究開発は光領域と比較して遅れをとっているのが現状であった。

マイクロ波帯では画像計測用プローブ（センサー）として同軸線路型プローブ、テラヘルツ波領域では散乱型プローブによってナノスケールの分解能が達成されていた。しかしながら、マイクロ波とテラヘルツ波の中間に位置するミリ波帯では分解能は 100 μm 程度にとどまっておき、本領域における高分解能画像計測技術の開発が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では、この“ミリ波ギャップ”を埋めることを目指し、従来達成されている空間分解能を格段に改善し得る超高分解能プローブを開発して画像取得を実施すること、すなわち、超高分解能ミリ波マイクロコピー（超高分解能ミリ波帯走査型近接場顕微鏡技術）を開発することを最大の目的として研究開発を実施した。

3. 研究の方法

(1) 高分解能テーパー型スリットプローブの開発

研究代表者等が提案し開発を実施してきた、金属導波管を用いたテーパー型スリットプローブの高分解能化を検討した。本プローブは他のプローブと比較して、極めて高感度な信号検出が可能であるという特長を有している。従来、電気鋳造及び機械工作でプローブを製作していたため、達成可能な分解能化は 100 μm 程度であった。更なる高分解能化を目指して提案した新たなプローブ構造を図 1 に示す。従来のテーパー型スリットプローブの先端に、微細加工に有効な MEMS 技術（半導体プロセス技術）で製作した、金メッキを施したシリコン製チップを装着するものである。シリコン製チップ先端のスリット状開口の高さ h_s 程度の二次元空間分解能

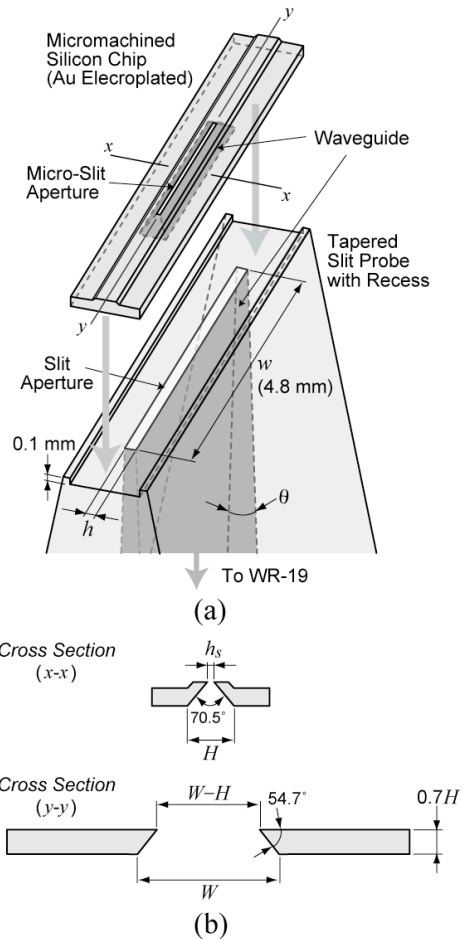


図 1 MEMS 技術で製作したシリコンチップを装着する新型スリットプローブ (a) プローブ全体図、(b) シリコンチップの構造

を達成可能である。三次元電磁界シミュレータ (Ansoft HFSS) により、ミリ波帯 60 GHz でチップ寸法の詳細設計を行った。MEMS 技術を用いてチップを製作し、テーパー型スリットプローブの先端に実装、プローブの特性評価及び画像取得実験を実施した。

(2) ナイフブレードを用いた散乱型マイクロコピーの開発

高分解能化のための第二の方法として、図 2 に示す、ナイフブレードを用いた散乱型プローブを提案した。ナイフブレードを用いることにより、従来の金属針を用いたプローブと比較して、画像化のための検出信号である散乱波の強度を格段に大きくすることが可能と考えられる。ナイフブレードを用いた場合の二次元画像再構成原理の実験的検証に重点をおき、60 GHz でミリ波光学系（ミリ波照射及び検出）の設計・製作、画像取得実験を行った。なお、(1) も含めて、以上の研究開発では、プローブの特性評価、画像取得実験の際、ミリ波帯の高感度特性評価装置であ

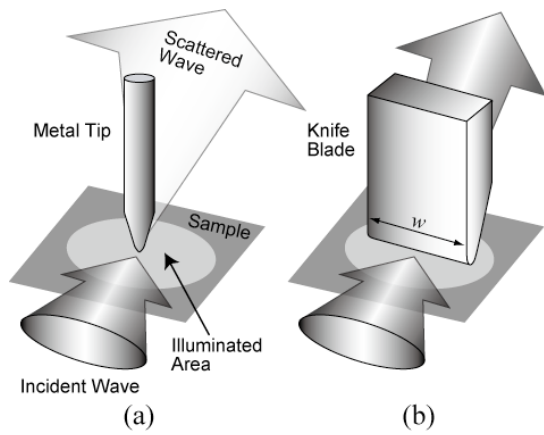


図2 散乱型プローブの比較 (a) 金属針、(b) ナイフブレード

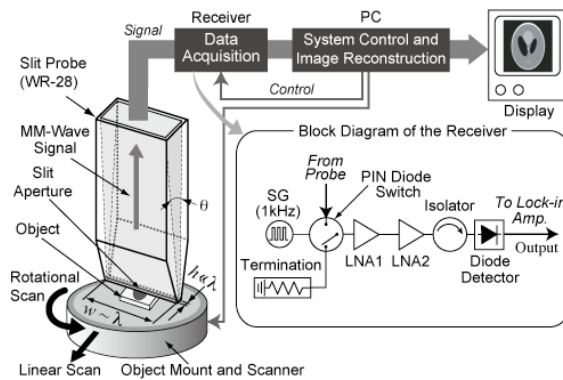


図3 スリット型プローブを用いたミリ波帯パッシブマイクロコピーの実験システム

る、ベクトル・ネットワーク・アナライザ (VNA) を使用した。(下記アクティブ方式に相当する)

(3) パッシブマイクロコピーの開発

超高感度プローブであるスリット型プローブの特長を活かして、新たな顕微鏡技術(マイクロコピー)であるミリ波帯パッシブ(受動型)マイクロコピーを提案し、本方法の実験的検証を試みた。従来の走査型近接場顕微鏡技術では、発振器(光源)からのコヒーレントな波を物体に照射して画像化を行うアクティブ方式を用いている。本ミリ波帯パッシブマイクロコピーは、物体から自然放出されている熱雑音信号の内のミリ波成分を受信して、回折限界以下の分解能で画像化を行うという、完全無侵襲計測を可能とする全く新たな画像計測技術である。図3に、パッシブマイクロコピーの実験システムを示す。プローブで検出された微弱な熱雑音ミリ波信号を受信するために、挿入図で示す構成のミリ波Ka帯(26.5-40.0 GHz)で動作する広帯域低雑音受信器を開発した。プロ

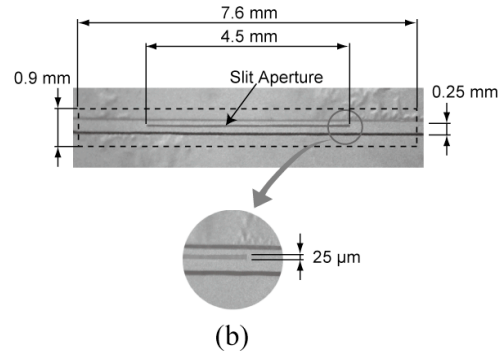
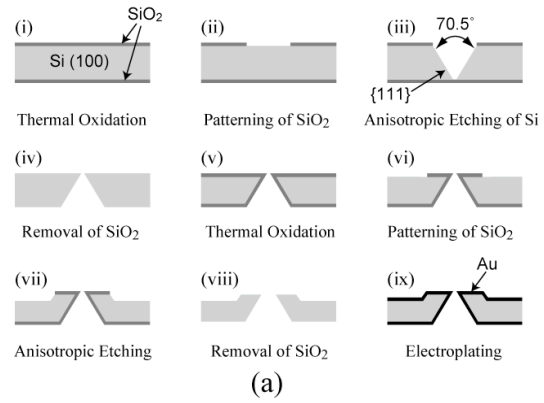


図4 シリコンチップの製作プロセス (a) と完成したチップの写真 (b)

ーブと無反射終端を交互にスイッチで切り替え、ダイオード検出器からの出力電圧をロックインアンプで計測する、Dicke型の構成となっている。ミリ波帯熱雑音信号を検出するための受信システムの実験評価、画像取得実験を実施した。

4. 研究成果

(1) 高分解能テーパ型スリットプローブの開発

HFSSによるシリコンチップ設計の際、チップ底面の導波管幅 W と高さ H を調整することにより、プローブの透過効率すなわち測定感度を格段に改善できることを見いだした。幅 W と高さ H を適切に選択すると、チップ先端部の開口高さ h_s を μm 、サブ μm オーダーにしても、透過効率100%を実現可能という高分解能化における重要な設計指針を得ることができた。

図4に、シリコンチップ製作のために開発した異方性ウエットエッチングを用いた製作プロセス(a)と製作したシリコンチップの写真(b)を示す。幅4.5 mm、高さ25 μm という高い寸法比を有する直線性良好なスリット状開口の形成に成功した。

製作した2種類のシリコンチップ(h_s はともに25 μm)をそれぞれテーパ型スリットプローブの先端に装着し、60 GHzでプローブの基礎特性評価を実施した結果を図5に示す。

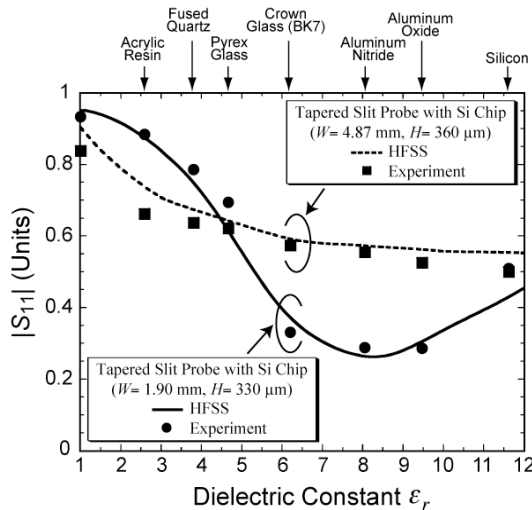


図5 シリコンチップを装着したスリット型プローブの基礎特性（測定対象の誘電率に対するプローブ反射係数の変化）

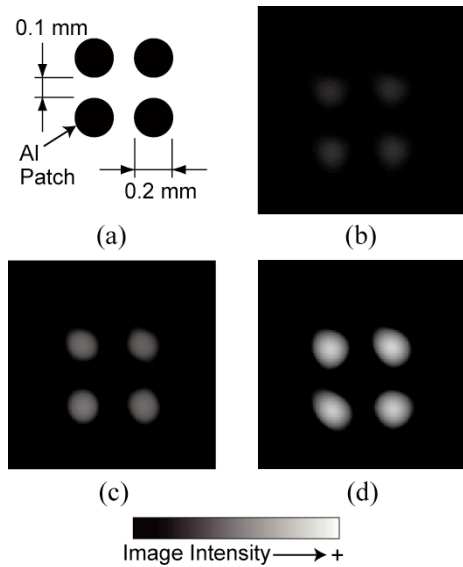


図6 取得画像 (a) 測定対象の構造、(b) 通常のスリット型プローブ ($h = 90 \mu\text{m}$) で得られた画像、(c) シリコンチップ ($W = 4.87 \text{ mm}$, $H = 360 \mu\text{m}$) を装着したスリット型プローブで得られた画像、(d) シリコンチップ ($W = 1.90 \text{ mm}$, $H = 330 \mu\text{m}$) を装着したスリット型プローブで得られた画像（画像サイズ：1 mm×1 mm）

本図は、測定対象の誘電率を変化させた場合のプローブ反射係数 S_{11} の強度変化を示している。図上部に、測定対象とした誘電体基板の材料名を記載している。通常のスリット型プローブ ($h = 90 \mu\text{m}$) では誘電率が増加するに従って 0.95 から 0.9 程度しか変化しなかった反射係数が、シリコンチップを装着す

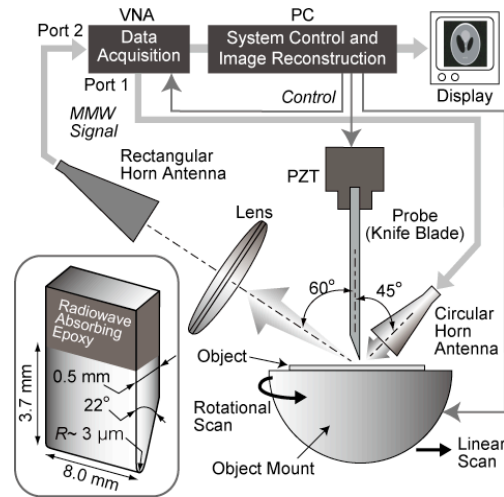


図7 ナイフブレードを用いたミリ波帯散乱型マイクロスコピーの実験システム

ることによって開口高さ (h_s) が小さくなっているにもかかわらず、大きく改善されていることがわかる。更に本結果より、HFSSによる理論計算結果と実験値との良い一致も確認できた。

図6は、通常のスリット型プローブ、2種類のシリコンチップをそれぞれ装着したスリット型プローブを用いて、60 GHzで取得したミリ波画像である。測定対象は、図6(a)に示す石英基板に蒸着したアルミニウム (Al) パッチである。直線スキャンと回転スキャンを組み合わせたスキャン方法でデータを取得し、本データを本研究で開発した画像再構成プログラムで処理することにより、スリット開口高さと同程度の二次元空間分解能を有する画像が得られている。(次に記載する(2)、(3)においても同様のスキャン方法、画像再構成プログラムを使用している) シリコンチップを装着することにより、画像コントラストが約 20 dB と大幅に改善されることが確認できた。

(2) ナイフブレードを用いた散乱型マイクロスコピーの開発

ナイフブレードをプローブとして用いた場合の画像再構成原理の実験的検証を行うために、まず、市販のカッターナイフに金メッキを施してプローブとして使用した。実験システムを図7に示す。挿入図は、使用したプローブ (ナイフブレード) の構造を示している。プローブ先端部の曲率半径 R は $3 \mu\text{m}$ である。VNAからのミリ波 (60 GHz) を円形ホーンアンテナでプローブ先端に照射し、散乱波をポリエチレン製レンズで集光、方形ホーンアンテナで受信した後、VNAで計測して画像化のためのデータを取得した。

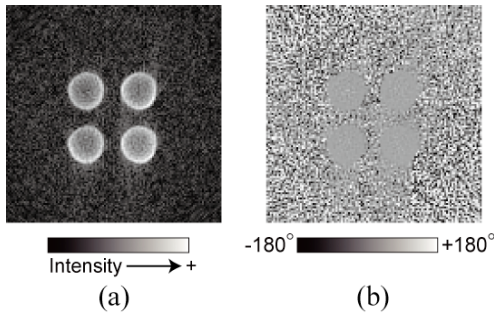


図8 取得画像 (a) 強度画像、(b) 位相画像 (画像サイズ: 1.2 mm×1.2 mm)

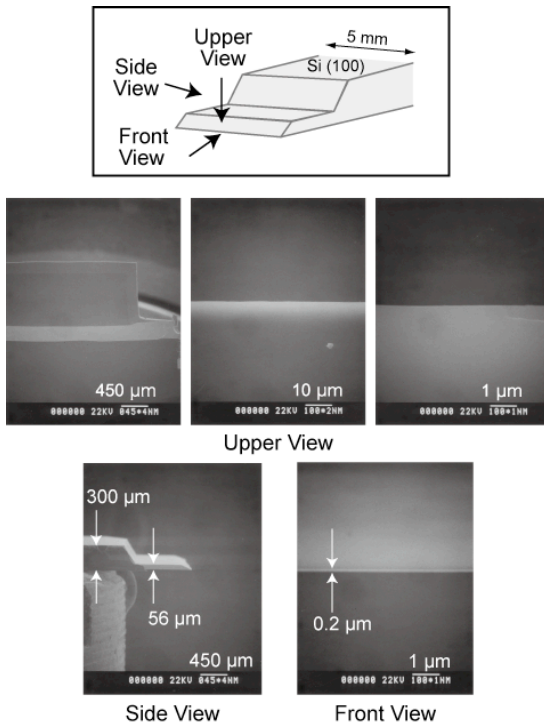


図9 シリコン基板を材料として製作したナイフブレードのSEM画像

図8は、図6(a)を対象として得られた再構成画像(強度画像、位相画像)である。図6と比較して、更に優れた分解能の画像が得られていることがわかる。画像解析を実施し、分解能がプローブ先端部の曲率半径とほぼ等しい値となっていることを確認した。本分解能は観測波長 5 mm の約 1/1000 に相当し、ミリ波帯では世界最高の値である。

更なる高分解能化を図るために、シリコン基板を材料として、シリコンの異方性エッチングを利用したナイフブレードの製作に関する検討も実施した。図9に、製作したナイフブレードのSEM画像を示す。先端部曲率半径 0.1 μm の、直線性良好なナイフブレードを製作することに成功したものの、研究期間内では特性評価、画像取得実験を実施するには至らなかった。

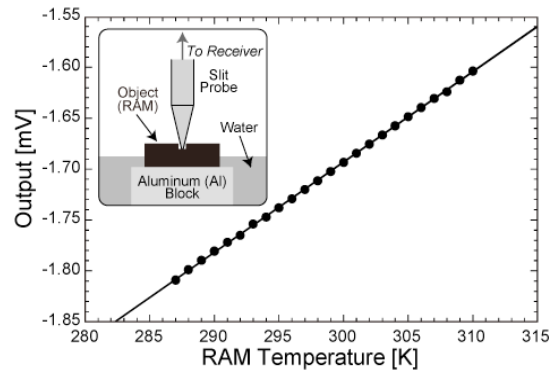


図10 電波吸収材料(RAM)の温度に対するロックインアンプ出力電圧の変化

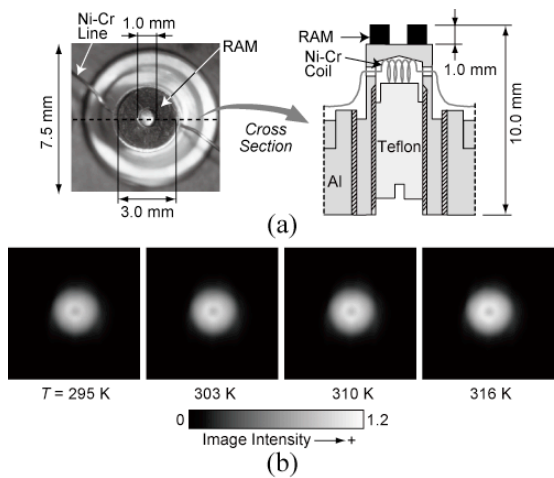


図11 パッシブマイクロコピーの取得画像 (a) 測定対象の構造、(b) 再構成画像 (画像サイズ: 7.5 mm×7.5 mm)

(3) パッシブマイクロコピーの開発

プローブとしては、Ka帯の金属導波管を用いたテーパ型スリットプローブを用いた。プローブ先端部のスリット開口の高さは 150 μm である。図10に、プローブも含めたミリ波帯熱雑音信号受信システムの特性的評価の結果を示す。挿入図のように、プローブを測定対象である電波吸収材料(Radar Absorbing Material: RAM)に密着させ、測定対象の温度を変化させた場合のロックインアンプの出力電圧を計測した。出力電圧は測定対象の温度に比例していることから、スリット型プローブは測定対象から放出されている熱雑音信号を受信可能であることが確認できた。本結果より、Yファクター法を用いて、本受信システムのシステム雑音温度として 1650 K という値が得られた。本雑音温度は、ロックインアンプの時定数が 1 秒の場合、28 mK の温度分解能に相当するものである。

図11は図3で示した実験システムで得られたミリ波画像である。測定対象は、図11(a)に構造を示す、中心に直径 1 mm の孔を有

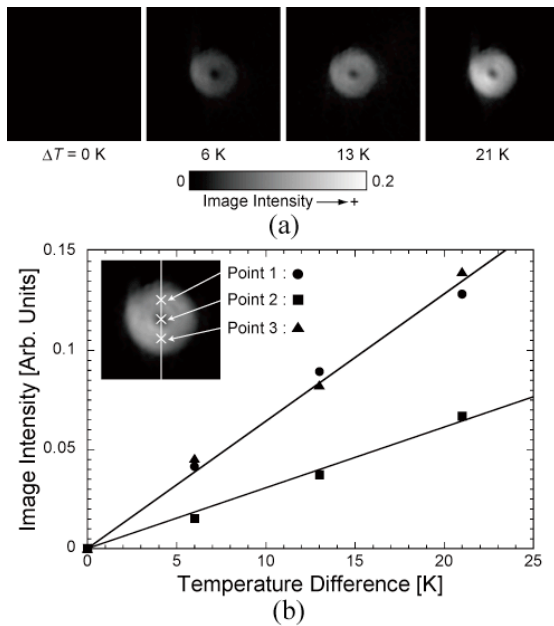


図 1.2 温度差に対応する差分画像 (a) と画像強度の変化 (b)

するドーナツ型の電波吸収材料 (RAM) である。電波吸収材料の温度を 295 K から 316 K まで変化させて測定したミリ波画像を図 1.1 (b) に示す。本図では各温度に対応する画像の差は明らかでない。温度差の影響を現す差分画像を図 1.2 (a) に示す。図のように、温度差が大きくなるほど画像強度が増加していることがわかる。更に、測定対象中心部の、観測波長の $1/10$ 程度の大きさを有する孔が明確に画像化されている。図 1.2 (b) は、図 1.2 (a) の画像より、画像上 3 点の画像強度を温度差に対してプロットした結果である。本図より、画像強度も温度差に比例して変化することが確認できた。

以上の実験結果は、物体から自然放出されている熱雑音信号の内のミリ波成分を受信して、回折限界以下の分解能での画像化に成功したことを示している。本結果は、熱雑音信号のエバネッセント波成分をも画像化した最初の実験結果であると認識している。

以上の成果は、ミリ波帯における超高分解能画像計測技術の実用化に寄与するところが大きく、未だ十分でないミリ波帯電磁波の有効利用を促進し得るものと考えている。

本研究の開始時は、ミリ波利用の新たな可能性を探索するために、生体組織を対象とした画像計測を試みることも目的としていたが、有意な画像を得るには至らなかった。今後は、本研究で対象としたミリ波帯画像計測システムの更なる高分解能化、高感度化、高機能化を推進するとともに、再度生体組織も含めた新たな対象を選択し、画像取得実験を実施していく計画である。

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)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① T. Nozokido, N. Miyasaka, T. Murai, J. Bae, Near-Field Slit Probe Incorporating a Micromachined Silicon Chip for Millimeter-Wave Microscopy, to appear in the Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 査読有, 2010
- ② T. Nozokido, S. Maede, N. Miyasaka, H. Okada, T. Nose, and T. Murai, A Millimeter-Wave Quasi-Optical Grid Phase Shifter Using Liquid Crystal, IEICE Electronics Letters, 査読有, Vol. 7, pp. 67-72, 2010
- ③ T. Nozokido, M. Noto, and T. Murai, Passive Millimeter-Wave Microscopy, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 査読有, Vol. 19, pp. 638-640, 2009
- ④ 能登政光, 荻戸立夫, 村井忠邦, ミリ波帯パッシブマイクロスコープ, 電子情報通信学会技術報告, 査読無, MW2008-147, pp. 7-12, 2008

[学会発表] (計 1 件)

- ① 荻戸立夫, ミリ波帯パッシブマイクロスコープ, 電子情報通信学会マイクロ波研究会, 2008 年 12 月 12 日, 富山大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荻戸 立夫 (NOZOKIDO TATSUO)
富山大学・大学院理工学研究部 (工学)・
准教授

研究者番号: 00261149

(2) 研究分担者

工藤 博幸 (KUDO HIROYUKI)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・
教授

研究者番号: 60221933

佐々木 和男 (SASAKI KAZUO)

富山大学・大学院理工学研究部 (工学)・
教授

研究者番号: 60042826

(3) 連携研究者

該当なし