



## 高周波帯走査型近接場顕微鏡技術 High-Frequency Scanning Near-Field Microscopy

荻戸立夫、裊 鐘石、水野皓司 (東北大学電気通信研究所)

Tatsuo NOZOKIDO, Jongsuck BAE and Koji MIZUNO

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

**要旨：**一般にこれまでの各種顕微鏡における分解能は、回折現象により観測波長程度に制限される。これに対し、波長以下の微小開口等をプローブとして用いる近接場顕微鏡にはこの制限がなく、より高い分解能で物体を観察することが可能である。近接場顕微鏡の研究開発は、現在では電波から光に至る幅広い電磁波領域で活発に進められている。近年、マイクロ波、ミリ波といった高周波帯の近接場顕微鏡は、物体の非破壊検査、誘電率、抵抗率といった物理定数の画像化、高周波回路の特性評価といった応用分野で注目を集めている。本稿では、先ず高周波帯における走査型近接場顕微鏡技術の開発現状についてその概要を説明する。次に、我々が開発を行っている、スリット型プローブを用いたミリ波帯走査型近接場顕微鏡システムを紹介する。

**Abstract :** The resolution of conventional imaging microscopes is limited by diffraction to about the radiation wavelength used. The recent development of scanning near-field microscopy has successfully overcome this resolution barrier by employing sub-wavelength apertures or sharp tip structures as near-field probes. The near-field imaging has been accomplished in a variety of instruments, which cover frequencies spanning the microwave to optical regions. Recently microwave and millimeter-wave bands scanning near-field imaging techniques have attracted much attention as useful tools for nondestructive evaluation of materials, mapping of dielectric constants of insulating layers, characterization of active microwave circuits, etc. This review provides an overview of high-frequency scanning near-field microscopy in the microwave and millimeter-wave regions. As an example of the millimeter-wave microscopy, a millimeter-wave microscope system using a metal slit-type probe is described.

**Key Words :** scanning near-field microscopy, microscope system, high-frequency, microwave, millimeter-wave, slit-type probe

### 1. はじめに

従来の光学系を用いた顕微鏡の分解能は、回折現象により観測波長程度に制限される。波長以下の開口、端部を先鋭化した金属片等をプローブとする走査型近接場顕微鏡では、この限界以下の分解能を達成することが可能である。1972年にAshとNichols<sup>1)</sup>によって、10GHzのマイクロ波帯走査型近接場顕微鏡により観測波長の1/60の分解能で物体を観察できることが実証されて以来、短波から光領域に至る幅広い電磁波領域において様々な走査型近接場顕微鏡システムの提案がなされてきている。近接場を利用した技術としては、顕微鏡はもとより、近接場光ストレージ、近接場露光、光近接場による原子操作といった、光領域における研究開発<sup>2)</sup>がこれま

で主流であるが、本稿においては、先ず光領域以外の、すなわちマイクロ波、ミリ波といった電波の高周波領域における走査型近接場顕微鏡技術の概要を説明する。次に我々が研究開発を行っている、スリット型プローブを用いたミリ波帯走査型近接場顕微鏡システムを紹介する。

### 2. 高周波帯走査型近接場顕微鏡

走査型近接場顕微鏡では、回折限界を遥かに越える高い分解能で物体を観測することができる。これは、微小な物体のごく近傍に現れるエバネッセント波を利用しているためである。物体表面に電波が入射すると、その物体の材質および構造を反映して、異なる波数

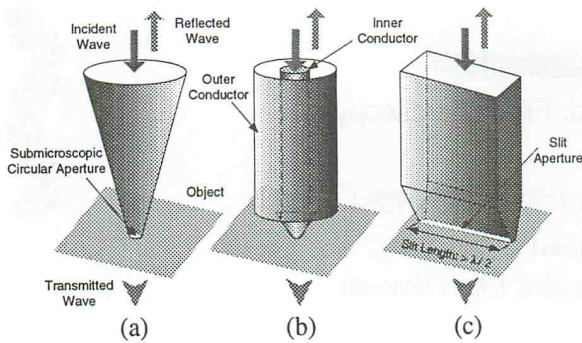


Fig. 1. Near-field probes used in the radio-wave region: circular waveguide probe (a), coaxial probe (b), and slit-type probe (c).

成分を持つ数多くのエバネッセント波が誘起される。エバネッセント波の波数は虚数となるため、この波は非伝搬波として物体表面上に局在する。その存在範囲は、ほぼ微小物体の寸法程度である。走査型近接場顕微鏡では、微小なプローブを対象物体に近づけ、物体上の局在したエバネッセント波を散乱させて伝搬波に変換する。この伝搬波の振幅および位相を、プローブを走査しながら計測することにより、電波の波長以下の微小な分解能で物体を観察することができる。

光領域とは異なり、電波領域では多くの種類の伝送線路が近接場プローブとして利用されている<sup>3)</sup>。さらに電波領域においては、共振構造及びマッチング回路をシステムに組み込むことが容易であるため、極めて感度の良い測定が可能である。電波領域で用いられている代表的な3種類のプローブを Fig. 1 に示す。(a)はテーパ型円形導波管プローブ、(b)は内導体先端を尖らせた同軸線路型プローブ、そして(c)は矩形金属導波管を用いたスリット型プローブである。テーパ型円形導波管プローブは、光領域で主に用いられているファイバプローブ<sup>4)</sup>と等価である。同軸線路型プローブは、マイクロ波帯で動作するプローブとして広く用いられている。スリット型プローブは、ミリ波帯以上の高い周波数領域でプローブ感度を高めるため開発されたもので、同軸線路型プローブと同様に観測波の遮断<sup>5)</sup>が起らないため、高感度の計測が可能である。通常用いられているラスタースキャン法で画像を再構成した場合、(a)では開口直径程度の二次元分解能、(b)では内導体先端部の曲率程度の二次元分解能、そして(c)ではスリット開口の幅程度の分解能を達成可能である。現在までに、Fig. 1(b)の同軸線路型プローブを用いて、周波数1GHzにおいて100nm(波長の約1/10<sup>6</sup>)の二次元分解能が達成されている<sup>6)</sup>。Fig. 1では、プローブ側から波を入射し、反射波あるいは透過波を計測する方式を示したが、先に述べた動作原理

からその逆も可能である。例えば、励振された平面回路上に存在する電磁界分布を、近接場プローブを走査することによって、高分解能で測定することも可能である<sup>7,8)</sup>。

電波領域における走査型近接場顕微鏡の応用としては、誘電体材料、半導体基板、金属材料、超伝導材料等の評価をはじめとして、物体表面の段差の計測<sup>9)</sup>、温度分布の計測<sup>10)</sup>等があげられる。誘電体材料の評価においては、100nmの分解能、 $\Delta\epsilon/\epsilon \sim 6 \times 10^{-4}$ の検出感度での定量的計測がなされている<sup>6)</sup>。物体表面の段差の計測<sup>9)</sup>は、エバネッセント波の強度がプローブもしくは物体からの距離に対して指数関数的に減少する性質を利用したものである。9.6GHzのマイクロ波を用いて、段差分解能55nmが実現可能と推定されている<sup>9)</sup>。温度分布の計測<sup>10)</sup>は、物体の温度によって抵抗値が変化することを利用したものである。電気抵抗材料を観測対象として、1 $\mu\text{m}$ の空間分解能で0.01Kの温度分解能が1GHzの波を用いた実験で示されている<sup>10)</sup>。

### 3. スリット型プローブを用いたミリ波帯走査型近接場顕微鏡

Fig.1(c)に示すように、有限厚さの金属板に開けられた観測波長 $\lambda$ の1/2以上の長さを持つスリット開口は、その幅寸法をいかに小さくしても観測波の遮断がおこらないため、近接場プローブとして用いることにより開口からの透過波強度の増大、感度の向上が期待できる。このスリット開口をプローブとして用いた赤外顕微分光システムが河田ら<sup>11,12)</sup>によって、ミリ波帯ではGolosovskyら<sup>13,14)</sup>によって報告されている。スリット型プローブは高効率のプローブではあるが、通常用いられているラスタースキャン法で画像を取得した場合、スリット長さ方向に対応する分解能が、 $\lambda$ の1/2以上の値になってしまうという欠点を有している。我々は上記報告例とは独立に、スリット型プローブにおいて、X線CT(Computerized Tomography)装置で用いられている走査方法及び画像再構成法<sup>15)</sup>を利用して本欠点を解決することに成功している<sup>16,17)</sup>。以下に我々のシステムの概要を説明する。

Fig.2にスリット型プローブを用いたミリ波帯走査型近接場顕微鏡システム及びプローブの構造を示す。実験は現在、60GHz( $\lambda=5\text{mm}$ )で行っている。本システムにおいては反射モード、透過モードにおける測定を同時に行うことが可能である。矩形金属導波管WR-19(導波路寸法:4.8mm $\times$ 2.4mm)を用いたスリット型プローブとスリット開口からの透過波を受信するためのホーンアンテナは固定で、ともにネットワークアナライザに接続されている。観測対象である物体(Object)は回転ステージ、リニアステージからなる走査装置に固定されている。本走査装置はネットワーク



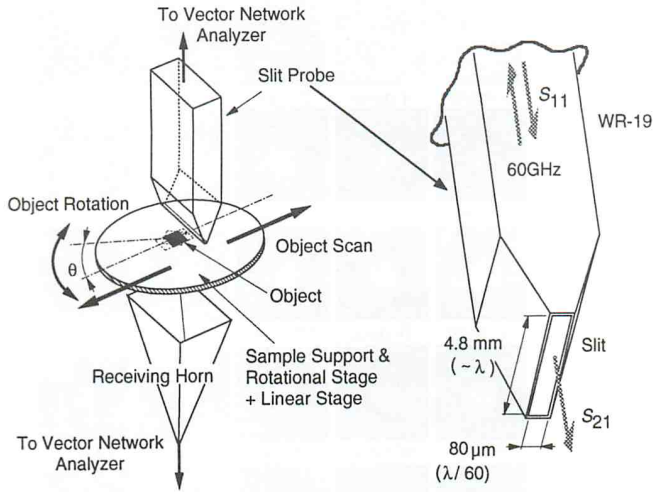


Fig. 2. Experimental setup for scanning near-field millimeter-wave microscopy using a tapered rectangular metallic waveguide probe with a slit aperture.

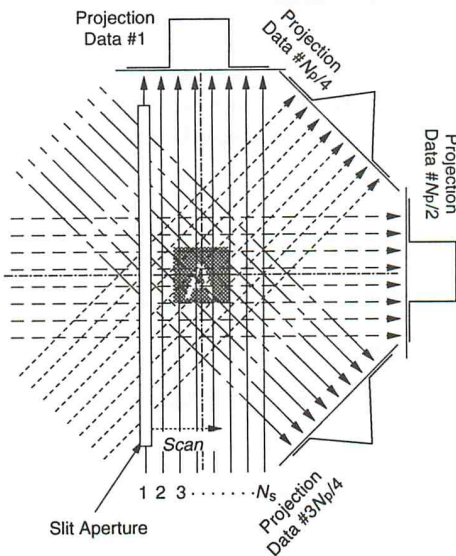


Fig. 3. Scan method used in the experiments. Object to be imaged is scanned linearly for different object-rotation angles.

アナライザーと共にコンピューターにより動作制御が行われている。プローブ構造は、スリットの長さはももとの導波管幅と同じであるが、スリット幅は導波管の高さをテーパ状に小さくし、波長の  $1/60$ 、 $80\mu\text{m}$  となっている。

Fig. 3 に走査方法を示す。実験では物体を様々な角度にし、直線的に走査しながらデータを取得しているが、Fig. 3 は物体 A を固定したと仮定した場合の走査の模式図である。本方法は X 線 CT 装置における平行ビームを用いた場合のデータ取得と同様である。本図に示すように、スリット型プローブは一点の測定で数多くの画素に

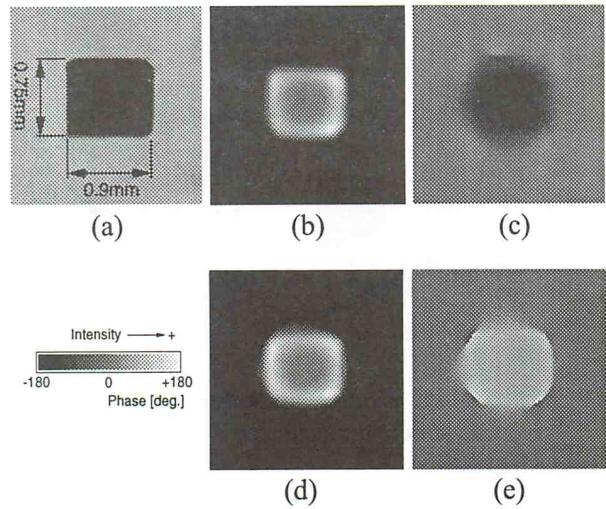


Fig. 4. Reconstructed images of a metal patch: optical image (a), intensity image in reflection mode (b), phase image in reflection mode (c), intensity image in transmission mode (d), and phase image in transmission mode (e).

対応する信号を取得するため、テーパ型円形導波管プローブ及び同軸線路型プローブをラスタースキャンした場合と比較して、より少ない測定点数で視野内の情報の概要を把握するのに適している。反射側信号及びホーンアンテナで検出される透過側信号は、スリット開口近傍の電界をスリットの長さ方向にベクトル積分した値に比例すると考えられるので、Fig. 3 で示した走査により得られる信号を投影データからの画像再構成アルゴリズム<sup>15)</sup>に従って処理することにより、スリット長さ方向の情報を分解して画像再構成を行うことができる。画像再構成法として我々は、X 線 CT で最も一般的に用いられているフィルター補正逆投影法<sup>15)</sup>を主に使用している。本システムから得られる信号は、位相情報を含んだ複素形式のデータである。従って信号処理はすべて複素形式で行われ、再構成画像は強度画像、位相画像の二枚の画像となる。石英基板に蒸着した大きさ  $900\mu\text{m} \times 750\mu\text{m}$  の金属パッチの反射側及び透過側の強度、位相画像を Fig. 4 に示す。プローブと金属パッチ間の距離は  $10\mu\text{m}$  である。反射側、透過側共にほぼ同様の画像が得られていることがわかる。Fig. 4(b)の画像の一次元プロファイルより金属パッチのエッジ部分の線拡がり関数を求め、その半値幅より二次元空間分解能として  $110\mu\text{m}$  が得られている。プローブ・物体間距離を  $2\mu\text{m}$  とすることにより、スリット開口幅とほぼ等しい二次元空間分解能、 $83\mu\text{m}$  が達成される。

スリット型プローブは平行平板伝送路の一種なので、スリット開口部分の電界は直線偏波である。本特徴を利用すると、物体応答の



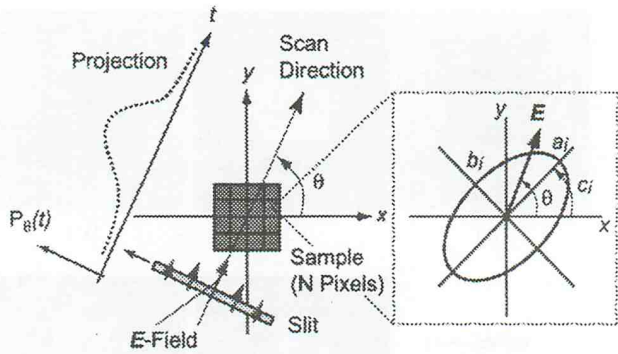


Fig. 5. Model of image reconstruction for scanning near-field anisotropy microscopy.

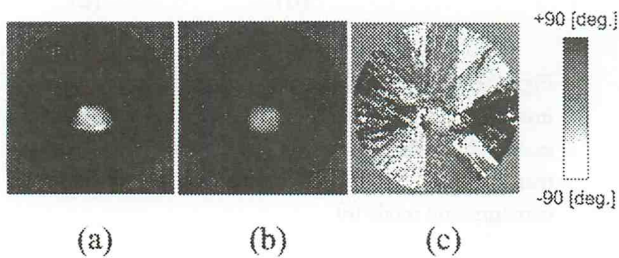


Fig. 6. Reconstructed images of a metal patch: image of maximum response,  $a_i$  (a), minimum response,  $b_i$  (b), and angle between the direction of the maximum response and the x-axis of the coordinate system in Fig. 5,  $\alpha_i$  (c).

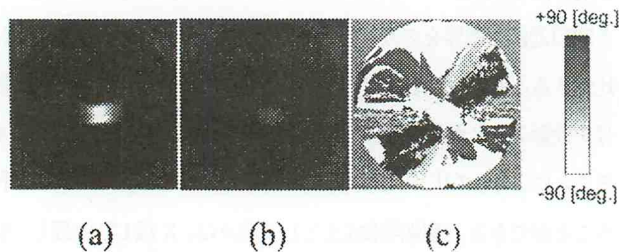


Fig. 7. Reconstructed images of a wiregrid: image of maximum response,  $a_i$  (a), minimum response,  $b_i$  (b), and angle between the direction of the maximum response and the x-axis of the coordinate system in Fig. 5,  $\alpha_i$  (c).

異方性分布を画像化することが可能である。我々の近接場顕微鏡システムでは Fig. 3 に示す走査方法を採用しているため、得られる信号は、物体を  $0 \sim 180^\circ$  の電界方向で観測したときの情報をすべて含んでいることになる。この信号データより、物体の異方性を考慮した画像を再構成するモデルを Fig. 5 に示す。各画素の応答を電界方向異方性に対応した回転楕円と仮定し、応答の最大値、すなわち楕円の長軸 ( $a_i$ )、応答の最小値である楕円の短軸 ( $b_i$ )、そして最大値を与える方向の座標軸に対する傾き ( $\alpha_i$ ) を用いて物体異方性をモデル化している。スリット型プローブからの信号を前記積分により定式化し、逐次近似法の一つであるブロック勾配法<sup>18)</sup>により

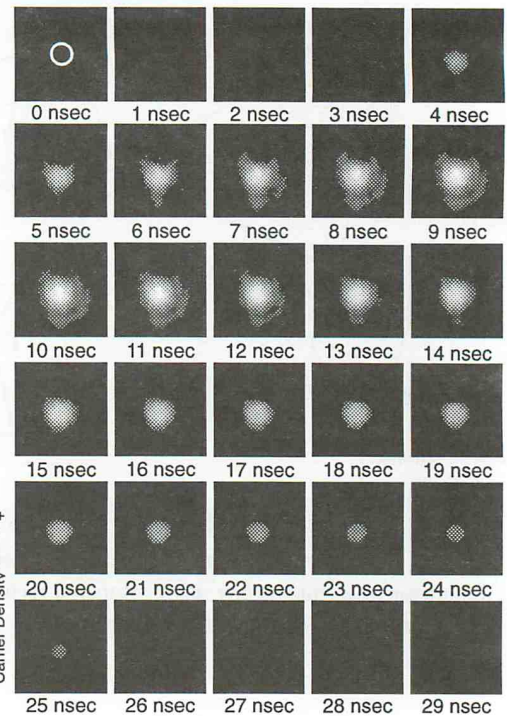


Fig. 8. Temporal evolution of photoexcited free carrier distribution. The time under each image indicates the time after the photo excitation began.

$a_i$ ,  $b_i$ ,  $\alpha_i$  の分布を表す画像を再構成することができる。測定対象として、等方的な応答が予想される前述の石英基板上に蒸着した大きさ  $900\mu\text{m} \times 750\mu\text{m}$  の金属パッチ、そしてきわめて大きな異方性を示すことが予測される石英基板上  $800\mu\text{m} \times 800\mu\text{m}$  の範囲にパターンニングしたピッチ  $10\mu\text{m}$  のワイヤグリッドを用いて実験を行った。結果をそれぞれ Fig. 6, Fig. 7 に示す。視野は共に  $5.1\text{mm} \times 5.1\text{mm}$  である。金属パッチの再構成画像では  $a_i$ ,  $b_i$  の分布を表す画像がほぼ等しい強度になっているのに対し、ワイヤグリッドの再構成画像では画像強度が大幅に異なっていることから、これら再構成画像は物体の異方性を反映したものになっていることがわかる。本手法は、画像再構成モデル、画像再構成法のさらなる改善により、物体表面方向の電界に対する物体応答の異方性の評価を波長以下の分解能で行える有効な手段になり得ると考えている。

マイクロ波、ミリ波の重要な応用として、プラズマ計測<sup>19)</sup>があげられる。ここでは、これらの波は主としてプラズマ中の電子群の情報を抽出するためのプローブ波として用いられている。同様に半導体中自由キャリアの情報を得るためにも、マイクロ波、ミリ波は有効である。すなわち、自由キャリアを“見る”ことができるマイクロ波、ミリ波を走査型近接場顕微鏡のプローブ波に用いれば、回折限界以下の分解能で半導体中の自由キャリアの分布、その挙動を



観察することが可能となる。Drude の自由電子モデルを用いた理論的な検討の結果、シリコン基板内のキャリア密度が  $10^{15}\text{cm}^{-3}$  以上の値であれば、60GHz ミリ波の反射率として有意な変化が検出可能であることが明らかとなったので、我々のミリ波帯近接場顕微鏡システムを用いてシリコン基板に生成した光励起キャリア分布の時間変化の画像化を試みた。結果を Fig. 8 に示す。これは、波長 355nm 半値幅 5nsec のパルスレーザー光をシリコン基板に照射し、生成された光励起キャリアの観測を行った結果である。最初の画像に白線で示した直径 0.5mm の円内に光パルスが照射され、シリコン基板にキャリアを生成している。キャリア発生、拡散、消滅の過程が鮮明に画像化されている。本結果より、ミリ波帯走査型近接場顕微鏡は、電子デバイス内のキャリアの挙動を室温条件下で画像化できる手段としても有効であることがわかる。

#### 4. むすび

高周波帯の走査型近接場顕微鏡を用いると、マイクロ波、ミリ波といった電波領域の技術開拓に重要な平面型回路や平面アンテナ等の基板材料として用いられている半導体基板、誘電体基板等の均一性の評価を波長以下の分解能で行なうことが、また平面型回路に付随する近接場を画像化することにより、予期しない共振現象、動作モード、不要な表面波の原因の特定を行うことが可能である。また、赤外、可視といった光ではできない非破壊、無侵襲の計測を波長よりも十分小さい分解能で行うことができる。さらに、マイクロ波、ミリ波帯各種能動デバイス内のキャリアの挙動を画像化できる可能性も有している。以上のような各種用途において今後、高周波帯走査型近接場顕微鏡が活用されること、電波の特徴、特異性を活かした走査型近接場顕微鏡の新規応用が展開されることを期待したい。

#### 謝辞

本論文に掲載した研究成果の一部は、筑波大学電子・情報工学系工藤博幸助教授との共同研究によるものである。また、掲載した研究成果の一部は科学研究費補助金(基盤研究C)、周波数資源開発公募研究(総務省)、財団法人テレコム先端技術研究支援センター等の助成を受けて得られたものである。あわせて深謝する。

#### 参考文献

- 1) E. A. Ash and G. Nicholls : Nature **237** (1972) 510.
- 2) 大津元一 : 応用物理 **65** (1996) 2.
- 3) 荻戸立夫、斐鐘石、水野皓司 : レーザー研究 **26** (1998) 546.
- 4) M. A. Paesler and P. J. Moyer : Near-field Optics (John Wiley & Sons,

- New York 1996).
- 5) E. L. Buckland, P. J. Moyer and M. A. Paesler : J. Appl. Phys. **73** (1993) 1018.
- 6) C. Gao, T. Wai, F. Duewer, Y. Lu and X. -D. Xiang : Appl. Phys. Lett. **70** (1997) 1872.
- 7) Y. Gao, A. Lauer, Q. Ren and I. Wolff : IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **46** (1998) 1694.
- 8) T. Pfeifer, T. Löffler, H. G. Roskos, H. Kurz, M. Singer and E. M. Biebl : IEEE Trans. Antennas Propagat. **46** (1998) 284.
- 9) C. P. Vlahacos, D. E. Steinhauer, S. K. Dutta, B. J. Feenstra, S. M. Anlage and F. C. Wellstood : Appl. Phys. Lett. **72** (1998) 1778.
- 10) M. Tabib-Azar, R. Ciocan, G. Ponchak and S. R. LeClair : Rev. Sci. Instrum. **70** (1999) 3387.
- 11) S. Kawata, H. Takaoka, and Y. Inoue: Near Field Optics-3, EOS Topical Meeting **8** (1995) 159.
- 12) 河田聡、高岡秀行、古川祐光 : 分光研究 **45** (1996) 93.
- 13) M. Golosovsky and D. Davidov : Appl. Phys. Lett. **68** (1996) 1579.
- 14) M. Golosovsky, A. Galkin and D. Davidov : IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **44** (1996) 1390.
- 15) A. C. Kak and M. Slaney : Principles of Computerized Tomographic Imaging (IEEE Press, New York, 1988).
- 16) J. Bae, T. Okamoto, T. Fujii, K. Mizuno and T. Nozokido : Appl. Phys. Lett. **71** (1997) 3581.
- 17) T. Nozokido, J. Bae and K. Mizuno : IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **49** (2001) 491.
- 18) 工藤博幸、中澤宏昭、斉藤恒雄 : 信学論 **J83-D-II** (2000) 63.
- 19) N. C. Luhmann Jr. : Infrared and Millimeter Waves Vol. 2, ed. by K. J. Button (Academic Press, New York, 1979).

(論文受付 2003 年 2 月 17 日、論文受理 2003 年 3 月 10 日)

#### ■著者紹介■

氏名 荻戸 立夫

所属 東北大学電気通信研究所 (〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1)

1985年東北大学・工・電子卒、1987年同大学院修士課程了。工博。日立製作所、理化学研究所、英国ラザフォード・アップルトン研究所を経て、現在、東北大学電気通信研究所助教授。ミリ波、サブミリ波の発生及び計測システムの研究開発に従事。

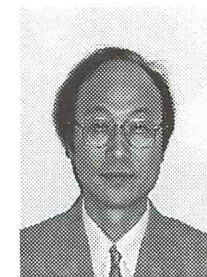
E-mail : nozokido@niec.tohoku.ac.jp



氏名 斐 鐘石

所属 東北大学電気通信研究所 (〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1)

1976年朝鮮大学校・工・電子卒。工博。1983年東北大学助手、以来ミリ波・サブミリ波の発生及び応用の研究に従事。現在東北大学電気通信研究所助教授。



## 特集 (招待論文)

氏名 水野 皓司

所属 東北大学電気通信研究所 (〒980-8577  
宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1)

1963年東北大・工・電子卒。1968年同大学院博士課程了。工博。東北大助手、助教授を経て、1984年教授(電気通信研究所)。1972年ロンドン大客員研究員、1990年カリフォルニア工科大、ロンドン大客員教授。1993年 IEEE フェロー。1990年より1998年まで理化学研究所(フォトダイナミクス研究センター) チームリーダーを兼務。ミリ波、サブミリ波デバイスの研究開発に従事。1984年科学計測振興会賞、1998年 Kenneth J. Button 賞受賞。

