

	のぞきど たつお
氏 名	荻 戸 立 夫
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成11年4月14日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最 終 学 歴	昭和62年3月 東北大学大学院工学研究科電子工学専攻前期課程 修了
学 位 論 文 題 目	スリット型プローブを用いたミリ波帯近接場顕微鏡システム に関する研究
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 水野 皓司 東北大学教授 川上 彰二郎 東北大学教授 宮城 光信

## 論 文 内 容 要 旨

本論文は、スリット型プローブ、X線断層撮影技術で用いられている走査方法及び画像再構成方法とを用いるミリ波帯近接場顕微鏡システムの開発を目的とし、画像再構成原理の実験的検証、諸特性の測定、高機能化のための手法、システムの応用例について述べたものである。本研究では、スリット型プローブを用いた近接場顕微鏡における画像再構成原理の実験的検証に成功し、さらにミリ波の特徴を活かして、室温条件下における半導体中キャリア分布の画像化にも成功した。本論文はこれら研究結果をまとめたものであり、全文5章より構成されている。以下に各章の内容を述べる。

第1章、緒論では、本研究の背景、近接場顕微鏡の原理、近接場顕微鏡で用いられている各種プローブの比較、本システムの概要及び特長について述べている。通常の光学系を用いた顕微鏡システムでは、回折現象により、その分解能は観測波長の2分の1程度に制限される。近接場顕微鏡においては、この限界を超える分解能を達成することが可能である。光領域においては、1990年代に入って、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研究開発が活発に行われている。従来の近接場顕微鏡においては、観測波長以下の直径を有する点開口型のプローブが用いられている。本プローブは、その構造上、必然的に遮断現象の影響を受けるため、感度が小さいという問題が指摘されていた。本研究で対象とするスリット型プローブは、観測波長以下の幅と観測波長程度の長さを有するスリット状の開口を用いるため、遮断現象の影響を受けることなく、極めて高感度の測定を行なうことが可能であるという特長を有している。しかしながら、通常の走査方法を用いて画像再構成を行なうと、スリット開口の長さ方向に対応する画像分解能が観測波長程度になってしまうという問題が指摘されていた。本問題点を解決し、すべての方向に対してスリット開口の幅程度の分解能を達成するために、本研究ではX線断層撮影技術で用いられている走査方法及び画像再構成方法とを用いる新型の近接場顕微鏡システムを提案し、画像再構成原理の実験的検証を、実験が容易な波長5 mm、周波数60 GHzのミリ波帯電磁波を用いて行なった。図1に本近接場顕微鏡システムの概要を示す。スリット開口を画像化すべき物体すなわちイメージング対象と近接させ、走査方法としては、通常用いられているラスタ走査法ではなく図中に示すような直線走査と回転走査を組み合

わせる方法を用いる。すなわち、物体を直線的に走査しながらデータを取得、物体を回転した後、再度物体を直線的に走査しながらデータを取得するという操作を繰り返す。これら一連の走査で得られる信号を、X線断層撮影技術で最も広く用いられている画像再構成法であるフィルター補正逆投影法により処理することによって画像を得るというものである。

第2章、基本原理と構成要素では、まず、本ミリ波帯近接場顕微鏡システムにおける画像再構成のための基本原理を示した。本画像再構成原理に基づくシステムの設計、製作、測定条件の決定、信号処理方法、信号検出方式に関する考察を行ない、本原理の実験的検証に成功した。本実験の過程で得られた主要な成果を以下に箇条書きにて示す。1) スリット型プローブの理論解析、反射特性の測定を行い、スリット開口からの電力透過係数が点開口型プローブにおける値よりも5桁以上大きいことを明らかにした。2) 分解能はプローブとイメージング対象間の距離に大きく依存すること、達成可能な最高分解能はスリット幅により制限されることを明らかにした。

第3章、プローブ構造及び画像再構成方法の改善では、本システムの高機能化に関する検討を行なった。高分解能化を目指したプローブ構造の改善、スリット型プローブの感度分布の影響を考慮した画像再構成方法の改善について示した。プローブ構造の改善においては、シリコンチップを挿入する新型プローブを提案し、本プローブを用いてスリット開口幅以下の分解能を達成することに成功した。本結果はスリット型プローブを用いる近接場顕微鏡システムにおいて、表皮効果による制限を超える分解能を達成するための一つの指針を与えるものである。画像再構成方法の改善では、スリット型プローブの感度分布の測定結果を示し、本感度分布が再構成画像に及ぼす影響をシミュレーションにより明らかにした。さらに本感度分布を補正するための画像再構成方法である共役勾配法について詳述し、実験で得られた投影データに共役勾配法を適用することにより、感度分布の補正に成功した。以下に得られた成果を箇条書きにて示す。1) スリット型プローブの感度分布は、矩形金属導波管における基本モード、 $TE_{10}$ モードの電界強度分布の二乗で近似できることを実験的に示した。2) 上記感度分布が存在する場合、フィルター補正逆投影法を用いると、本来再構成すべき強度画像と比較して低空間周波数成分が劣化した強度画像が得られることをシミュレーションにより明らかにした。3) 実験で得られた投影データに共役勾配法を適用することにより、再構成画像上の均一度が向上すること、異なる電磁波特性を有する物体間の画像コントラストが明確になること、よりイメージング対象の構造を反映した画像が得られることを確認した。4) 感度分布が補正された再構成画像を数値解析することにより、画像強度が、プローブからイメージング対象を伝搬波で見たときの表面反射率を反映する値となっていることを導波管等価回路を用いた理論計算により明らかにした。

第4章、半導体中キャリア分布の画像化では、ミリ波帯近接場顕微鏡の新規応用として行った半導体中キャリア分布の画像化に関する実験結果を示した。測定対象としては、キャリア密度及び分布の制御が容易な光励起キャリアを選択した。シリコン基板に生成した光励起キャリアの画像化、光照射とミリ波による観察を同時に行うことのできる新型スリット・プローブを用いた半導体欠陥分布の画像化、そして光励起キャリア分布の時間変化の画像化について示した。シリコン基板に生成した光励起キャリアの画像化においては、定常状態におけるキャリア分布を画像化することに成功した。光照射とミリ波による観察を同時に行うことのできる新型スリット・プローブを用いた半導体欠陥分布の画像化では、アルゴンイオン打ち込みによって形成された欠陥領域を画像化することに成功した。本プローブは、基板厚さ、励起光波長の制約を受けずに、基板表面の欠陥分布を画像化できるという特長を有している。光励起キャリア分布の時間変化の画像化に関しては、応答速度0.4 nsecの高速ホモダイン検出装置を製作し、本装置により時間分解1 nsecでキャリア発生、消滅、拡散といっ

た、キャリア分布の過渡的な変化を画像化することに成功した。キャリア分布の時間変化の画像例を図2に示す。視野は2 mm × 2 mm、波長 355 nm、半値幅 5 nsec のパルスレーザー光を 0.5 mm のスポット径で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。半導体中キャリア分布の画像化にミリ波帯近接場顕微鏡を用いることの特長は、半導体の種類による制限を受けないこと、そして室温条件での観察が可能ながことが挙げられる。本研究では光励起キャリアを測定対象としたが、他の一般的な電子デバイスにおけるキャリア分布の画像化も可能であると考えられる。

第5章は結論である。

本論文は、ミリ波帯で動作する近接場顕微鏡システムに関する研究成果をまとめたものである。本研究で用いたスリット型プローブの最大の特長は、高感度測定が可能なことである。この特長を活かせば、ミリ波帯だけではなく、サブミリ波帯、赤外領域、可視光領域といったより波長の短い電磁波領域においても、物性評価、超高密度光ストレージといった応用への適用が期待できると考えられる。本論文の研究成果は、スリット型プローブを用いる画像化システムすべての基礎となり得るものである。

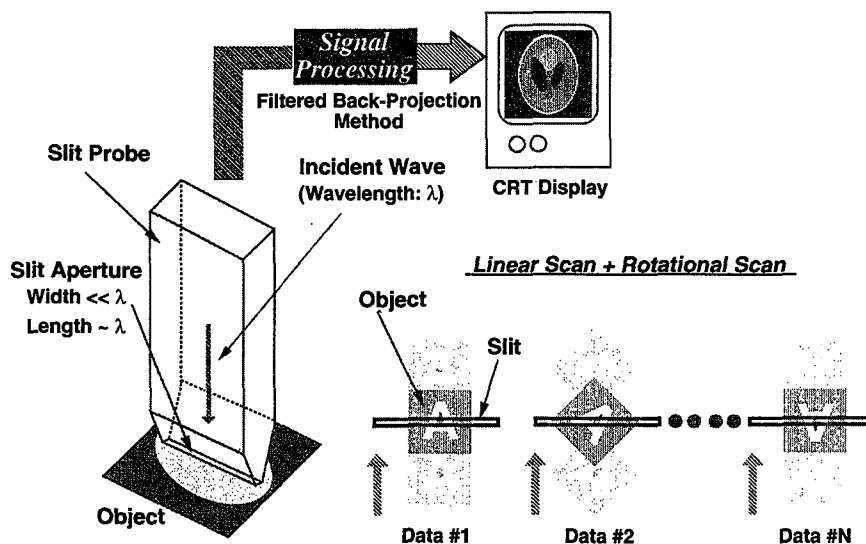


図1 スリット型プローブを用いた新型近接場顕微鏡システムの概要図

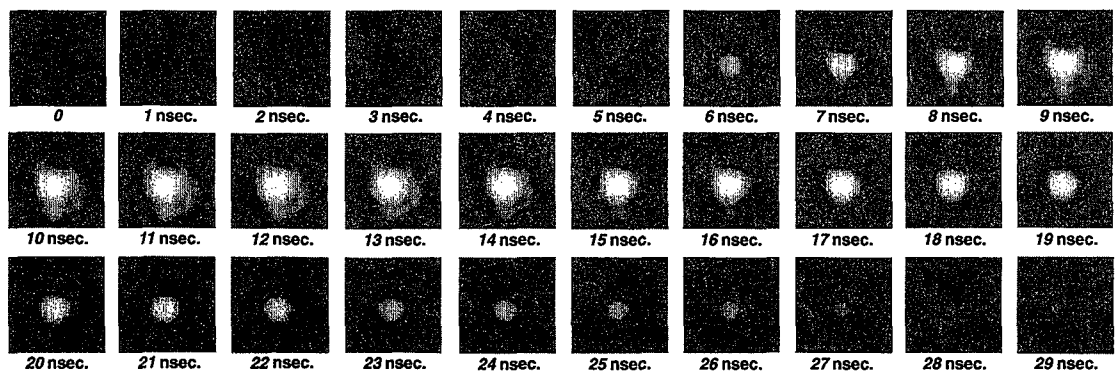


図2 光励起キャリア分布の時間変化

## 審査結果の要旨

近接場顕微鏡は、観測波長以下の分解能を持つイメージング装置として注目されており、主として可視光領域で活発な研究開発が行われている。一方ミリ波は、その固有の伝搬特性より各種の計測に対して非常に有用な性質を有している。本論文は、ミリ波領域の近接場顕微鏡システムの開発を目的とし、信号強度の点で優れた新型プローブの提案、走査時間短縮のための画像再構成法および高分解能化のための手法等の開発、更に開発したシステムの応用について纏めたもので、全文5章よりなる。

第1章は、序論である。本研究の背景を述べるとともに、スリット状の新型プローブを提案している。

第2章では、スリット型プローブを用いる本近接場顕微鏡に対し画像再構成のための基本原理を示している。新型プローブからの電力透過係数が、従来の点開口型プローブによるものよりも5桁以上大きいことを明らかにし、また到達可能な分解能がスリット幅により決定されることを実験的に検証している。更に画像再構成法として、スリット型プローブを用いて2次元の画像を得るために、フィルタ補正逆投影法が有効であること、信号の位相情報が必要であることなどを明らかにしている。これらは、本顕微鏡の実現上重要な成果である。

第3章では、本顕微鏡システムのプローブ構造および画像再構成法について考察を加えている。プローブ構造に関しては、スリット先端部にくさび状の高抵抗シリコンチップを挿入することによりスリット開口幅以下の分解能を達成し得ることを示している。画像再構成法に関しては、共役勾配法を適用することにより、スリットの長さ方向の感度分布を補正することに成功している。これらは、本システムの実用化に対して極めて有用な知見を与えるものである。

第4章では、本顕微鏡システムの応用について述べている。測定対象としてシリコン基板に生成した光励起キャリアを選び、周波数 60 GHz (波長 5 mm) のミリ波を用いて、約  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  の密度のフォトキャリアの観測に成功している。この時、約 50  $\mu\text{m}$  の空間分解能を得ている。更に、本システムに応答速度 0.4 ns の高速ホモダイン検出装置を組み込むことにより、光励起キャリア分布の時間変化を、時間分解 1 ns での画像化に成功している。これは、本システムの優れた実用性を示す成果である。

第5章は、結論である。

以上要するに本論文は、ミリ波領域の近接場顕微鏡システムの開発を目指し、新型プローブの提案およびそのための画像再構成法の開発を通して、信号雑音比および走査時間の点などで従来のものより格段に優れたシステムの開発に成功した成果を取りまとめたもので、電子工学および計測工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。