

近接場光検出システムの構築と微細構造評価技術に関する研究

岡 山 透

要 旨

21世紀を迎えて、日本の社会・経済は大きな転換期に直面している。我が国の経済動向を俯瞰すると、経済のグローバル化と激化する国際的な競争の中で、産業競争力の低下及び雇用創出力の停滞等の課題が山積している。これらの問題に対処していくため、新しい21世紀型の基盤技術体系及び製造技術体系の構築を通して、産業競争力を強化し、経済社会の発展の礎を着実に築いていくことが不可欠である。

日本の産業強化のための主要技術の一つに、光テクノロジーがある。我が国は、産業技術政策の重点4分野として情報通信、材料・ナノテクノロジー、環境・エネルギー、ライフサイエンスをあげている。平成13年度の総合雇用対策においても、雇用の受け皿整備としての産業競争力強化策の一つとして、これら4分野に重点的に投資を行うこととしている。

光テクノロジーは、測定、加工及び観察と極めて多方面に応用されるようになった。通信をはじめとする情報伝達手段やCDやDVDに代表する記録媒体など、今や我々のあらゆる生活に浸透している。基礎技術から応用に至るまで広範囲な分野で成長を遂げており、今後、光テクノロジーの重要性は一層高まっていくものと期待される。21世紀は光技術なくしては語れない時代であり、いずれの分野にも光の技術が重要な役割を果たす。これは誰しも異論の無いところである。

一方、ナノテクノロジーもまた、あらゆる分野に飛躍的な革新をもたらすものと期待されている。重点4分野の一つとして位置づけているように、我が国においてはナノテクノロジーに対する取組は、従前より非常に裾野広くなされてきた。米国はじめ主要諸外国における戦略的取組も旺盛化してきており、今後この分野における技術革新競争はますます激化することが見込まれる。そうした状況の中、日本は光テクノロジーとナノテクノロジー分野に国際的に優位性があると言われている。近年、この光テクノロジーとナノテクノロジーの2つの技術を融合した光ナノテクノロジーへの期待と役割が益々高まりつつある。

昨今のユビキタスやマルチメディア化の進展の中、大容量高速通信に係わる光デバイス、高密度記憶のための素子や集積回路素子の半導体の微細加工等において、これまでは、光源の波長を短くすることで、高速化、高密度化を進めてきた。しかし、光源の短波長化は従来技術の延長であり、その光学系は自由空間を伝搬する光を取り扱っているため、光の本質である回折の問題に突きあたっている。技術的、理論的な限界である「回折限界」により、光の波長より小さな領域の局所的分析を行うことは困難である。従って、可視光近辺の波長の光を用いた測定や加工は、これまでの光学系を用いる限り分解能の点ではほぼ限界に達している。この従来の光技術の問題を解決しなければ光ナノテクノロジーの領域に足を踏み入れることは不可能である。

そこで、光の本質である回折限界を打破するにはどうすればよいのか？ その答えの一つが「近接

学位記番号と学位：第27号，博士（工学）

授与年月日：平成17年3月19日

授与時の所属：大学院工学研究科電気電子工学専攻博士後期課程

場光」である。つまり、光をもって空間を伝搬しない局在した光を発生することができれば、光の回折の性質から逃れられる。その結果、極めて高分解能な光学測定を行うことができる。

本研究は、光の特異性の一つである物質面に局在する光を利用することで、この回折限界をこえた高い空間分解能の光学測定装置を構築し、その可能性を探求するものである。特異光として局在する電磁波である近接場光やエバネッセント波を検出する新規な光学測定システムを開発した。また、近接場における物理検出に直接に作用し装置の分解能を決定するプローブの先鋭化技術に着目し、光ファイバプローブ作製装置を構築し、プローブの作製要件を確立した。

本論文は、超微細な開口プローブ先端での局所的な電場増強効果を利用した近接場光検出システム及び光ファイバプローブ作製装置を構築するとともに、各種測定及び実験を行った結果をまとめたものである。本論文は、8章より構成されている。各章の概要は以下のとおりである。

第1章 本研究の背景、目的、及び本研究の意義について述べ、また、論文構成について各章の概略を述べている。

第2章 特異な光として物質表面上の局在する電磁波である近接場光やエバネッセント波、あるいは表面プラズモン等がある。これらを利用することで回折限界を打破する光学測定が可能となることから、それぞれの現象について述べる。

第3章 近接場光顕微鏡は光の波長よりも小さい直径の粒子に光を当てた場合、その粒子の周辺に局在する特殊な光である近接場光を散乱させ、その一部を光検出器で観測するとともに、試料表面上を走査することによって試料の表面情報を画像化する顕微鏡である。開発するに至った経緯を述べるとともに、動作原理、測定方法及び各要素技術を説明する。

第4章 近接場光顕微鏡に用いる先鋭化したプローブは、装置の分解能や信号検出感度に極めて大きな影響を与える。そこで、光ファイバプローブの作製装置を構築し、化学エッチング法により溶液温度、エッチング時間、エッチング長さを制御することでコア先端の直径、頂角及びクラッド直径を任意の大きさで、しかも相対標準偏差が1%以下で作製することを可能とした。また、プローブ端面のニアフィールドパターンをガウスビームと比較することによって、先鋭化したコア先端の直径の大きさを特定できた。

第5章 近接場光検出システムを構築し、集光モード、照射-集光モードでの測定、及びSPR現象の測定を可能とした。また、100 nmの開口をもつ光ファイバプローブを作製し、近接場領域でエバネッセント波の検出を確認するとともに、その機能及び仕様について記述している。

第6章 近接場光顕微鏡用の光ファイバプローブを利用して、表面プラズモン共鳴 (SPR) センサを作製した。試作した無開口型光プローブを屈折液及びポリエチレングルコースの溶液中に挿入して反射される電磁波の検出した結果、屈折率差 $\Delta n = 0.015$ の検出に成功した。

第7章 近接場光検出システムで乳酸菌、バクテリア等の生体試料の測定、観察を行うとともに、原子間力顕微鏡及び電子顕微鏡にても観察し、構造学的評価した。また、液晶セルの近接場での偏光状態の観察し、本システムは微視的評価の優位性を検証している。

最終第8章 本研究で得られた成果を総括し、本論文の結論を示した上で、近接場光学顕微鏡の将来展望について述べる。

主指導教員 関 秀廣

Construction of Near Field Light Detection System and Study on Micro Structural Evaluation Technology

Tooru OKAYAMA

Abstract

Today, at the turn of the 21st century, both Japanese society and economy are at a critical turning point. Amid the ongoing globalization of economies and increasingly intense international competition, Japan faces numerous grave predicaments. As evidenced by surveys on economic trends, the real challenge for Japan is to address the deterioration of industrial competitiveness and the stagnation of job creation. In order to address these problems, it is essential to construct a new 21st-type basic-technology and manufacturing-technology systems. These efforts to construct these systems will yield the reinforcement of industrial competitiveness and the steady foundation of the development of an economic society.

Optical technology is one of the key technologies that can strengthen Japanese industries. As a part of the industrial technology policies, Japan prioritizes the following four fields: information and communication, materials and nanotechnology, environment and energy, and life science. The comprehensive employment measures declared in Fiscal 2001 largely focus on investing selectively in the abovementioned four fields as one of the measures toward reinforcing industrial competitiveness for promoting employment.

Photonics technology has been applied to a considerable number of fields including measurement, manufacture, and observation. Currently, photonic technology penetrates every aspect of life, including means of information transmission beginning with telecommunication and recording media typified by CDs and DVDs. Since the use of photonic technology has been growing in a gamut of fields ranging from basic technologies to applications, it is expected that its importance will increase further in the future. In the 21st century, the use of photonics technology will be essential and play a key role in every field. None will counter this prediction.

Simultaneously, nanotechnology is expected to facilitate striking innovations in every field. In Japan, as evidenced by the fact that it was chosen as one of the four priority fields, efforts to develop nanotechnology have been deployed in extremely broad ranges since its earliest stages. Moreover, in major foreign countries, including the United States, strategic efforts to develop nanotechnology have gradually accelerated. Therefore, competition in technical innovations in this field is hereafter expected to be fiercer than ever. Under these circumstances, it is alleged that in the fields of photonics technology and nanotechnology, Japan possesses an advantage over the other countries across the world. Recently, there have been

high expectations of the functions of nano-photonics technology, a new field resulting from a fusion of photonics technology and nanotechnology.

In accordance with the recent development of ubiquitous computing and multimedia, speed enhancement and density growth have been advanced by decreasing the wavelength of a light source. This technical method is applied to the micromachining of semiconductors for fabricating optical devices used for large-capacity, high-speed communication; high-density memory; and integrated circuit elements. However, the shortening of the wavelength of a light source is a direct extension of conventional technologies wherein the optical system deals with light propagating in free space. Accordingly, it encounters the difficulty of diffraction effects, which are the essential characteristics of light. Since a “diffraction limit” exists as a technological and theoretical limitation, it is difficult to perform a microanalysis of a region that is smaller than the wavelength of light. Consequently, as long as conventional optical systems are used, measurement and fabrication using light with a wavelength close to that of visible light almost reaches the limitation of resolution. It is impossible to delve into nano-photonics technology until the technical problems with existing optical technologies are resolved.

Given this difficulty, the question arises regarding the manner in which a breakthrough can be achieved with regard to the “diffraction limit” essential to light. One of the solutions is “near-field light.” In fact, if localized light not propagating in free space can be produced, it is possible to avoid the difficulties arising from the diffraction effects of light. Consequently, we can conduct extremely high-resolution optical measurements.

The purpose of this study is to fabricate an optical measurement device with a high spatial resolution beyond the diffraction limits using light localized in the proximity of a material surface, one of the peculiarities of light. Further, another purpose is to explore the possibility of nano-photonics technology. We developed a novel optical measurement system to detect near-field light and evanescent waves, which are electromagnetic waves localized as a peculiar light. Further, we focused our attention on technologies for the acumination of probes, which directly enables physical detection in near fields and determines the resolution of the system. Employing these technologies, we fabricated an optical-fiber fabrication device and established the fabrication requirements. This paper describes the results of various types of measurements and experiments conducted while developing a near-field light detection system, utilizing a local electric-field enhancement effect at the tip of an ultra-fine aperture probe and an optical-fiber probe fabrication system. This paper contains eight chapters. The outlines of these chapters are as follows:

Chapter 1: This chapter introduces the background, purpose, and significance of this study and presents a brief overview of each chapter.

Chapter 2: Near-field light and evanescent wave are the characteristic light form of electromagnetic waves suspended locally over a material surface. The surface plasmon also exists locally on a material surface. By controlling the surface plasmon, we can conduct accurate optical measurements up to a resolution beyond the diffraction limit. The physical

properties of near-field light, evanescent wave, and surface plasmon are described in this chapter.

Chapter 3: When micro-particles are illuminated by light whose wavelength is considerably greater than the size of the particles, the peculiar near-field light, suspended locally in close proximity to the particles, is scattered. Near-field optical microscope (NSOM) is a microscope that detects a part of the scattered near-field light with a photodetector and creates images with the surface information obtained by scanning the surface of a specimen. This chapter explains the operational principle, measuring method, and elemental technologies of NSOM, in addition to describing the details leading up to the development.

Chapter 4: The sharpened probe that is used for NSOM exerts an extremely large influence on the resolution of the device and the signal-detection sensitivity. Therefore, we constructed an optical-fiber probe fabrication system. The system enables the fabrication of probes of any desired core-tip diameter size, apex angle, and clad diameter. Further, the relative standard deviation is less than 1%. The performance capabilities can be achieved by controlling the solution temperature, etching time, and etching length of the probe when the chemical etching method is applied. By comparing a near-field pattern at the edge of a probe with that of a Gauss beam, we could determine the size of the sharpened core tips.

Chapter 5: We constructed a near-field light detection system, by which we could conduct measurements in the condensing mode and the illumination-condensing mode and those of the SPR phenomena. In addition, we produced optical fiber probes with an aperture of 100 nm, by which we could confirm the detection of evanescent waves at the near-field region. The fabrication method, functions, and speculation of the optical fiber probes are presented in this chapter.

Chapter 6: Using optical fiber probes used for NSOM, we produced a surface plasmon resonance (SPR) sensor. When the fabricated aperture-less type optical probe was immersed in a solution of refraction liquid and polyethylene glucose, reflected electromagnetic waves were detected. As a result, we succeeded in measuring the refraction index difference, $Dn = 0.015$.

Chapter 7: We carried out the measurement and observation of biomaterials including lactic acid bacteria and other bacteria with the near-field detection system. Moreover, we observed these biomaterials using an atomic force microscope (AFM) and an electron microscope and conducted a structural estimation. We observed the polarization state of liquid crystal cells at the near-field region and verified the superiority of this system in microscopic evaluation.

Chapter 8: This chapter summarizes the results obtained by this system and describes the conclusion followed by the presentation of a vision for NSOM.

Professor (Chairperson) Hidehiro SEKI