

平成22年 4月 16日現在

研究種目：基盤研究 (S)  
研究期間：2007～2011  
課題番号：19101004  
研究課題名 (和文) 低加速ナノプローブで電子励起したナノ構造からの放射光角度分解分光観測  
研究課題名 (英文) Angle-resolved spectroscopic observation using light from nano-structures excited by low-energy electron probe  
研究代表者  
高柳 邦夫 (TAKAYANAGI KUNIO)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：80016162

研究代表者の専門分野：表面物理、ナノ構造  
科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・ナノ構造科学  
キーワード：収差補正、電子顕微鏡、ナノプローブ、ルミネッセンス、表面プラズモン

### 1. 研究計画の概要

- (1) 本研究では、サブ-ナノメートルに絞られた電子ビームでナノ構造物質を励起し、局所領域から放射される光を同時観測する STEM-CL 装置の開発を行う。
- (2) ナノ領域からの発光現象、表面プラズモンと光との変換過程などについて、エネルギーと運動量の関係 (分散関係) を明らかにして、ナノ構造物質 (半導体、金属、ハイブリッド) での電子-光現象を研究する。

### 2. 研究の進捗状況

- (1) 収差補正走査型透過電子顕微鏡 (Aberration Corrected STEM: AC-STEM) を使ったナノプローブの形成  
電界放射型電子銃 (FEG) を搭載した透過型電子顕微鏡 (JEM2100F) を使用できることとなり、これを主要装置として光検出のための改造を行った。この装置に本研究室で以前から開発してきた収差補正装置を組み込んだ。試料周囲に広い作業空間を作るために、ギャップ幅 9mm のポールピースに変え試料ステージの改造を行った。この改造により、高さ 8mm の放物面ミラーをポールピースギャップ内に挿入可能になった。加速電圧 200kV で STEM 像では 2Å の分解能、SEM と BSI 像では 1nm 以下の分解能を実現した。これは FEG と収差補正装置の併用により達成できた成果であり、9mm のワイドギャップポールピースで 2Å の空間分解能は世界でも最高レベルにある。
- (2) 電子励起された出射光を高効率で検出し、かつ、光の角度分解測定が可能な分光システム、角度分解 CL (Angle-Resolved

### CL:AR-CL) の新規開発

角度分解-CL システムは、大型の放物面ミラーを試料位置に置き、ナノ電子プローブで励起された場所から出射する光をミラーで反射させ、平行光束にしたあと、強度計測や分光を行う。角度分解は、CCD 検出器の前に小さな孔のマスクを置き位置制御して行う方式を採用し、良好に機能することを確認した。

### (3) 新規 CL システムの応用

- ① 表面ステップや 1D プラズモニック結晶を伝播する表面プラズモンポラリトン (SPP) の分散関係、およびバンド端のエネルギーの SPP-光変換の過程の研究
- ② 半導体ナノワイヤーの量子効果 (InP, GaAs) や発光の偏光特性 (ZnO) の研究
- ③ 金属微粒子によるカソードルミネッセンス増強効果の研究  
において一定の成果を得た。

### 3. 現在までの達成度

- ① 当初の計画以上に進展している。  
(理由)

本研究の目的であるサブ-ナノメートルに絞られた電子ビームでナノ構造物質を励起し、局所領域から放射される光を同時観測する STEM-CL 装置の開発はほぼ完了し、目標とした性能を十分に実現することができた。さらに、エネルギーと運動量の関係 (分散関係) を調べるための角度分解 CL 装置も完成し、表面プラズモンポラリトンの分散関係の測定に成功している。今後は、さらに広くナノ領域からの発光現象についてこの装置を適用していく。

#### 4. 今後の研究の推進方策

##### (1)金属クラスターの研究

直径10nm以下の金属クラスターの発光から局在表面プラズモン(LSP)や量子効果の影響を明らかにする。

##### (2)SPPのCavityモードの研究

プラズモニック結晶中のCavityに対して構造とSPモードの特性との関係を明らかにする。

##### (3)ナノ構造によるSmith-Purcell放射、チェレンコフ放射の研究

角度分解測定から特異な分散関係を明らかにする。

#### 5. 代表的な研究成果

(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5件)

①H. Sawada, Y. Tanishiro, N. Ohashi, T. Tomita, F. Hosokawa, T. Kaneyama, Y. Kondo, and K. Takayanagi: STEM imaging of 47-pm-separated atomic columns by a spherical aberration -corrected electron microscope with a 300-kV cold field emission gun; J. Electron. Microsc., 58: 357 - 361 (2009). 査読有

②T. Suzuki and N. Yamamoto, Cathodoluminescent Spectroscopic Imaging of Surface Plasmon Polaritons in a 1-Dimensional Plasmonic Crystal, Opt. Express, 17, No.26, 23664-23671 (2009). 査読有

③H. Sawada, T. Sannomiya, F. Hosokawa, T. Nakamichi, T. Kaneyama, T. Tomita, Y. Kondo, T. Tanaka, Y. Oshima, Y. Tanishiro and K. Takayanagi: Measurement Method of Aberration from Ronchigram by Autocorrelation Function; Ultramicroscopy 108, 1467-1475 (2008). 査読有

④山本直紀、鈴木喬博、竹内健悟、TEM-CL法による表面プラズモンの研究 顕微鏡 44, No.4, 268-274 (2009). 査読有

⑤ N. Yamamoto and Takahiro Suzuki, Conversion of Surface Plasmon Polaritons to Light by a Surface Step, Appl. Phys. Lett. 93,

093114-3(1-3) (2008). 査読有

[学会発表] (計3件)

①山本直紀: 透過電子顕微鏡による表面プラズモンポラリトン発光の顕微分光; 応用物理学会学術講演会, 2010年3月17日-20日, 東海大学

② K. Takayanagi: 50pm resolution electron microscope, performance and application; Workshop on Advanced Application of Aberration Correction TEM (National Synchrotron Radiation Research Center, Hsinchu, Taiwan, November 22-24, 2009).

③N. Yamamoto, "Light Emission of Surface Plasmon Excited by Fast Electrons" (invited) CLEO/Europe-EQEC 2009, 14-19 June 2009, Munich (Germany).

[図書] (計1件)

N. Yamamoto, K. Ishikawa, K. Akiba, S. Bhunia, K. Tateno and Y. Watanabe, TEM-Cathodoluminescence study of semiconductor quantum dots and quantum wires, "Beam Injection Based Nanocharacterization of Advanced Materials", ed. G. Salvati, T. Sekiguchi, S. Heun and A. Gustafsson, Research Signpost (2008 Kerala India). p.37-59