

スピナルス TEM の開発とそのコヒーレンス

桑原真人
名古屋大学 未来材料・システム研

Development of spin-polarized pulse-TEM and the spatial and temporal coherences

Makoto Kuwahara
Institute of Materials and Systems for Sustainability, Nagoya University

我々は、透過電子顕微鏡にレーザー駆動型電子源を搭載することにより、電子線のスピンの時間と同時に制御した新しい顕微法の開発に成功した^[1]。電子源には新方式の TEM 用半導体フォトカソード電子銃を用いており、電子線のスピン偏極度 92%、パルス幅は数ピコ秒の実現により透過電子顕微鏡で初めてサブピコ秒時間分解測定を可能とした。これにより、局所状態を時間軸で捉え、静的性質のみならず動的性質を明らかにすることで、過渡現象の解明やエネルギー緩和過程の同定が可能となっている^[2]。さらに、高い電荷量を持ったパルス電子線発生を実現することでシングルショットイメージングを実現し、それに伴う空間電荷効果や Boersch 効果が顕著に発現する領域での動作に挑んでいる^[4]。

一方、その放出機構の特性からエネルギー分散幅が 0.12eV 程度の狭線幅を有していることを確認し、時間コヒーレンス長 34fs を実現していることを明らかにした。これによりエネルギー損失分光において高いエネルギー分解能を実現でき、詳細な組成分析や小さなエネルギー分裂を検出することが可能となる。また色収差の低減による分解能の向上、高輝度かつ極単色電子線を効率よく利用できることを示唆する結果である。次に、カソード放出面上でのエミッタンス(初期エミッタンス)についても実測を行い、 3×10^{-9} m rad と非常に小さいことを証明した(図 1)。これより、横方向運動量広がり 2 mrad 程度であり、電子が高い平行性を持って半導体フォトカソード表面から放出されることが、TEM を用いた精密な測定により実証された。ここで、エミッタンスとは位置と運動量で張られる位相空間における面積であり、z 軸方向に電子線の進行方向を規定すると、広がり半角 $\langle a_x \rangle = \langle p_x \rangle / g m_e c$ とその位置におけるビームサイズ $\langle x \rangle$ を用いて $e_x = \rho \langle a_x \rangle \langle r_x \rangle$ と記述される。ここで p_x, γ, m_e, c はそれぞれ、x 軸の運動量、ローレンツ因子、電子の静止質量、光速である。エミッタンスと輝度の関係は

$$B = \frac{I}{\rho \langle a_x \rangle \langle a_y \rangle \times \rho \langle r_x \rangle \langle r_y \rangle} = \frac{I}{e_x \times e_y} = (g^2 - 1) B_n$$

という形を取る。 B, B_n はそれぞれ、輝度、規格化輝度である。 B_n はエネルギーが変化しても保存量として取り扱える。いま軸対称な電子線を考えるとエミッタンスは電流と輝度から $e_x = e_y = \sqrt{I/B}$ と見積もることができる。さらに輝度保存を用いると、初期エミッタンスは $e_{ix} = e_{iy} = \sqrt{I_s/B}$ と算出可能となる。エミッタンスは絞りなど電子線を遮るものが無い限り、リュービルの定理から保存される量であり、ビームを広げることで平行性を上げる操作を定量的に議論できる量である。この物理量の利用は、これまで仮想光源サイズという概念から脱却し、フォトカソードのような点光源では無いが干渉性を持つ新規な電子源にも取り扱いが可能となる。

さらに、スピン偏極度 82% において 3.8×10^7 A/cm²·sr @30keV の輝度であることを実測した。これは電子エネルギー 200keV に換算すると 3.1×10^8 A/cm²·sr であり、ショットキー電子源に匹敵する値である。また、電子線バイブリズムにより生成した干渉縞から、その一次相関関数を計測することで試料面上にて 170nm 以上の可干渉長を有していること、その平行度は $(1.76 \pm 0.3) \times 10^{-5}$ rad であることを確認した。この結果から、電子放出面が平面である NEA 光陰極であっても高い空間干渉性を示すことを実証し、さらに光電子放出過程に従う一次相関関数の形を持つことが明らかとなった^[5]。この結果は、電子線波束が 4×10^{-6} の高い縮退度を有し、高い偏極度、高い輝度、長いコヒーレント長から量子干渉効果(アンチバンチング)の増幅効果が期待される。

本研究は、科学研究費補助金・基盤研究(B)(17H02737)の助成により推進されている。

- [1] M Kuwahara, et al., *Appl. Phys. Lett.* **101**, 033102 (2012)
- [2] M. Kuwahara, et al., *Microscopy* **62**, 607-614 (2013)
- [3] M Kuwahara, et al., *Appl. Phys. Lett.* **109**, 013108 (2016)
- [4] M Kuwahara, et al., *Appl. Phys. Lett.* **105**, 193101 (2014)

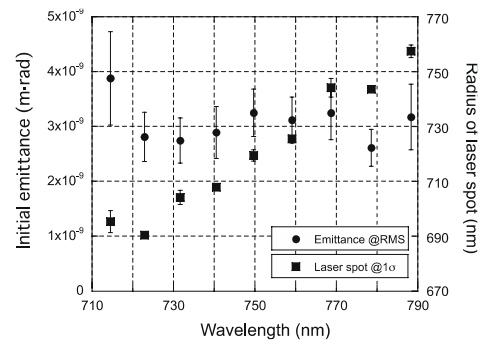


図. カソード放出面におけるエミッタンス(初期エミッタンス)と放出電子スポットサイズの励起波長依存。