

## グラフェン電子放出源における 量子状態イメージング技術の開発

### [1] 組織

代表者：松本 貴裕

(名古屋市立大学 芸術工学研究科)

対応者：根尾 陽一郎

(静岡大学電子工学研究所)

分担者：

三村 秀典 (静岡大学電子工学研究所)

増澤 智昭 (静岡大学電子工学研究所)

### [2] はじめに

カーボンナノチューブ並びにグラフェン電子放出源等に代表されるナノ構造炭素電子放出源が創出する電子放出パターンは、ナノ並びに原子レベルの量子状態を反映した美しい対称性を示すものとなっている。しかし、本電子放出パターンのイメージングは、現在のところ放出電流の大きな領域で実施されており、微小な放出電流で同様な美しい対称性を示

すパターンを得ることが出来るかどうかについては現在のところ明らかになっていない。本プロジェクトでは、電子放出分野で世界的に先駆的な研究を行っている三村・根尾両研究室と共同研究を行い、微小な放出電流が示す電子放出パターンをイメージングする技術を開発し、本技術を通して放出電子のコヒーレンス、単電子波動状態の干渉、並びに多電子状態の相関、等の物理的情報を明らかにする。このような新しい物理的情報を得ることにより、コヒーレント電子線（電子線レーザー）等に代表される従来に無いイノベーションデバイスの創出を志向する。

### [3] 実験

今年度はナノ構造炭素電子放出源の作製をおこなひ、これを三村・根尾研究室が保有する FEM (Field Emission Microscope) に搭載し、対称性を有する電子放出パターンの再現性確認実験をおこなった。

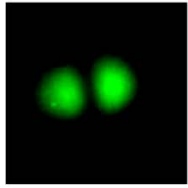
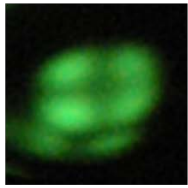
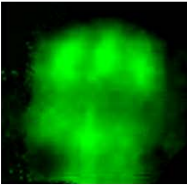

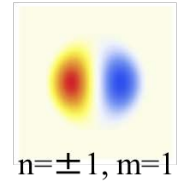
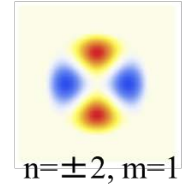
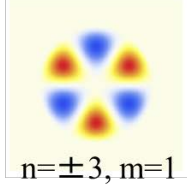
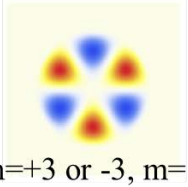
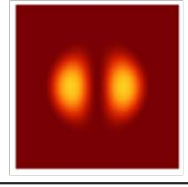
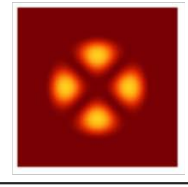
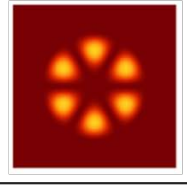
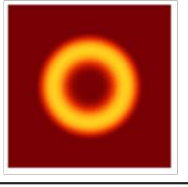
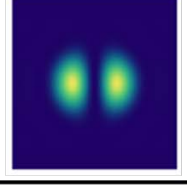
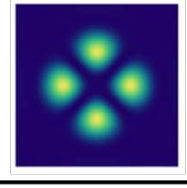
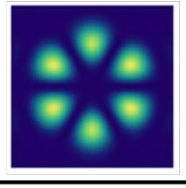
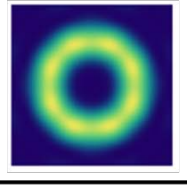
	(a) Two Lobes	(b) Four Lobes	(c) Six Lobes	(d) Ring
Observed Patterns				
Wave function at near field and quantum number	 $n = \pm 1, m = 1$	 $n = \pm 2, m = 1$	 $n = \pm 3, m = 1$	 $n = +3 \text{ or } -3, m = 1$
Intensity at near field (FIM pattern)				
Intensity at far field (FEM pattern)				

図 1. Field Emission Pattern 測定結果および円筒共振器を電子放出源境界条件とした波動関数計算結果.

グラフェン電子放出源は、炭素棒(0.5φ)をマイクロ波励起された水素プラズマ中でエッチングすることにより作製した[1]。本電子放出源を、三村・根尾研究室が有する Field Emission Microscope (FEM)にて観測した。結果を図1に示す。本手法により得られる情報は電子放出源自体の波動関数を Fourier 変換した Far Field Pattern となる。また、同じ電子放出源の Near Field Pattern を評価するために、Field Ion Microscope (FIM)にて評価した。これら一連の実験で得られる興味深い点は、FEM Pattern と FIM Pattern が一致する点である。本事実に基づき (Near Field Pattern と Far Field Pattern の一致) 次章で述べる解析をおこなうことによって、電子放出源の波動関数が奇関数性を有することが判明した。

[4] 解析

図2に示すように、FIMで得られるNear Field の波動関数 $\Psi(x_1, y_1)$  とFar Field の波動関数 $\Psi(x_2, y_2)$ とは、最小作用の原理より以下の回折式で与えられる。

$$\Psi(x_2, y_2) = A(\Phi, z) \iint dx_1 dy_1 \Psi(x_1, y_1) \frac{z_{12}}{r_{12}} \frac{e^{i\theta}}{r_{12}}$$

ここで、得られる Pattern に対して近軸付近のパターンを考えると(近軸光線近似), 上式は以下となる。

$$\Psi(x_2, y_2) \propto \iint dx_1 dy_1 \Psi(x_1, y_1) \exp\left[\frac{ik_0}{z_{12}}(x_1 x_2 + y_1 y_2)\right]$$

この関係より、FIM の Near Field Pattern と FEM の Far Field Pattern は光の回折と同様に Fourier 変換の関係で結ばれることが判る。

ところで、上式を用いてNear Field Pattern (波動関数の2乗) とFar Field Pattern (波動関数の2

乗) が一致する条件を求めると、Near Field Pattern の波動関数 $\Psi(x_1, y_1)$ が奇関数でなければならないことが判る。これより、図1で示したFEM並びにFIMの電子放出パターンは非結合性軌道(LUMO)に起源を発することが判明した。

[5] 今後の展開

グラフェン電子放出源から放出された電子は、LUMO 軌道から生じており、放出電子同士の干渉性が高いことが期待される。干渉性を上げるためには、電子放出源を低温にして微小電流領域で電子放出パターンを評価する必要がある。しかし微小電流放出領域では放出電流が大きく揺らぐ問題を有するので、放出電流安定化回路等を構築し、安定的な電子放出パターンのイメージングを行える技術を開発する必要がある。また、現状の電子放出パターンを評価している蛍光体イメージングプレートは、その量子効率が低いため、微小放出電流が示す電子放出パターンを評価することが困難となっている。そこで、量子ドット等を材料に用いた新しい高効率 FEM 用イメージングプレートを開発し、微小放出電流動作領域における電子放出パターンを感度高くおこなうことが出来るようにする必要がある。

本観測を通して放出電子のコヒーレンス、単電子波動状態の干渉、並びに多電子状態の相関、等の電子の波動性に対する新しい物理的情報を得ることが可能となり、これによりコヒーレント電子線源(電子線レーザー)等に代表される従来に無いイノベーションを創出することが出来る。

[6] 参考文献

- (1) T. Matsumoto and H. Mimura, J. Vac. Sci. Tech. B 23(2), 831-835 (2005).

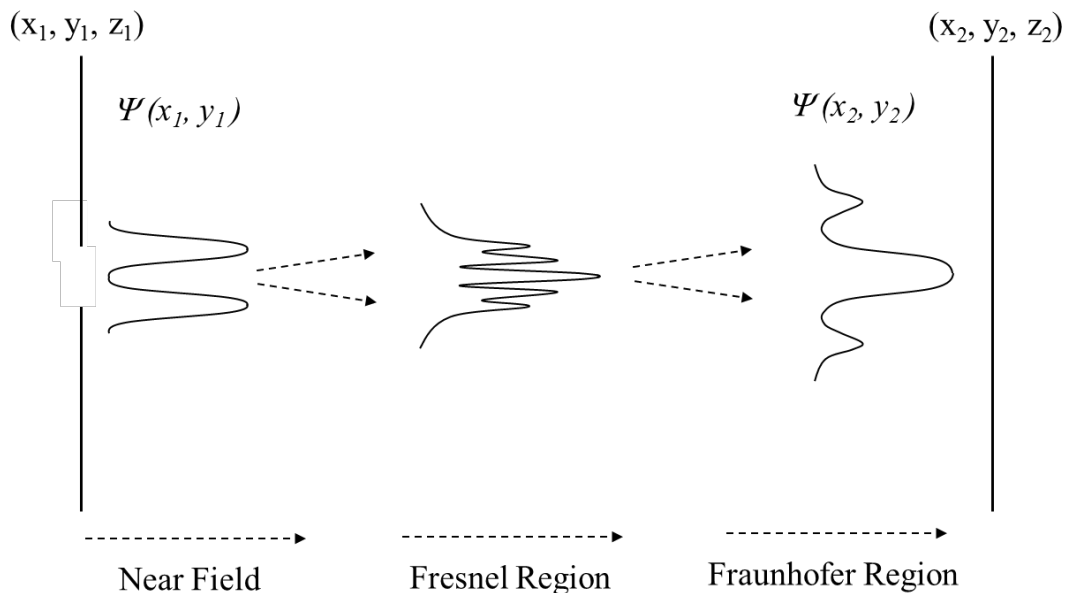


図2. 放出電子波動関数(Near Field)が回折により FEM 評価領域(Far Field)において変化する様子を示す模式図.