

論文 / 著書情報
Article / Book Information

| | |
|-------------------|---|
| 題目(和文) | 超極細電子線によるコヒーレント照射顕微法の実証研究 |
| Title(English) | Coherent Microscopy based on Ultra-fine Electron Beam |
| 著者(和文) | 澁谷達則 |
| Author(English) | Tatsunori Shibuya |
| 出典(和文) | 学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10494号, 授与年月日:2017年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:林崎 規託,小栗 慶之,矢野 豊彦,赤塚 洋,吉田 克己 |
| Citation(English) | Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10494号, Conferred date:2017/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,, |
| 学位種別(和文) | 博士論文 |
| Category(English) | Doctoral Thesis |
| 種別(和文) | 論文要旨 |
| Type(English) | Summary |

論文要旨

THESIS SUMMARY

| | | | | | |
|-------------------------|-------|----|--|-----------------|------|
| 専攻： Department of | 原子核工学 | 専攻 | 申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested | 博士 Doctor of | （工学） |
| 学生氏名： Student's Name | 澁谷 達則 | | 指導教員（主）： Academic Advisor(main) | 林崎 規託 | |
| | | | 指導教員（副）： Academic Advisor(sub) | 竹下 健二 | |

要旨（和文 2000 字程度）

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は、「超極細電子線によるコヒーレント照射顕微法の実証研究」と題し、光源から生成された低速電子線のビームサイズがマイクロメートルスケールを維持したまま伝搬可能な光電子放出を用いた電子線回折イメージング法の提唱とこの新奇な電子顕微鏡に関する実証研究に関するものである。

炭素や酸素で構成される比較的「低い原子番号の物体イメージング」を行う場合、観測試料に損傷を与えず、高コントラストで高い空間分解能を達成することは困難である。この「低い原子番号の物体イメージング」には、ダイヤモンドやカーボンナノチューブに代表されるような炭素ナノ材料、核酸やアミノ酸に代表されるような生体分子、グラフェンや h-BN に代表されるような低次元（2次元）材料など、多岐にわたる機能性材料が観測対象として含まれる。この対象領域を静的かつ動的に観測するひとつの方法に、低速電子線パルスを用いる方法が挙げられる。この電子線パルスは低速化するにつれ、観測対象物との弾性散乱断面積が大きくなり、試料損傷も抑制されるため、「低い原子番号の物体イメージング」には魅力的な方法である。しかし、従来の低速電子線イメージング法は球面収差の影響により観測対象物の空間分解能が制限され、さらに試料からの電子線の散乱角が 20 度程度と大きいことから、対物レンズ内部での散乱波の損失がおき、結像が難しくなる問題点がある。

そこで、球面収差に依存せず、同時に結像を簡易的にするためには、電子集束のための「レンズ」を組み込まないコヒーレント照射法が考えられる。しかし、これまでコヒーレント照射法のための電子光源の特性は、電界電子放出に代表されるような球面波の生成しか実現できず、コヒーレント回折に必要な平面波の生成にはレンズを組み込む必要があったために、コヒーレント照射から回折像を得ることは不可能であった。そこで本論文は、低速電子線によるレンズ系を介さないコヒーレント照射顕微法（コヒーレント電子線回折顕微法）を新しく提案し、平面状の光陰極から放出される極細小径の電子線を用いて、その原理実証を試みることを目的としている。

この新しいコヒーレント電子線回折顕微法を実現するためには、試料上での電子線のコヒーレンス性と検出器面上でのビームサイズを十分に検討する必要があることから、まず、光電子放出で誘起される高速レーザー加熱効果を検証するために、1次元の二温度モデル（TTM）を有限差分法によって計算し、この TTM から求められる電子温度を用いて初期コヒーレンス長を定量的に求めた。さらに、この初期コヒーレンス長の計算結果を含んだビームの軌道計算を行い、その伝搬したビームサイズから計算できる試料上でのコヒーレンス長と検出器面上でのビームサイズを数値的に求めた。これらの計算とその最適化の結果から、提案したコヒーレント電子線回折顕微法の実現可能性を示した。

これらの計算結果をもとに電子源と照射装置を開発し、本論文が提案するコヒーレント電子線回折顕微法の原理実証に必要な、①回折信号に必要な SN 比を満たして実験を行うために十分なビーム電流量が確保され、②試料上でのコヒーレンス長が観測対象領域をカバーするとともに電子線の波長が観測対象領域よりも短く、③ビームの横方向運動量が十分小さく、試料からの複数の回折波同士が重畳されないという 3 条件が満たされていることを確認するために、紫外線レーザーを用いた線形電子放出の量子効率測定、緑色レーザーを用いた非線形電子放出の電子収率測定、横方向運動量の評価に関する事前実験を行った。そして、事前実験の結果を総合的に考慮して、紫外線レーザーによる多層グラフェン結晶に対するコヒーレント電子線回折顕微法実験を行った。この実験結果と実験体系から直接求められるブラッグ条件を組み合わせることで逆空間での回折信号を分析したところ、グラフェンを構成する格子定数に相当するピーク信号が得られたことから、本論文で提案した顕微法は観測対象物質を原子レベルで計測できる分解能を有することを明らかにした。

また、コヒーレント照射顕微法の場合、電子放出点での光源サイズと運動量分散によって決定される固有エミッタンスが試料上のビームコヒーレンスを低下させることから、その解決法に関する実験を行った。具体的には、① 3次元ナノスケール光陰極の試作と、②波長可変レーザー光（スーパーコンティニューム光）照射によって運動分散を低減する実験である。そして、前者については加速エネルギー 30 keV、ビーム電流量 22 pA のガリウムイオンビームを用いた場合に最適な加工条件が得られることを突き止め、実際に直径 100~200 nm のナノスケールエミッタの製作に成功した。一方、後者についてはグラフェンの回折パターンを観測するには至らなかった。

最後に結論として、各章において得られた結果を総括するとともに、コヒーレント電子線回折顕微法の実用化・高性能化に向けて取り組むべき課題について述べた。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

| | | | | | |
|--------------------------|-------|----|--|---------|-----------|
| 専攻 : Department of | 原子核工学 | 専攻 | 申請学位 (専攻分野) : Academic Degree Requested | 博士 (工学) | Doctor of |
| 学生氏名 : Student's Name | 澁谷 達則 | | 指導教員 (主) : Academic Advisor(main) | 林崎 規託 | |
| | | | 指導教員 (副) : Academic Advisor(sub) | 竹下 健二 | |

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

In this research, titled, "Coherent Microscopy based on Ultra-fine Electron Beam", a novel electron microscopy, whose electron beam from the source maintains the micron scale, is proposed and demonstrated..

Recently, a wide variety of physical, chemical and biological processes in ultrafast time scale and below nanometer space scale has been the subject of much research and progress. The spatial resolution at a conventional electron microscopy is generally limited by spherical aberrations and wide-angle scattering within the imaging lens system. A possible solution for circumventing this issue is to adopt the so-called "coherent microscopy" where the lens system is eliminated. In this research it is shown that coherent microscopy can be realized by arranging the emitter-cathode and the sample-anode assemblies, both planer, to face each other, thus generating a highly parallel wavefront suitable for coherent diffraction imaging.

A simulation has been performed on the transverse coherent length and the intrinsic emittance of the beam in a coherent diffraction scheme with parallel-like photoemission. Heating effects due to ultrashort laser are taken into account by using the original two temperature model. The results indicate that the coherence of the accelerated electron at the sample to observe is not sensitive to the initial coherence on the cathode surface, and an imaging area of several ten nanometers with an atomic resolution is possible.

A prototype diffractive instrument has been built on the basis of this simulation and was used to observe polycrystalline graphene. Diffraction patterns with a resolution of 1.42 angstrom has been obtained. The number of beam partitions, which determines the size of the beam at the detector, has been examined.

備考 : 論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意 : 論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).