

Cバンド RF 電子銃を用いた針葉樹型カーボンナノ構造体カソードの電界放出特性の評価

EVALUATION OF FIELD EMISSION PROPERTIES OF A CONIFEROUS-TREE-TYPE CARBON NANOSTRUCTURE CATHODE USING A C-BAND RF GUN

平義隆#, 加藤英俊, 黒田隆之助, 豊川弘之

Yoshitaka Taira#, Hidetoshi Kato, Ryunosuke Kuroda, Hiroyuki Toyokawa

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

Abstract

We have developed a field emission based C-band RF gun aiming at development of a tabletop size high-energy x-ray source and a terahertz radiation source. Coniferous carbon nano-structure (CCNS) is used as a field emission cold cathode. Tips of it have a nanometer-size tubular structure that becomes thicker on the substrate side. Owing to this configuration, the CCNS has a large field enhancement factor, and is considered to be more stable in high electric fields than carbon nanotubes. Characteristic of the field emission of the CCNS under an electrostatic field was revealed in the previous study. In this proceedings, we report characteristics of the field emission of the CCNS under a RF field using a single cell C-band RF cavity. It was found that the emission peak current was 15 mA after a RF aging. An enhancement factor of CCNS was measured as 1200. But reduction of it was observed after a RF aging. This is due to the destruction of tips of the CCNS by a high electric field. The energy of an electron generated via field emission was measured by a bending magnet. It was found that electrons with the energy of 150 keV are generated from the C-band RF gun.

1. はじめに

本研究では、テーブルトップサイズで 1 MeV 以下の短パルス電子ビーム源を開発することを目的として電界放出型の C バンド RF 電子銃の開発を行っている。短パルス電子ビームをターゲットに照射することで X 線またはテラヘルツ波を発生し、材料の非破壊分析などの応用研究を進めることが最終的な目標である。

通常用いられる電子源には熱陰極、電界放出陰極、光陰極の 3 種類がある。熱陰極は、カソード材料を高温に熱することによって電子を発生し、加速器の電子源として最も広く用いられている。高温にする構造が必要であり、また、RF 電子銃の場合は加速された電子が逆加速されて陰極をたたき電流変動や寿命が短くなるバックボンバードメントと呼ばれる問題点がある^[1]。

電界放出陰極は、陰極に高電界を印加するだけで電界放出現象によって電子を発生することができる。熱陰極と異なり、陰極を高温にする必要がなく電子銃の構造が単純になる。また、RF 電界の高い位相でのみ電子が発生するため、短パルスの電子ビームを発生することができる。限られた位相でのみ電子が発生するため、バックボンバードメントも起きにくい。さらに超高真空も必要ない。また、カーボンナノチューブ(CNT)を用いれば、発生点がナノメートルサイズの超低エミッタンス電子ビームを発生することができる。しかし、高電界が印加されると CNT が破壊されといった問題があり、高エネルギー加速器用の電子源としての実用化は進んでいない。

しかし、電子顕微鏡用にタングステンチップを用いた電界放出陰極の普及は進んでいる。

光陰極は、パルスレーザーの照射によって光電効果で発生する電子を加速する。レーザーと RF の加速位相を制御することで、バックボンバードメントの問題は起こらない。電子発生点のサイズはレーザーの集光サイズに依存するため、低エミッタンス電子ビーム源開発の先端加速器に利用されている。

本研究では、電界放出陰極として針葉樹型カーボンナノ構造体(Coniferous carbon nano-structure: CCNS)を使用している。先に述べたように、電界放出では RF 電界を印加するだけで電子が発生するので、電子銃の構造が単純になり、限られた位相でのみ電子が発生するので、テラヘルツ波発生に必要な短パルスの電子ビームを発生することができる。短パルス電子ビームの発生に関しては光陰極が適しているが、レーザー装置を必要とするため、装置全体の大きさが大きくなってしまふ。

CCNS は、針葉樹型のカーボン構造体が多数生えた森のような形状をしており、1 本 1 本の樹状構造体の先端には、ナノメートルサイズの針状炭素が突き出ている^[2]。この先端部に RF 電界が集中することで電界放出によって電子が発生する。CCNS の詳しい製法については参考文献^[3]を参照して頂きたい。

本プロシーディングスでは、DC 電場と RF 電場に対する CCNS の電界増倍係数や放出電流といった電界放出特性を測定した結果について報告する。CCNS への RF 電場の印加には、独自に開発した C バンド RF 電子銃を用いている^[4]。

yoshitaka-taira@aist.go.jp

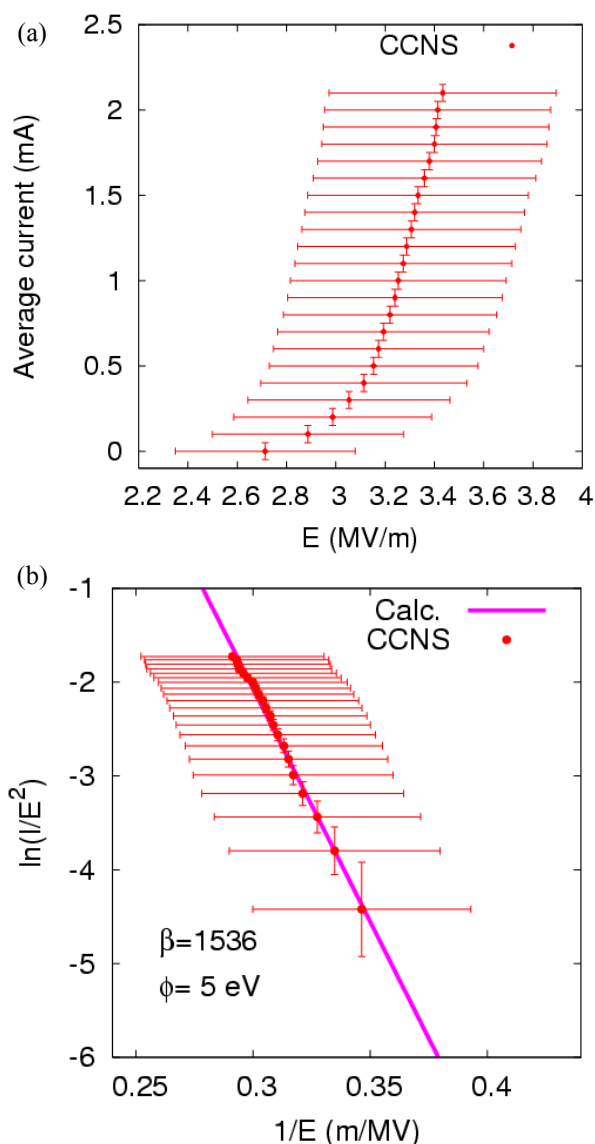


Figure 1: (a) Emission current vs electrostatic field . (b) Fowler-Nordheim plot of CCNS. Solid line is a least squares fitting of the data points derived from Eq. (2).

2. DC 電場に対する CCNS の電界放出特性

最初に DC 電場を CCNS に印加したときの放出電流と電界増倍係数について述べる。

CCNS 表面に電界 E (MV/m) が印加されたときの電流密度 I (A/m²) は以下の式で表せられる^[5]。

$$I = \frac{1.54 \times 10^6 \times 10^{\frac{4.52}{\sqrt{\phi}} (\beta E)^2}}{\phi} \exp\left(-\frac{6530 \phi^{1.5}}{\beta E}\right) \quad (1)$$

ここで、 ϕ は CCNS の仕事関数、 β は電界増倍係数である。式(1)の両辺を E^2 で割って自然対数を取る

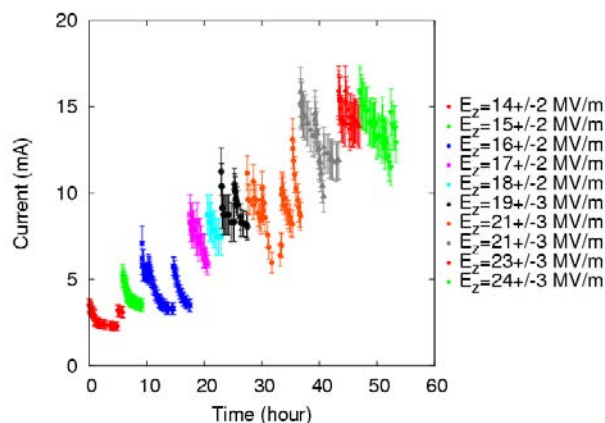


Figure 2: RF aging of CCNS. Electric field applied to the CCNS surface is changed from 14 MV/m to 24 MV/m.

と、

$$\ln\left(\frac{I}{E^2}\right) = \ln\left(\frac{1.54 \times 10^6 \times 10^{\frac{4.52}{\sqrt{\phi}} \beta^2}}{\phi}\right) - \frac{6530 \phi^{1.5}}{\beta} \frac{1}{E} \quad (2)$$

になり、横軸に $1/E$ 、縦軸に $\ln(I/E^2)$ をプロットすると線形に変化し、傾きから電界増倍係数を評価することができる。これを Fowler-Nordheim plot と呼ぶ。

CCNS 側を高電圧、片方の電極を GND に接続して電圧値を変化させながら CCNS から放出される電流を測定した。電極間距離は 1.5 ± 0.2 mm であり、電圧は 5.15 kV まで印加した。

電界強度に対する電流値の変化を Figure 1 (a) に、Fowler-Nordheim plot を Figure 1 (b) に示す。これらの図から、電界強度が 3.4 MV/m のとき放出電流は 2.1 mA であることが分かった。CCNS の直径は 6 mm なので、CCNS の面積 2.8×10^{-5} m² で割ると電流密度は 75000 mA/m² = 7.5 mA/cm² である。また、Figure 1(b) の Fowler-Nordheim plot から、CCNS の仕事関数を 5 eV としたとき式(2)を用いたフィッティングから電界増倍係数は $\beta = 1540 \pm 30$ であることが分かった。この電界増倍係数の値は、参考文献^[3]で測定された結果と矛盾しない。

CCNS の仕事関数を 5 eV、電界増倍係数を 1540、電界強度を 3.4 MV/m としたとき、式(1)を用いて電流密度を計算すると、 7.8×10^8 A/m² となる。計算から求められる発生面積は 2.7×10^{-12} m² であり、CCNS の表面全体から電子が発生しているわけではなく、CCNS のごく一部の先端部から電子が発生していることが分かる。

3. RF 電場に対する CCNS の電界放出特性

前章では、DC 電場に対する電界放出特性を調べた。本章では、同じ CCNS を C バンド RF 電子銃のカソードとして導入し、RF 電場に対する CCNS の電界放出特性を調査した。これまでの経験から、電界強度の高い RF 電場を CCNS に印加すると CCNS

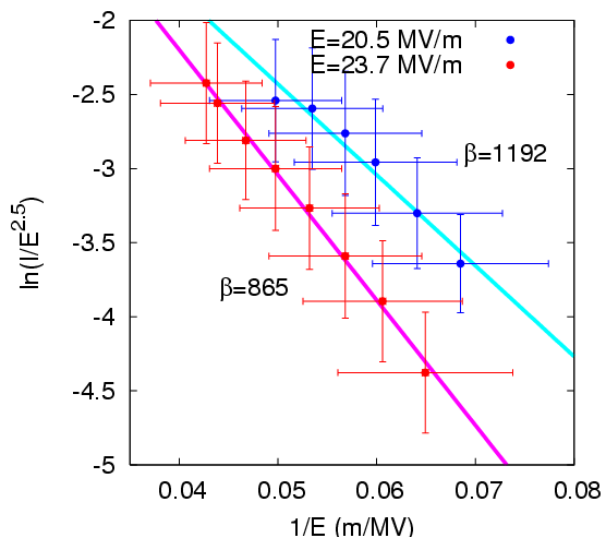


Figure 3 : Fowler-Nordheim plot of CCNS under RF field. Solid lines are a least-squares fitting of the data points derived from Eq. (4).

の先端が破壊されて出力が低下する。そこで、低電界から徐々に電界強度を上げながら電流の変化を測定した(RF エージング)。

Figure 2 に電界強度を 14 MV/m から 24 MV/m まで約 50 時間かけて上げた時の電流の変化を示す。同じ電界強度でも突然電流値が変化している箇所がいくつかあるが、これは RF を off/on した時間である。単純に RF を off/on しただけで電流値が変化している理由は、RF 電場と相互作用している CCNS の先端部が変わっているからだと考えられる。

Figure 2 の縦軸に示す電流値は、電子銃のビーム取り出しポートの下流に絶縁フランジを取り付け、その両端の電流値をピコアンメータ(Keithley, Model 6487)で測定した。アナログ出力をオシロスコープに接続しその波高値から電流値を測定した。ピコアンメータの測定レンジに応じて、アナログ出力の波高値は±2 V の範囲で変化する。例えば、ピコアンメータの測定レンジが 2 mA のときに、-2 mA が測定された場合、アナログ出力の波高値は+2 V になる。また、アナログ出力の立ち上がり時間は 200 μsec である。この立ち上がり時間に対して電子が発生している時間、つまり RF のパルス幅は 1/100 の 2 μsec であるため、補正しないと正しい電流値が測定できない。補正係数を求めるためにパルス発生器と抵抗を接続し、パルス電圧のパルス幅を変えながらアナログ出力の波高値を測定した。その結果、パルス幅が 300 μsec 以上の場合、アナログ出力の波高値は一定であったが、300 μsec よりも短くなると波高値が減衰することが分かった。パルス幅が RF のパルス幅と同じ 2 μsec のとき、波高値は 1/28 に減衰した。したがって、Figure 2 に示す縦軸の電流値は、ピコアンメータのアナログ出力の波高値から算出される電流値に 28 をかけた値を表示している。

CCNS から発生する電子の平均電流及び電荷量について述べる。ピコアンメータで測定された電流は

15 mA であった。RF のパルス幅は 2 μsec、繰り返し 10 Hz なので、デューティ比は 2×10^{-5} である。したがって、CCNS から発生する平均電流は 300 nA である。C バンド RF 電子銃の高周波源であるマグネトロンは 500 Hz で運転可能なので、最大平均電流は 15 μA まで向上することが可能である。また、1 マクロパルス当たりの電荷量は 30 nC であり、RF のパルス幅 2 μsec の中に約 10600 サイクルの RF が存在するため、1 ミクロパルス当たりの電荷量は 2.8 pC である。

RF エージング中に CCNS の RF 電場に対する電界増倍係数を測定した。CCNS 表面に RF 電界 E (MV/m) が印加されたときの電流密度 I (A/m²) は以下の式で表せる^[5]。

$$I = \frac{5.7 \times 10^3 \times 10^{\frac{4.52}{\sqrt{\phi}}} (\beta E)^{2.5}}{\phi^{1.75}} \exp\left(-\frac{6530\phi^{1.5}}{\beta E}\right) \quad (3)$$

式(3)の両辺を $E^{2.5}$ で割って自然対数を取ると、

$$\ln\left(\frac{I}{E^{2.5}}\right) = \ln\left(\frac{5.7 \times 10^3 \times 10^{\frac{4.52}{\sqrt{\phi}}} \beta^{2.5}}{\phi^{1.75}}\right) - \left(\frac{6530\phi^{3/2}}{\beta}\right) \frac{1}{E} \quad (4)$$

になる。つまり、RF 電場の場合の Fowler-Nordheim plot は、横軸に $1/E$ 、縦軸に $\ln(I/E^{2.5})$ をプロットする。

最初の電界増倍係数の測定は、電界強度が 21 MV/m のとき、Figure 2 中の RF エージングを開始してから 35 時間経過したときに測定した。2 回目の測定は、電界強度が 24 MV/m のとき、52 時間経過したときに測定した。Fowler-Nordheim plot を Figure 3 に示す。1 回目に測定した電界増倍係数は $\beta = 1200 \pm 100$ 、2 回目に測定した電界増倍係数は $\beta = 860 \pm 20$ であった。

1 回目の測定では、RF 電場に対する電界増倍係数が DC 電場に対して 340 低下した。これは、1 回目の測定をするまでの RF エージング中に同じ電界強度でも電流が低下することが観測されており、強電界によって CCNS の先端部が破壊されアスペクト比

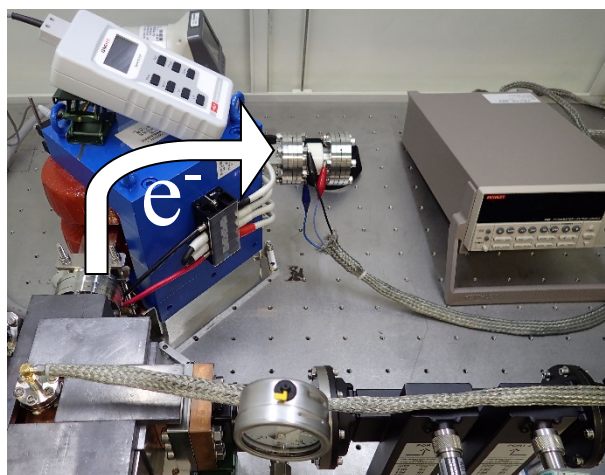


Figure 4: Schematic of energy measurement of electron generated from the CCNS.

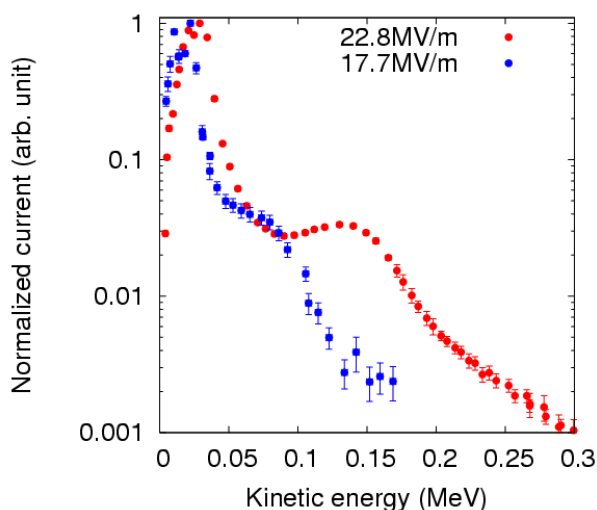


Figure 5: Energy spectra of electrons for different RF electric field.

が小さくなったことに伴って電界増倍係数も低下したと考えられる。RF 電界を強くした 2 回目の測定では、さらに電界増倍係数が低下することが確認された。これも同様のプロセスが起きていると考えられる。今回測定した CCNS は、電界を上げると電界増倍係数が低下することが観測された。さらに電界を上げると電界増倍係数はどのように変化するか、また、CCNS の生成プロセスを変えると、それらはどのように変化するかなどは今後調べるべき対象である。

4. 電子の運動エネルギー測定

CCNS から電界放出によって発生する電子のエネルギーを偏向電磁石を用いて測定した(Figure 4)。

電子の運動エネルギーを T 、偏向電磁石の磁場強度を B としたときの関係は以下の式で表せられる。

$$T = \sqrt{(m_e c^2)^2 + (Bc\rho)^2} - m_e c^2 \quad (5)$$

ここで、 $m_e c^2$ は電子の静止質量(0.511 MeV)、 c は光速、 ρ は偏向電磁石の偏向半径である。測定に用いた電磁石の偏向半径は $\rho = 0.1$ m である。

偏向電磁石の下流に絶縁フランジを取り付け、偏向電磁石を通過する電流を、磁場強度を変えながら測定した。結果を Figure 5 に示す。Figure 5 の横軸は、磁場強度をガウスメータで測定し、その値を式(5)によって運動エネルギーに変換している。実際の偏向電磁石には端部に漏れ磁場があるため、正確なエネルギーを算出するためには、その効果も計算に含める必要があるが、今回は式(5)を用いて変換した。赤点は CCNS に印加する電界強度が 23 MV/m の場合であり、青点は 18 MV/m の場合である。電界強度が 23 MV/m のとき 150 keV 程度までの電子が発生できていることが分かった。また、電界強度が低くなることで、発生する電子の最大エネルギーも低下することを測定することができた。

まとめ

独自に開発した C バンド RF 電子銃を用いて、CCNS の RF 電場に対する特性及び CCNS から発生する電子のエネルギーを測定することができた。DC 電場に対する CCNS の電界増倍係数は 1540 ± 30 と測定され、RF 電場では 1200 ± 100 と測定された。RF 電場の方が低い理由は、高電界によって CCNS の先端が破壊されたために先端部のアスペクト比が低下し、電界増倍係数が低下したと考えられる。RF エージングによって徐々に RF の電界強度を上げることを行い、ピーク電流を 5 mA にまで上げられることが分かった。平均電流は 300 nA、1 マクロパルス当たりの全電荷量としては 30 nC である。電子ビームのエネルギーを偏向電磁石で測定し、150 keV 程度までの電子を発生できていることが分かった。また、電界強度の強さによって電子ビームエネルギーの最大値が変化することが測定された。

今後は、特に電子のエネルギーに関してシミュレーションを行い、測定結果と矛盾の無い事を確かめる。

謝辞

偏向電磁石は有限会社タカノ技研に製作して頂きました。本研究は JSPS 科研費 15K17494 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 大沢 哲、OHO セミナー、電子源-電子銃の種類と特徴、2007.
- [2] 鈴木良一 et al., “針葉樹型カーボンナノ構造体を用いた冷陰極 X 線源”, X 線分析の進歩 41, (2010) 201-206.
- [3] H. Kato et al., Dia. Rel. Mat., 55, 41 (2015).
- [4] Y. Taira et al., Proc 11th Annual Meeting of PASJ, 564, (2014).
- [5] J. W. Wang, SLAC-R-339, (1989).