

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 電界放出電流の測定

MEASUREMENT OF FIELD EMISSION CURRENT FROM A CONIFEROUS-TREE-TYPE CARBON NANOSTRUCTURE CATHODE BY 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 fabricated a C-band RF gun which used the Coniferous-tree-type Carbon NanoStructure (CCNS) cathode aiming at development of a tabletop size high-energy x-ray source and a terahertz radiation source. The CCNS is having structure like coniferous forest formed by carbon nanostructures. 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. The C-band RF gun is a single cell pillbox cavity of the 16.1 mm length and is designed to work around the frequency of 5325 MHz. An important quantity for the CCNS cathode which is called field enhancement factor was measured by applying the electric field from 18.8 to 26.7 MV/m. The field enhancement factor was evaluated as 860 and this value is consistent with the result measured by an electrostatic field.

1. はじめに

産総研では、テーブルトップサイズの高エネルギーX線、テラヘルツ光源のためのCバンドRF電子銃の開発を行っている。従来用いられているSバンド帯のRFよりも周波数の高いCバンド帯のRFを用いることで、電子銃及びRFコンポーネントが小型になる。電子源には針葉樹型カーボンナノ構造体(Coniferous-tree-type Carbon NanoStructure: CCNS)を使用する。電界放出によって電子が発生するため、ヒータ構造や外部レーザー等を用いる必要がなく装置の小型化に大きく寄与する。また、電界放出では限られた位相でのみ電子が放出されるため、テラヘ

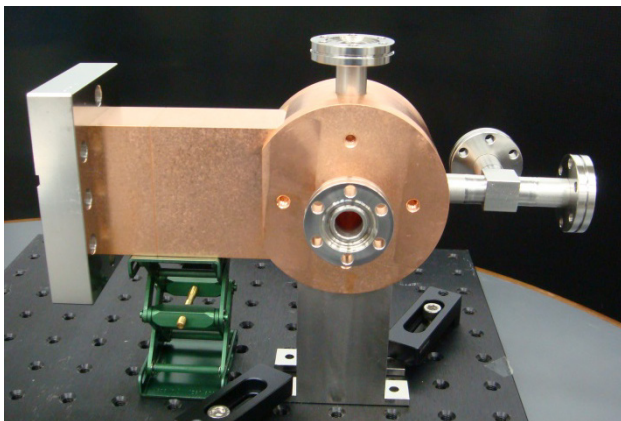


Figure 1: Appearance of the C-band RF gun.

[#] yoshitaka-taira@aist.go.jp

ルツ波発生に重要な短パルス電子ビームを発生することができる。

本論文では、CバンドRF電子銃内部に誘起される電界強度の評価及び、CCNSからの電界放出電流の測定と電界増倍係数の評価結果について述べる。

2. CバンドRF電子銃の特性評価

CバンドRF電子銃の外観をFigure 1に示す。高周波源には出力周波数範囲 5.25-5.4 GHz、ピークパワー600 kWのマグネトロンを利用し、マグネトロンとRF電子銃の間にはサーキュレータ、方向性結合器、RF窓を接続している。

マグネトロンを駆動するためには、電圧30 kV、ピーク電流40 A、パルス幅2 μ sの高電圧パルス印加する必要がある。RFのピークパワー P_i はマグネトロンに流れるピーク電流 I_p に比例(Figure 2)し、印加電圧を変えることでRF出力を連続的に変えることができる。RFのピークパワーとスペクトル及び波形のモニターには、方向性結合器の出力をパワーメータ、スペクトルアナライザ、検波器に接続して行っている。スペクトルアナライザを用いて測定したRFスペクトルの結果をFigure 3に示す。この時のピークパワーは430 kWである。

CバンドRF電子銃は、内径43.2 mm、セル長16.1 mmのシングルセルRF空洞であり、シミュレーションコード Superfish で計算した結果から Q_0 値は14400である。

CCNSの電界放出電流は、電界強度に強く依存するため、実際にカソードに印加されている電界強度

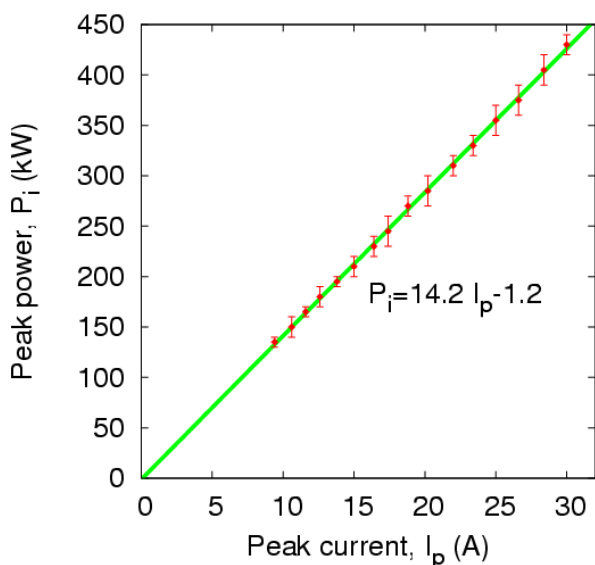


Figure 2: RF peak power generated from the magnetron.

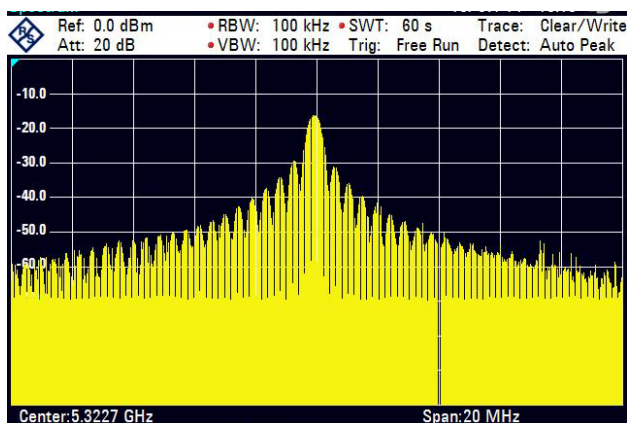


Figure 3: Frequency spectrum of RF.

を評価することが重要である。RF 空洞の場合、カソードの電界強度を直接測定することは困難であるため、複数の方法を用いて電界強度を推定することになる。

まず、空洞内の電場分布 $E(z)$ は摂動法によって求まる。半径 r の微小導体球を RF 空洞に挿入したとき、導体球を挿入する前の共振周波数 f_0 からの変化が Δf の場合、電場分布は

$$E(z) = \sqrt{\frac{|\Delta f|}{f_0^2} \frac{P_0 Q_0}{2\epsilon\pi^2 r^3}} \quad (1)$$

となる^[1]。ここで、 P_0 は空洞内電力、 Q_0 は空洞の無負荷 Q 値、 ϵ は誘電率である。半径 0.794 mm のステンレス球をカソード面付近まで挿入し、共振周波数の変化をネットワークアナライザで測定したところ、 $\Delta f = 2.963$ MHz であった。ステンレス球を挿入する前の共振周波数は $f_0 = 5327.347$ MHz であった。

式(1)より、 P_0 と Q_0 が測定できればカソード面での $E(z=0)$ を評価することができる。

空洞内電力 P_0 と Q_0 値は、RF 空洞への入力電力 P_i と反射電力 P_r を測定し、それらの比から空洞のフィリングタイム及びカップリング係数を評価することで求まる。空洞のフィリングタイムを t_f 、カップリング係数を β_c とすると、入力電力と反射電力の比は、

$$\frac{P_r}{P_i} = \left\{ \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{t_f}\right) \right) \frac{2\beta_c}{1+\beta_c} - 1 \right\}^2 \quad (2)$$

と表せられる^[1, 2]。カップリング係数は空洞と導波管の結合の強さを表し、負荷 Q 値 Q_L を用いて

$$Q_0 = (1 + \beta_c) Q_L \quad (3)$$

の関係があり、フィリングタイムとは

$$t_f = \frac{Q_L}{\omega_0} = \frac{Q_0}{\omega_0(1 + \beta_c)} \quad (4)$$

の関係になる。

方向性結合器に RF 検波器(Agilent Technologies, 8473C)を接続して RF の入力と反射波形を測定した結果を Figure 4 に示す。それらの比を Figure 5 に示す。Figure 5 中の実線は、式(2)において $\beta_c = 15.0$ 、 $t_f = 0.05 \mu\text{s}$ とした時の計算結果である。この測定結果から、Cバンド RF 空洞のカップリング係数は $\beta_c = 15.0$ 、 $Q_0 = 13370$ であることが分かった。 Q 値は Superfish の計算結果と近い値が得られている。

次に、空洞内の電力 P_0 は、フィリングタイムよりも長い時間領域では

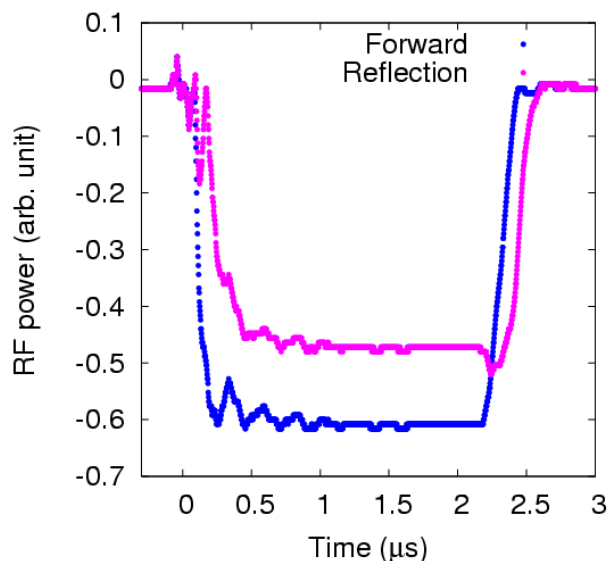


Figure 4: The blue dots show the waveform of the forward RF power. The purple dots show the waveform of the reflected RF power.

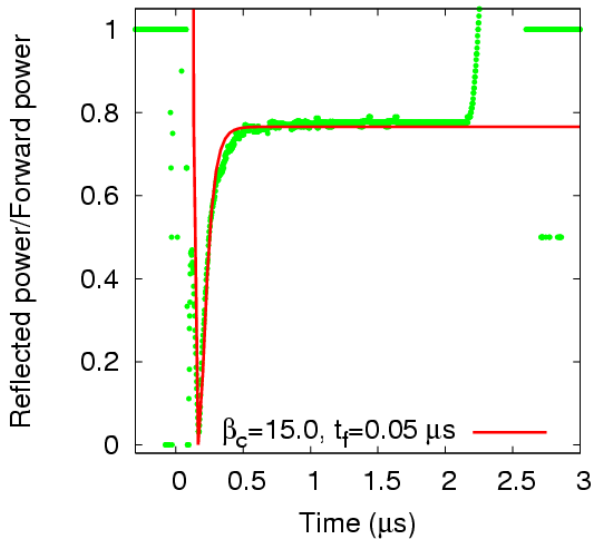


Figure 5: Ratio between the forward and the reflected RF power. The green dots are the measured data. Solid line is the calculated result using Eq. (2).

$$P_0 = \frac{4\beta_c}{(1+\beta_c)^2} P_i \quad (5)$$

と表せられる^[1]。入力電力 P_i については Figure 2 にその特性を示してある。

以上述べた式(1)-(5)を用いることによって、カソード面の電界強度を評価することができる。一例を挙げると、 $P_i = 430$ kW、 $\beta_c = 15.0$ のとき $P_0 = 100$ kW になり、 $E(z=0) = 40$ MV/m である。

今回製作した C バンド RF 電子銃はカップリング係数が大きくなったために、空洞内電力がマグネトロン出力パワーよりも低下している。カップリング係数を 1.0 付近にすることによってマグネトロンと同等の電力を空洞内に蓄えることができ、高い加速電界をもつ空洞が製作できる。

3. 電界放出電流の測定

3.1 CCNS の製作方法と概要^[3]

CCNS は水素およびメタンを原料ガスとして直流プラズマ CVD 法で金属(ステンレス)基板に成長させて製作される。直径 6 mm の SUS 基盤に成長させた CCNS を Figure 6 に示す。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。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。比較的低電界の 2 MV/m から電子放出が起き、電界をさらに高くすると針状炭素の先端は局所的な熱やクーロン力によって一部が破壊される。CCNS は底面ほど太い構造をしているため先端が破壊されると内部の CCNS にも電界がかかるようになり、電界放出を起こす CCNS の数が増える。

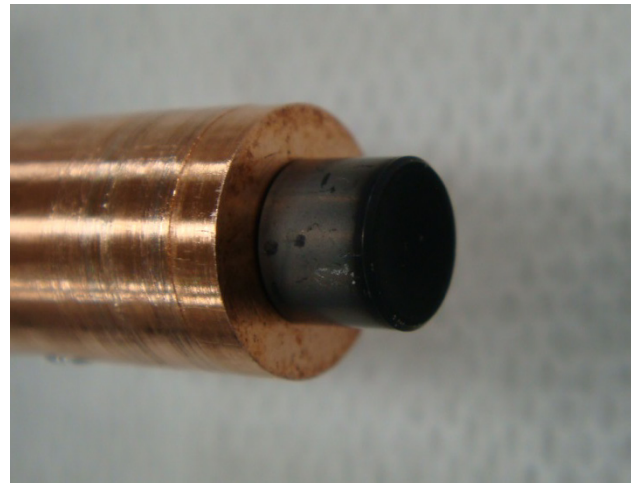


Figure 6: Appearance of CCNS cathode.

3.2 RF に対する電界放出の理論背景

カソードへの電界が DC ではなく RF の場合、カソードから放出される電界放出電流密度 $I(\text{A}/\text{cm}^2)$ は、以下のように記述される^[4]。

$$I = 0.57 \times 10^{4.52\phi^{-0.5}} \frac{(\beta E)^{2.5}}{\phi^{1.75}} \times \exp\left(-6.53 \times 10^3 \frac{\phi^{3/2}}{\beta E}\right) \quad (6)$$

ここで、 ϕ はカソード材料の仕事関数(eV)、 β は電界増倍係数、 E は電界強度(MV/m)である。式(6)の両辺を $E^{2.5}$ で割って自然対数をとると、下記のようなになる。

$$\ln\left(\frac{I}{E^{2.5}}\right) = \ln\left(0.57 \times 10^{4.52\phi^{-0.5}} \frac{\beta^{2.5}}{\phi^{1.75}}\right) - \left(6.53 \times 10^3 \frac{\phi^{3/2}}{\beta}\right) \frac{1}{E} \quad (7)$$

式(7)より、横軸に $1/E$ 、縦軸に $\ln(I/E^{2.5})$ をプロットすると直線に変化することが分かる。これを Fowler-Nordheim プロットと呼び、傾きから電界増倍係数が分かる。

3.3 CCNS の電界放出電流の測定と電界増倍係数の評価

電界放出電流を測定するために、Figure 7 に示すように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、ピコアンメータ(Keithley, 6487)で絶縁フランジ間の電流を測定した。アナログ出力をオシロスコープで測定し、電流値に換算した。

マグネトロンは、パルス幅 2 μs 、繰り返し 9.5 Hz、デューティ比 1.9×10^{-5} 、出力 100~200 kW、中心周波数 5322.7 MHz で運転した。

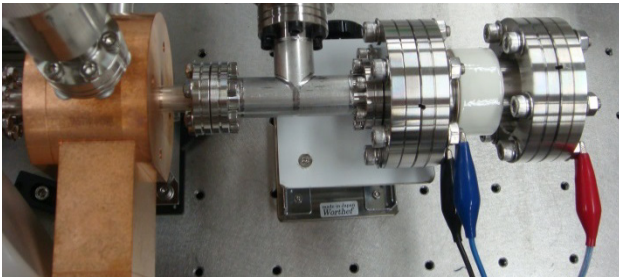


Figure 7: Measurement of field emission current from the CCNS using an insulating flange.

RF のピークパワーを変えながら電流値を測定した結果を Figure 8(a)に示す。横軸は、式(1)を用いて RF ピークパワーを電界強度に換算した値であり、縦軸はピコアンメーターで測定した単位時間当たりの電流量である。図中の赤点は測定データを表し、実線は式(6)を用いたフィッティング曲線である。Figure 8(b)は Fowler-Nordheim プロットを表している。実線は式(7)を用いたフィッティング曲線である。測定データが線形に変化し、電界放出による電流を測定できていることが分かる。CCNS の電界増倍係数は 860 ± 40 であることが分かった。DC 電場での測

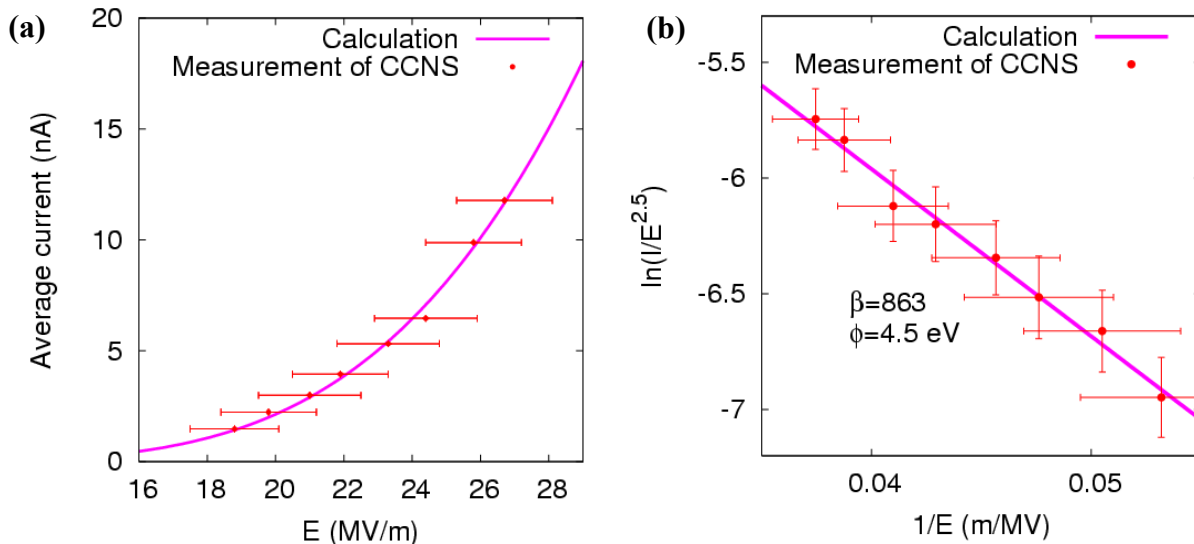


Figure 8: (a) Average current emitted from the CCNS measured with a picoammeter. (b) Fowler-Nordheim plot.

謝辞

マグネトロン動作に関しては新日本無線株式会社の梅原氏、中山氏に多大なご協力を頂きました。

参考文献

- [1] K. Hirano et al., “マルチバンチフォトカソード電子銃のビームローディング試験”, Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan
- [2] 吉田 光宏, “電子線形加速器における高周波デバイスの基礎”, 2008年 OHO セミナーテキスト

定結果から CCNS の電界増倍係数は約 1000 であるとの結果が得られており、それと矛盾しない結果が RF 電場に対しても得られた。また、CCNS は 26.7 MV/m の電界強度までは耐えられることが分かった。

4. まとめ

可搬型の高エネルギー・短パルス電子ビーム源開発に資する C バンド RF 電子銃を用いた CCNS の電界放出特性の評価を行った。マグネトロンから電子銃への RF 入力パワーと反射パワーの比を計算することで、C バンド空洞のカップリング係数が 15、 Q_0 値が 13370 ということが分かった。ビームポート下流に絶縁フランジを接続し、ピコアンメーターを用いて電流量を測定した。RF のピークパワーを変えながら CCNS から放出される平均電流を測定し、RF に対する電界放出の理論式と比較することで CCNS が 26.7 MV/m の電界強度まで耐えられることと電界増倍係数が 860 であることが分かった。

今後、CCNS にさらに高い電界をかけ、どれくらいまで耐えられるのか検証する。また、他の CCNS カソードについても電界増倍係数の測定を行う。

- [3] 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.
- [4] J. W. Wang, “RF properties of periodic accelerating structures for linear colliders”, SLAC-R-339, (1989)