

研究種目：若手研究(A)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18686010
 研究課題名（和文） 先進量子放射光源のための高周波電子銃の高性能化新方式
 研究課題名（英文） An Innovative Method for RF Gun Performance Improvement for Advanced Quantum Radiation Sources
 研究代表者
 増田 開 (MASUDA KAI)
 京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授
 研究者番号：80303907

研究成果の概要：

熱陰極高周波電子銃においてマクロパルス長を制限している逆流電子の陰極衝突・加熱を大幅に抑制可能な新型電子銃，三極管型熱陰極高周波電子銃を提案した．数値解析による設計，高周波電力分岐供給系の整備，プロトタイプ試験を経て，最終的に原理実証機を設計・製作した．従来型と比べて，20倍程度のピーク電流，同程度のエミッタンスの運転条件で，逆流電子電力を約80%も削減可能であるとの数値解析結果を得た．

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	14,300,000	4,290,000	18,590,000
2007年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2008年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	23,200,000	6,960,000	30,160,000

研究分野：高輝度電子銃

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎／応用物理一般

キーワード：電子銃，電子加速器，高周波電子銃，逆流電子，back-bombardment，高周波三極管構造，三極管型高周波電子銃，テラヘルツ・赤外光源

1. 研究開始当初の背景

先端科学技術分野における革新的ツールの代表であり，我が国が世界をリードしている分野でもある量子放射光源開発において，波長領域拡大等の更なる発展に必要となる要素研究課題の中で，電子ビームの高輝度化には最も大きな進展が要求されている．特に電子エネルギーの最も低く空間電荷効果の最も顕著な電子銃の性能がビーム輝度を制限しており，高輝度化には電子銃の高性能化が極めて効果的である．

熱陰極を電子放出源とし，高周波電界で引

き出して加速する熱陰極高周波電子銃は，元来，他方式の電子銃に対して小型で経済的かつ，マイクロパルス間隔が短い（平均電流が高い）といった点で優位性がある．

これら利点にも関わらず量子放射光源の電子銃として広く利用されるに至っていない理由は，高周波電界を用いることに起因して，一定の位相範囲に熱陰極より引き出された電子が逆加速されて陰極に衝突するため，陰極温度を一定に保つことが不可能となり，特に自由電子レーザに用いる場合に必要なが長マクロパルス運転時には結果として電子

ビーム輝度の低下を招くという欠点 (back-bombardment 効果) がある。この問題を軽減して長マクロパルス化をはかるために、これまでに様々な方法が提案されてきたが、いずれも効果は限定的であり、根本的な解決には至っていない。

本研究計画では、従来静電電子銃において用いられてきた三極管の概念を高周波電子銃に導入する。すなわち、熱陰極前面に制御電極 (高周波印加) を設置して電子の引き出し位相を制限する。数値シミュレーションによる準備研究の結果、この方式により熱陰極高周波電子銃の欠点をほぼ完全に解決できる可能性があることが判明し、本研究を計画した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、熱陰極高周波電子銃における唯一の欠点 (back-bombardment 効果) を独自の新規方式 (高周波三極管構造の導入) によって解決することにより、研究代表者らのグループで開発中の小型高性能赤外自由電子レーザを高性能化し、その利用範囲を拡大することにある。さらに、本提案方式は既設設備 (電子銃陰極と高周波立体回路) の極小規模な改造により大きな効果が期待されるため、その有効性が実証されれば、当該分野の既設施設において直ちに広く実用可能であり、新規光源開発とそれらを用いた新たな光科学研究領域の開拓に寄与することが、本研究の最終的な目標である。

そのため、本研究期間(H18-H20)においては、この新方式による高輝度電子ビーム生成の大幅な長マクロパルス化の原理実証を目指し、既設の 4.5 空胴高周波電子銃に内蔵する熱陰極付き小型同軸空胴を設計・製作した。

3. 研究の方法

①粒子シミュレーションによる高周波空胴電極形状の設計

既設の 4.5 空胴熱陰極高周波電子銃は、動作周波数 2.856 GHz で、熱陰極を軸上に備えた 1 つの 1/4 波長空胴 (half cell, 図 1(a)) と、引き出された電子ビームを 9 MeV まで加速する後段の 4 つの半波長空胴 (full cell) の 4+1/2 空胴からなる。図 1(a)中の $z = 0$, 軸上に設置された直径 6 mm の熱陰極からは、図中に電気力線の示された高周波電界の半周期に渡って電子が引き出されるが、そのうちの約 50%は空胴出口まで到達せず、一部は陰極に逆加速されて衝突して前述の back-bombardment の問題を引き起こす (図 2(a)に 1次元の模式図)。

本提案の三極管型高周波電子銃は、従来の熱陰極に換えて、直径 2 mm の熱陰極を備えた小型同軸空胴を設置し (図 2(b)), これに主高周波源とは位相・大きさとも独立に制御さ

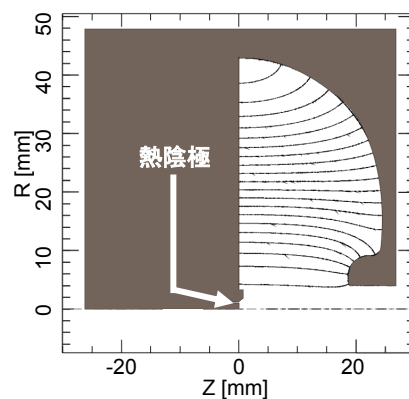
れた高周波電力を供給することで戻り電子ビームを大幅に削減しようとするものである (図 2(b)に 1次元の模式図)。数値解析による予備検討の結果、(i) 戻り電子ビーム電力を大幅に削減して問題をほぼ完全に解決できる可能性の高いこと、(ii) 追加空胴への印加高周波電力は数十 kW 程度で十分であり既設の主高周波電源 (最大 10 MW) からの分岐により供給可能で追加高周波源は不要であること、が判明し本研究を計画するに至った。

本研究においては、実機への導入を前提としたより現実的な空胴電極形状設計、特に、予備検討においては課題として残されていた、出力ビームの横方向エミッタンスの劣化を最小限に留めて同時に戻り電子ビーム電力を大幅に削減することを可能とするため、主に図 3 に示した電極形状パラメータについて、2次元粒子シミュレーションを用いて最適化を行った。

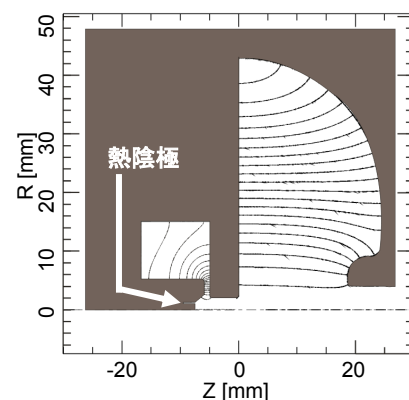
②高周波電力分岐供給系

図 4 に示すような主電源からの高周波電力分岐のための方向性結合器、位相器、可変減衰器、電力・位相モニタ等からなる高周波電力分岐供給系 (最大 40 kW) を整備し、動作試験と調整を行った。

また、高周波電子銃への交換設置に先立っ

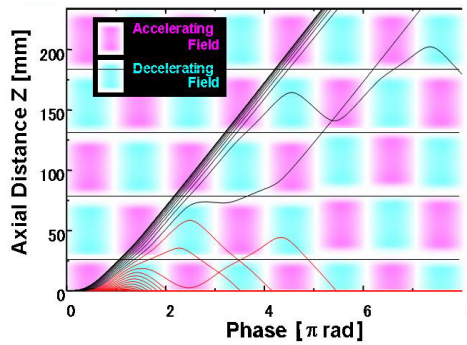


(a) 従来の熱陰極高周波電子銃

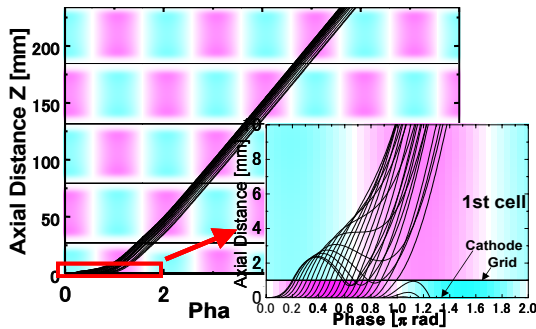


(b) 三極管型熱陰極高周波電子銃

図 1 高周波電子銃第 1 空胴の固有モード (軸対称)



(a) 従来の熱陰極 RF 電子銃



(b) 三極管型 熱陰極 RF 電子銃

図 2 高周波三極管構造による逆流電子削減の原理：電子銃内の一次元電子軌道（横軸は時刻，縦軸は進行方向距離）を表している。(a)従来の熱陰極高周波電子銃では図中赤線で示された約半数の電子が逆流して陰極 ($z=0$) に衝突しているが，(b)三極管型熱陰極高周波電子銃では逆流電子がほとんど無い。

て，熱陰極付き小型同軸空洞の単体での高周波印加試験，熱負荷試験等を行うための高真空テストベンチを製作した。

③高周波カップラ部の設計と原理実証機の開発

3次元電磁界解析コードを用いて高周波カップラ部の設計を行い，最終的に図5のように，熱陰極付き小型同軸空洞の背面より同軸導波管を同心に配し，同軸構造の内導体および熱陰極を柱状の支持板で支える方式を採用した。図5中の左側の同軸導波管から，テーパ管，柱状支持板で区切られた2つの半月形のカップリング孔を通して，熱陰極付き小型同軸空洞へ高周波電力を供給する。

空洞材質は無酸素銅とし，電磁界計算の結果，小型同軸空洞の無負荷内部 Q 値は 3950 となった。次に，前述①の2次元粒子シミュレーションにより求めた電子ビームアドミタンスから，必要投入電力とカップリング係数 β の関係を求めた。整合条件は $\beta = 8$ となったが，空洞には温度調整や高周波チューナーは設けず，代わりにカップリング係数 β を

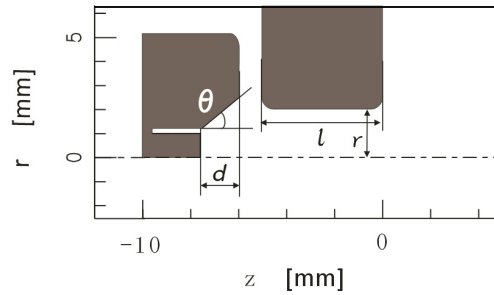


図 3 三極管型高周波電子銃の熱陰極付近拡大図と電極形状の最適化設計パラメータ

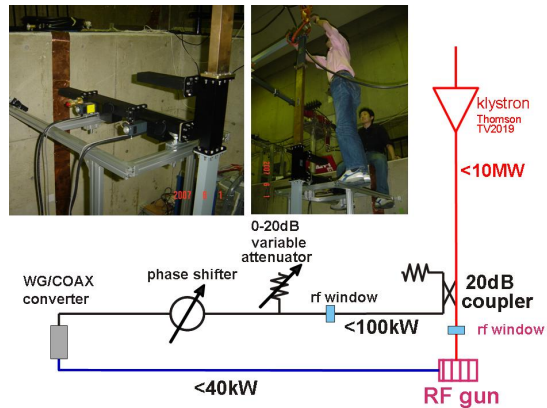


図 4 高周波電力分岐供給系

整合条件より大きくして周波数帯域を広くすることとした。熱陰極周辺の電極形状と小型同軸空洞形状は前述①の2次元粒子シミュレーションによる設計形状を基本とし，共振周波数 2.856 GHz， $\beta = 20$ となるように図5中の t ， w ， L を3次元電磁界コードを用いて調整した。

陰極材については，バリウム含浸型多孔質タングステンと LaB_6 を比較検討した。すなわち，前述①の2次元粒子シミュレーションで得られた戻り電子のエネルギー分布を用いて，陰極材への電子の侵入深さを考慮した熱解析を行って陰極表面の温度上昇を求め，戻り電子電力の削減により可能となる運転マクロパルス長を数値解析により評価した。

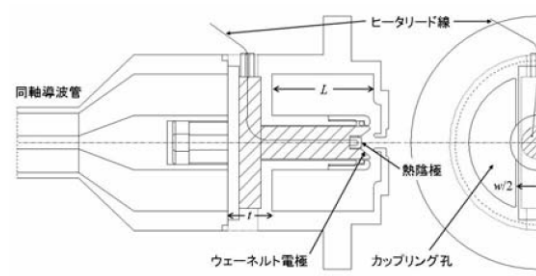


図 5 高周波カップラ部の設計

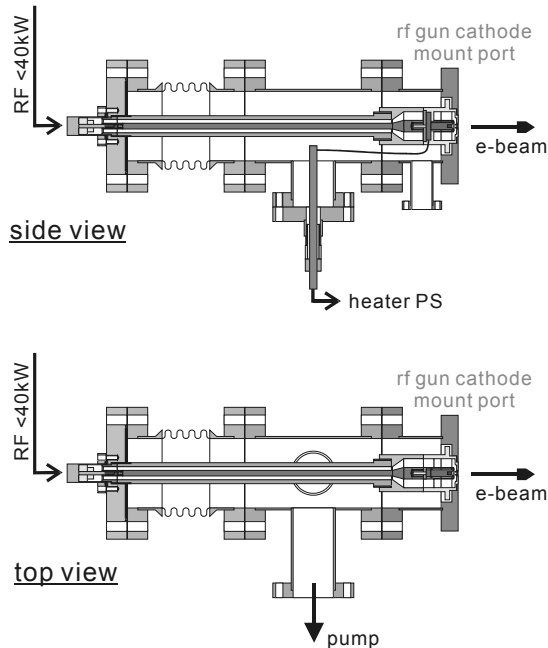


図6 既設4+1/2空洞高周波電子銃の陰極設置ポートへの熱陰極付き小型同軸空洞の設置

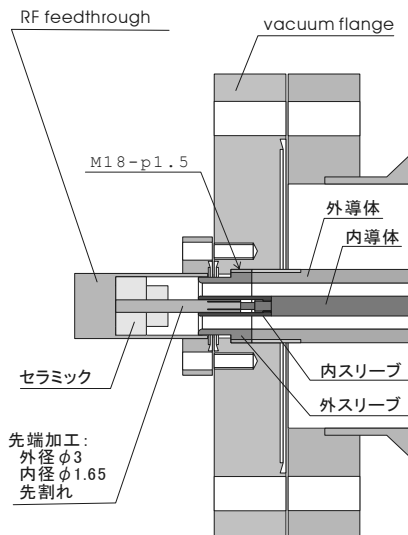


図7 高周波電力導入端子部の拡大図



図8 開発した熱陰極付き小型同軸空洞: 既設の熱陰極に代えて4.5空洞高周波電子銃に設置して、三極管型高周波電子銃を構成する。

その結果、 LaB_6 が優位であるものの、ほぼ同等性能が得られることが判明したため、動作温度の低く扱いやすいバリウム含浸型タングステンを採用した。

最後に、真空中への高周波電力、並びに、熱陰極ヒータ電力の導入部を製作した(図6)。特に高周波電力導入端子については、プロトタイプによる耐電圧試験と改良を経て、最終的に図7のように、放電が起こりやすい内導体同士および外導体同士の接続部を高周波電界に曝さないように、それぞれスリーブを設置することとした。

4. 研究成果

数値シミュレーションによる設計の結果、表1のように、同じエネルギー幅 $\Delta E_k/E_k$ で従来と比較すると、横方向エミッタンス $\epsilon_{n,r}$ を劣化させることなく、陰極への逆流電子ビーム電力 P_{back} を約80%削減することで既設電源性能限界の10 μs までの長パルス化が可能であることが分かった。さらに同時に、縦方向エミッタンスが大幅に改善され、ピーク電流 I_{peak} が十倍以上向上するとの解析結果を得た。

残念ながら計画していた原理実証機での性能評価試験には至らなかったが、本提案方式の元々のねらいであった逆流電子の削減によるマクロパルスの長パルス化に加えて、マイクロパルスの短パルス化、高ピーク電流化の可能性を見いだせたことは幸運であった。プロトタイプ試験と改良を経て、現在は、最終的に図8のような原理実証機の製作を終えて性能評価試験に着手している。

今後の展開として、本方式により設計計算通りの長マクロパルスかつ短パルス高ピーク電流性能が得られれば、テラヘルツ域のピーク強度10kW級の共振器型自由電子レーザーを小型卓上サイズで実現することができる可能性があると考えている。

表1 従来の熱陰極高周波電子銃と三極管型との性能比較(数値シミュレーション)

	従来型	三極管型
ΔQ [pC/bunch]	28.9	58.9
P_{back} [kW]	18	3.6
$\epsilon_{n,r}$ [π mm mrad]	2.0	1.6
ϵ_z [psec keV]	38	5.7
I_{peak} [A]	10	181
マクロパルス長 [μs]	5.1	10

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① T. Shiiyama, K. Kanno, K. Masuda, H. Zen, S. Sasaki, T. Kii, H. Ohgaki and E. Tanabe, "A

Triode-Type Thermionic RF Gun for Drastic Reduction of Back-Streaming Electrons”, *Proc. of 29th FEL international conference* (2008) 398-401, 査読有.

- ② K. Masuda, K. Kusakame, T. Shiiyama, H. Zen, T. Kii, H. Ohgaki, K. Yoshikawa and T. Yamazaki, “Design Study of RF Triode Structure for the KU-FEL Thermionic RF Gun”, *Proc. of 28th International Free Electron Laser Conference* (2006) 656-660, 査読有.

[学会発表] (計 5 件)

- ① 増田 開, 椎山 拓己, 菅野 浩一, 大垣 英明, 紀井 俊輝, 全 炳俊, 佐々木 怜, 田辺 英二, 「三極管型熱陰極高周波電子銃の開発」, 日本原子力学会 2008 春の年会, 2008 年 3 月 26-28 日, 大阪大学吹田キャンパス.
- ② 椎山 拓己, 増田 開, 菅野 浩一, 全 炳俊, 佐々木 怜, 紀井 俊輝, 大垣 英明, 田辺 英二, 「小型中赤外 FEL 用電子源としての三極管型熱陰極高周波電子銃の開発」, 第 14 回 FEL と High-Power Radiation 研究会, 2008 年 3 月 6-7 日, 東北大学.
- ③ 椎山 拓己, 菅野 浩一, 増田 開, 全 炳俊, 紀井 俊輝, 大垣 英明, 田辺 英二, 「三極管構造熱陰極型高周波電子銃の設計」, 第 4 回日本加速器学会年会, 2007 年 8 月 1-3 日, 和光市民文化センターサンアゼリア.
- ④ 増田 開, 椎山 拓己, 菅野 浩一, 加藤 将太, 全 炳俊, 紀井 俊輝, 大垣 英明, 吉川 潔, 山崎 鉄夫, 田辺 英二, 「三極管構造による熱 RF 電子銃における逆流電子の低減」, 第 4 回高輝度・高周波電子銃研究会, 2006 年 11 月 20-21 日, 東海村テクノ交流館リコッティ.
- ⑤ 増田 開, 楠亀 弘一, 椎山 拓己, 全 炳俊, 紀井 俊輝, 大垣 英明, 吉川 潔, 山崎 鉄夫, 「三極管構造を用いた熱陰極型高周波電子銃の設計」, 日本原子力学会 2006 年秋の年会, 2006 年 9 月 27-28 日, 北海道大学.

[その他]

- ① 水野 明彦, 増田 開, 「高輝度電子銃シミュレーション研究会報告」, *加速器* (日本加速器学会) 4-1 (2007) 55-56.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増田 開 (MASUDA KAI)
京都大学・エネルギー理工学研究所・
准教授
研究者番号：80303907