

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月31日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21740398

研究課題名（和文） プラズマデバイスを用いたチェレンコフ EUV 光源開発

研究課題名（英文） Development of Cherenkov EUV source using plasma devices

研究代表者

犬伏 雄一 (INUBUSHI YUICHI)

独立行政法人理化学研究所・ビームライン開発チーム・特別研究員

研究者番号：40506250

研究成果の概要（和文）：

本研究ではチェレンコフ EUV 光源のエミッター構造、電子ビーム条件を明らかにした。水の窓領域の波長では、スカンジウムが最も効率的なエミッターであることが分かった。更に高効率な光源のために表面に周期構造をもつエミッターを考案し、電子ビームの傾き温度とエミッターの構造の周期の最適条件、及びチェレンコフ光の光量を理論計算により導いた。これらの成果は、レーザー生成相対論電子ビームを用いたチェレンコフ EUV 光源開発の指針を明らかにするものである。

研究成果の概要（英文）：

In this study, I investigated structure of an emitter and electron beam condition for Cherenkov EUV radiation. I found Scandium is the most efficient emitter in water-window region. In order to enhance the efficiency of Cherenkov EUV radiation, new emitter with periodic structures is proposed. Slope temperature and period of emitter structure are optimized, and intensity of Cherenkov EUV radiation is calculated. These results show the road map for efficient Cherenkov EUV radiation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：

- (1) 高エネルギー密度科学 (2) プラズマデバイス (3) チェレンコフ光 (4) 超短パルスレーザー (5) EUV 光

1. 研究開始当初の背景

近年のレーザー技術の発展により、瞬間的に MeV(百万電子ボルト)を超える電子を 10^{12}Acm^{-2} (1兆 Acm^{-2}) もの高い電流密度で生成することが可能となった。また、過渡的なプラズマを利用して高エネルギー密度粒子の伝搬制御を行う新しいデバイス(プラズマデバイス)が提案され、粒子のエネルギー密度を高く保ちながら伝搬させる手法の開発が進められている。すでに、このデバイスによって従来の 20~30 倍程度のエネルギー密度が得られ、また、その伝播拡がり角を 5 度以下に抑制できることが確認されており、その幾何学配置に依存する生成電子エネルギーの特性評価研究も盛んに行われている。この制御された高エネルギー密度相対論電子ビームを利用することにより、テラヘルツ波や X 線などの高輝度電磁波源の実現が期待されており、本研究計画では、申請者が新たなプラズマデバイスを考案しチェレンコフ光放射へと応用する。得られるチェレンコフ光は指向性、単色性を有し、波長可変であるため、物性診断、水の窓領域における生物研究への応用など様々な用途が考えられる。

2. 研究の目的

本研究計画では、申請者が新たに考案した高エネルギー密度電子制御プラズマデバイスにより超高強度レーザー生成相対論電子ビームの伝播を制御し、それにより励起される、単色性、指向性、波長可変性を有する極端紫外光領域のチェレンコフ光 (チェレンコフ EUV 光) の光源開発を目的とした研究を行う。

3. 研究の方法

一般的に EUV、X 線領域における物質の屈折率は 1 より小さいため、チェレンコフ放射は発生しない。しかし、幾つかの物質は、吸収端近傍のごく狭い波長領域で 1 を超える。この場合、物質中の相対論的電子ビームは物質中の光速を上回ることが可能であり、チェレンコフ放射を起こすことができる。この EUV、X 線領域のチェレンコフ光 (以下、チェレンコフ EUV 光とよぶ) は、吸収端近傍でのみ発生するため、単色である。また、その波長は表 1 に示すように、エミッターとなる物質を変えることによって波長可変である。物質の屈折率が大きくなるほど、チェレンコフ EUV 光放射のための電子の閾値エネルギーが小さくなる。

電子ビームが物質中を直線的に伝搬する場合を考える。その物質の複素屈折率の実部を n とすると、チェレンコフ光の放射角度 θ と光子数 N は下記の式で表わされる。

$$\cos \theta = \frac{c}{nv} \quad (1)$$

$$\frac{d^2 N}{d\epsilon dz} = \frac{2\pi\alpha}{hc} (1 - \cos^2 \theta) \quad (2)$$

ここで、 c は真空中の光速、 v は物質中の電子の速度である。 ϵ はチェレンコフ EUV 光の光子エネルギー、 a は物質の微細構造定数である。 z は物質中における電子の伝搬距離を表わす。レーザープラズマにより生成される高エネルギー電子によってチェレンコフ光を発生させる場合、式(1)、(2)に相対論効果を考慮する必要があり、下記の式(3)、(4)に修正される。

$$\cos \theta = \frac{\gamma}{n\sqrt{\gamma^2 - 1}} \quad (3)$$

$$\frac{d^2 N}{d\epsilon dz} = \frac{2\pi\alpha}{hc} \left[1 - \frac{\gamma^2}{n^2(\gamma^2 - 1)} \right] = \frac{2\pi\alpha}{hc} \left\{ 1 - \frac{\left(1 + \frac{E}{E_0} \right)^2}{n^2 \left[\left(1 + \frac{E}{E_0} \right)^2 - 1 \right]} \right\} \quad (4)$$

ここで、 γ はローレンツ因子、 E は電子のエネルギー、 E_0 は 0.511 MeV である。本研究では、上記の関係式を用い、高効率なチェレンコフ EUV 光源を実現するために必要なエミッター条件 (物質、形状)、電子ビームパラメータを明らかにした。

表 1 水の窓領域のチェレンコフ EUV 光

Emitter	K	Ca	Sc	Ti	V
photon energy (eV)	295	346	400	454	512
real part of refractive index	1.002	1.003	1.007	1.004	1.003
threshold energy (MeV)	7.4	6.8	3.8	5.6	5.8

4. 研究成果

図1は、電子ビームエネルギーに対するチェレンコフ EUV 光の強度を示している。ここで、強度は100MeVの電子エネルギーの場合の強度で規格化している。全てのエミッターについて、強度は閾値エネルギーから急激に増加するが閾値エネルギーの数倍のエネルギーではほぼ飽和している。これは、閾値エネルギー付近を除き、チェレンコフ EUV 光の強度は電子エネルギーに依存しないということが明らかとなった。従って、エネルギー拡がりをもつ超高強度レーザー生成電子ビームが有効であるといえる。

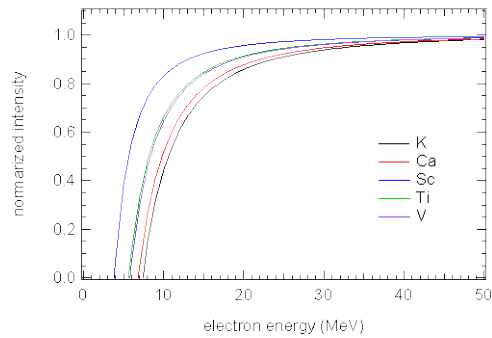


図1 電子エネルギー依存性

電子ビームの最適パラメーターを求めるために、電子ビームの傾き温度に対するチェレンコフ EUV 光の強度を計算した。このとき、電子ビームの角度拡がりをもつ超高強度レーザー生成電子ビームが有効であるといえる。電子ビームの角度拡がりを1度と仮定し、その条件を図2-(a)に示す。また、この計算はエミッター中での吸収を考慮している。吸収長がサブミクロンであるため、この配置ではエミッターの長さ L は $10\mu\text{m}$ 程度で十分である。図3の実線は、各エミッターのレーザーからチェレンコフ EUV 光への変換効率を示している。全てのエミッターにおいて、10MeV程度の温度が最適であることがわかった。エミッターをスカンジウムとした場合の強度が最も高い。その理由は、スカンジウムの屈折率が最も大きいためである。本計算では、レーザーから電子ビームへの変換効率を一定としており、これは電子温度が高くなると電子数が少なくなることを示唆している。そのため、ここで求めた最適電子温度は図1の単色の場合と比較し低いエネルギーとなっている。このときの最大変換効率は 1.2×10^{-5} であった。

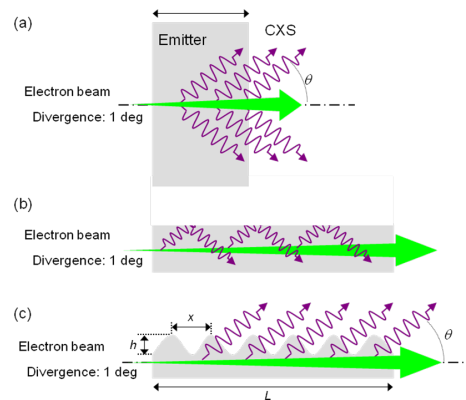


図2 エミッター配置

変換効率向上のためには電子ビームの伝搬距離を伸ばす必要がある。しかし、図2-(a)の配置では、エミッターを厚くしたとしてもエミッター内部での吸収が強く、外部へ放射されるチェレンコフ EUV 光の強度を上げることは不可能である。図2-(b)の配置はエミッターのごく表面を電子ビームが伝搬しており、このときエミッター内部での吸収は小さくなるが、エミッター界面での全反射のため、外部へ放射されない。この問題を回避するため、図2-(c)に示す新しいエミッター形状を考案した。このエミッターは表面に正弦波状の周期構造を有しており、界面でのチェレンコフ放射の角度が図2-(b)の場合と比較し大きくなっており、全反射を抑制できる。図4は変換効率の周期構造依存性の計算結果である。横軸は正弦波の振幅 h であり、一般的な回折格子を基準として幾つかの周期長 x について計算を行った。このとき、エミッター長さは1mm、電子温度は15MeVであった。変換効率は周期長 x の減少に従って増加し、振

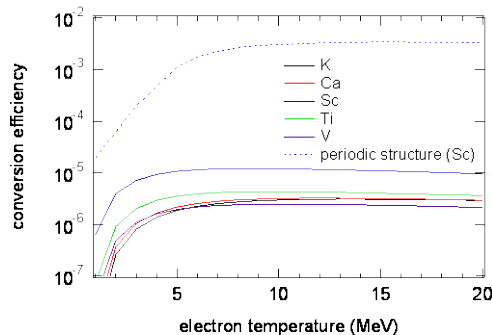


図3 電子ビーム温度依存性

幅 h については最適値があることが明らかとなった。この最適値は全反射と吸収から決まっている h が小さい場合は全反射が、 h が大きくなると吸収が支配的となる。 $x=1/3600$ mm、 $h=10$ nm の場合の変換効率を図3の破線で示す。最大変換効率は電子温度は15MeVの場合の 3.4×10^{-5} であり、図2-(a)の配置のおよそ200倍である。

図5-(a)は上記の場合のチェレンコフ EUV 光の角度分布と光子エネルギーを示している。電子ビーム軸から4度の方向に396.9eVのEUV光が最も強く放射される。表1での屈

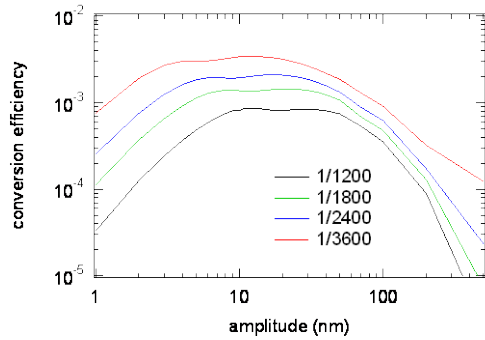


図4 周期構造依存性

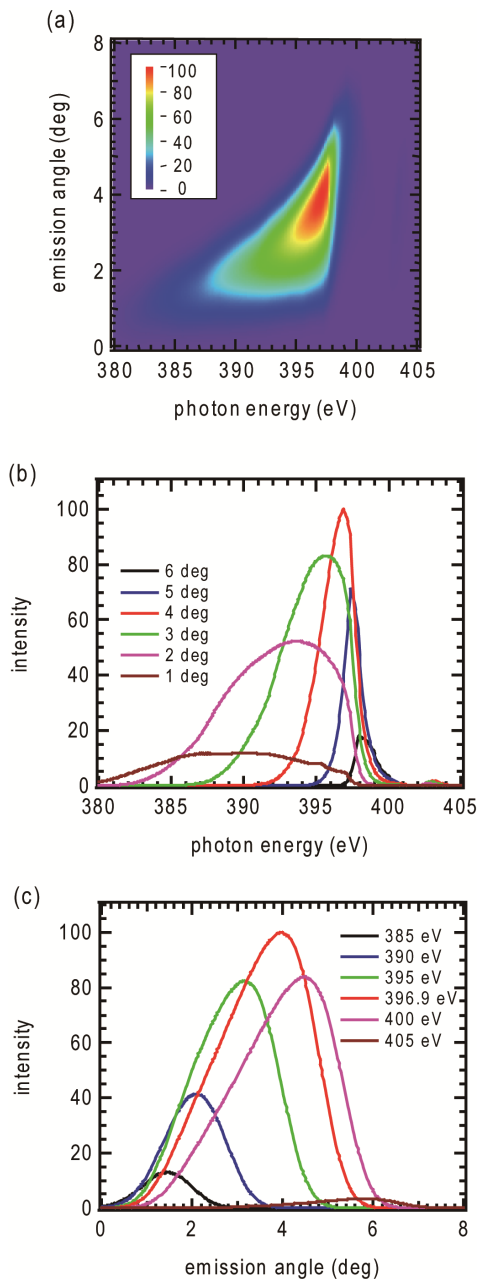


図5 チェレンコフ EUV 光のプロファイル

ークは吸収のために、2.6eV 異なっている。図 4-(b)は同条件における、各光子エネルギーの角度分布を示している。角度分布はコーン状になっており、そのピークの角度、強度は光子エネルギーに強く依存している。396.9eV の半値全幅は 2.5° である。図 4-(c)のようにスペクトルは放射角度によって大きく変化する。 4.0° におけるスペクトルのバンド幅は 0.68% である。レーザーが 1J と仮定すると、輝度は 1.5×10^{20} photons/mm² mrad² sec 0.1%b.w. となる。

まとめとして、本研究課題では、超高度レーザー生成電子ビームによって励起されるチェレンコフ EUV 光源の評価を行った。全反射、吸収を抑制し、効率を向上させるために表面に周期構造を有したエミッターを考案し、その場合のチェレンコフ EUV 光の特性を評価した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① Y. Inubushi, S. Morimoto, T. Tanaka, Z.L. Chen, Z. Jin, Y. Mizuta, H. Yoneda, J. Ishida, Y. Yamaguchi, M. Nagasono, M. Yabashi, A. Higashiya, T. Ishikawa, H. Kimura, H. Ohashi, and R. Kodama, "Plasma photonic devices with complex refractive index in EUV region" *Journal of Physics: Conference Series* 244, 022039-1 - 022039-4, (2010). (査読有)

[学会発表] (計 2 件)

① Y. Inubushi, R. Kodama, T. Ishikawa, D. Kimura, H. Kimura, T. Kumagai, S. Morimoto, M. Nagasono, K. Nakatsuka, H. Ohashi, T. Ohashi, F. Sato, T. Sato, T. Tanaka, T. Togashi, K. Tono, M. Yabashi, Y. Yamaguchi, and H. Yoneda, "Nonlinear absorption in metals using intense EUV-FEL", *International Workshop on Warm Dense Matter 2011*, 米国、モントレール、2011年6月6日。

② Y. Inubushi, S. Morimoto, T. Tanaka, Z.L. Chen, Z. Jin, Y. Mizuta, H. Yoneda, J. Ishida, Y. Yamaguchi, M. Nagasono, M. Yabashi, A. Higashiya, T. Ishikawa, H. Kimura, H. Ohashi, and R. Kodama, "Plasma photonic devices with complex refractive index in EUV region", *The Sixth International Conference on Inertial Fusion Science and Applications*, 米国、サンフランシスコ、2009年9月8日。

[図書] (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

犬伏 雄一 (INUBUSHI YUICHI)
独立行政法人理化学研究所・ビームライン開
発チーム・特別研究員
研究者番号：40506250