

[1 p-3]

A CONCEPTUAL DESIGN OF A SUPER SMALL SIZED X-RAY SYNCHROTRON RADIATION SOURCE

SUZUKI Y. and IKEHATA T^{*}.

Tokai Research Establishment
 Japan Atomic Energy Research Institute
 Tokai-Mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

ABSTRACT

A super small-sized, table-top X-ray synchrotron radiation source is proposed and designed conceptually. As for the main components, firstly, a plasma accelerator tube is used for the relativistic electron acceleration which is based on the principle of laser wake field acceleration and secondly a plasma micro-undulator is also used instead of the usual magneto-undulator. Both the main plasma devices, the size of which are only less than 0.1 and 0.01 cc respectively, are able to be formed with the combined techniques of laser interference and resonant photo-ionization. Moreover, new concepts are added on the design of component devices: The optical interference device, laser system and control system. The devices of the electron gun, beam transport and atomic vapor sources are also designed to be efficient and of high performance and are able to be small-sized.

超小型 X 線放射光源の概念設計

1. はじめに

先に、著者等は、レーザー干渉法と共鳴イオン化法を組み合わせ、プラズマ・マイクロアンジュレーターを作り、小型の加速器によってでも放射光の短波長化が図れること、さらに、同じ手法を用いて、プラズマ・オプティカルガイド(プラズマ加速管と呼ぶ)を作り、それが極短レーザー光による航跡波のガイド(導波管)となり、電子を加速できること、すなわち、超小型のレーザー航跡波加速器を作ることができる可能性を示した¹⁻²⁾。したがって、このプラズマ・マイクロアンジュレーターとプラズマ加速管とを組み合わせれば、極めて小型で簡便なテーブル・トップの X 線放射光源が可能である。

プラズマ・マイクロアンジュレーターとは、レーザー光の干渉縞によりプラズマのシート列を作るもので、 $10\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ のピッチ長で $K=1$ 程度のアンジュレーターを作ることができる。すなわち、長さ 0.1cm のアンジュレーターでピッチ数が 100 のものを作ることができる。

プラズマ加速管とは、プラズマ・オプティカルガイドであり、円柱状のプラズマで軸上近くが周辺に比べプラズマの密度が低いものである。

この場合、誘電率の勾配が、軸近傍では、 $\partial n'(r) / \partial r < 0$ となり、光の屈折率を利用して発散をふせぎ光を導くことができる。中を通るレーザー光のエネルギー密度を薄めないように $10\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ の細い内径のものを考える。

本稿では、まず、新しい光学系によるより効率的なプラズマ加速管の作り方を述べ、この原理に基づく超小型加速器とプラズマ・マイクロアンジュレーターとを組み合わせ超小型テーブルトップ X 線放射光源を提案する。

2. 新しいプラズマ加速管の作り方

ここでは、同軸円筒状プラズマの作り方を提案する。

図 1 のような 2 重円錐状の光学ミラー系をつくり干渉系を作る。この干渉縞に

よりプラズマを作れば同軸円柱状のプラズマ加速

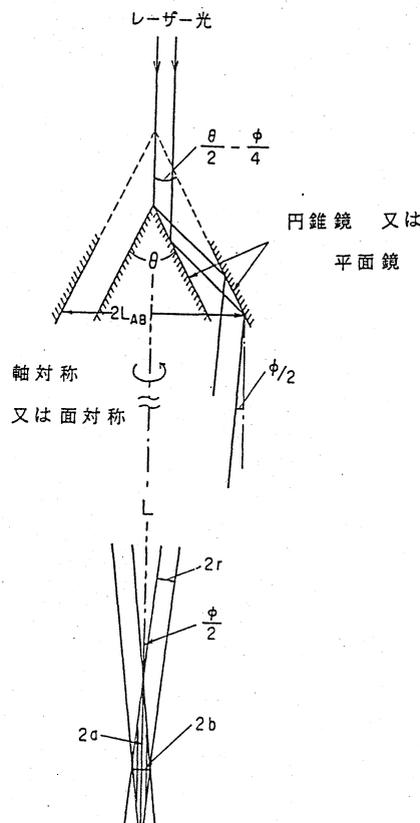


図 1 プラズマ加速管 (軸対称の場合) 又はプラズマ・マイクロアンジュレーター (面対称の場合) の干渉用光学鏡

* Faculty of Engineering, Ibaraki University

て、レーザー光を直角に入射する。レーザはNd : YAGレーザを基本波としその高調波増幅、およびOP0を用い、波長は441.96nmをとって2光子電離をおこさせる。最少パルス幅1ns以下、10mJ程度のものがよい。電離すべき原子はNdとし、その原子蒸発源については後述する。

4) 航跡波励起用レーザ

このレーザはとくに大出力でパルス幅がフェムト秒単位の短いものがよいことから T^3 レベルのレーザを用いる。余計な部分の電離することを避けるため、プラズマ加速管のレーザ光とは、異なる波長とする。YAGレーザの3倍高調波程度ではどうか。これによって出来る航跡波の波長は、プラズマ密度 $n_p = 10^{22}/m^3$ としてプラズマ振動数 $f_p = 9 \times 10^{11}$ となり、その波長 $\lambda = 0.33$ mmとなる。

5) プラズマ・マイクロアンジュレーター

光学系は半透明鏡の代わりに、図1の軸対称を面対称と考えた屋根型鏡(平面鏡の組み合わせ)を用い、大出力レーザー光に耐えられるものを考える。底(ひさし)の開き角はレーザーからプラズマ・マイクロアンジュレーター部までの距離とプラズマ・マイクロアンジュレーターのピッチ数や長さを勘案して決定すればよい。プラズマ・マイクロアンジュレーターのピッチ $\lambda_c = d = 13$ μm, 長さ $2b = 1$ mm程度とすれば、プラズマ加速管用の干渉系と同じ計算が使え、この場合は屋根型ではあるが、 $\phi/2 = 1^\circ$ 、 $\lambda_c = 441.96$ nm、とし $r = 0.5$ mmとレーザー光の径をとれば長さ $2b = 1$ mmとなる。また、 $L = 300$ mmとすれば、 $L_{\text{eff}} = 5.1$ mmとなる。レーザーDは、プラズマ加速管用と同じでよからう。

6) 原子蒸発源

原子蒸発源は真空中に置かれ、パルス的に原子を蒸発させることが、周囲を汚すことが少なく、ここでの、レーザー光によるNdの蒸発の可能性を考える。金属の気化熱は高く効率の点で難点はあるが、近くに置かれたNdターゲットにレーザー光を当てるという装置の簡便さを考えこの方式をとる。このためのレーザー光としては、Nd : YAGレーザをとり4倍高調波を用い、10ns、10mJとする。Ndのターゲットはそれぞれの機器から1cm程度離れた所に置けば10μs事前に照射すればよい。

7) スイッチング・マグネットとベンディング・マグネット

これは、電子のエネルギースペクトルの測定に用いると同時に、電子ビームを曲げて航跡波用レーザー光のプラズマ・マイクロアンジュレーター部への干渉を避けるためである。これも電子ビームをフォーカスすることができる。最後のベンデ

ィング・マグネットは通常のもので電子をビームダンプへと導くとともに放射光と分離するためのものである。ともに、内置き永久磁石型で作ることができる。

8) 真空チェンバーと機器配置の概要

上記のような各機器の間隔は10cmあれば十分で、半径20cmの真空チェンバーがあればよい。10本程度のポートは必要で真空排気、レーザービーム、電子ビーム、モニターなどのために用いる。

9) 制御系

全体の実験は10Hzで行うことにする。今仮に機器間の距離を下記のように決めるとレーザー光の到達時間差も下記ようになる。

フォトカソード 60cm プラズマ加速器 15cm プラズマ・マイクロアンジュレーター、これを光速で表現すれば、フォトカソード 2ns プラズマ加速器 0.5ns プラズマ・マイクロアンジュレーターとなる。

もっとも厳しい時間制御は電子バンチがプラズマ加速管部にあるときに航跡波を励起することで10psの精度を要求される。この間の時間制御は光を飛ばす距離を用いたディレイラインで制御可能である。

5. まとめ

プラズマ加速管は長さ10mmを想定しているが、最近のシュミレーション計算のように30GV/mの加速電場が得られるとすると、300MeVとなる。実効的な加速距離をその1/3と考えると100MeVと想定する。

プラズマ・マイクロアンジュレーターとしては $\lambda_c \times N \equiv 10\mu\text{m} \times 100$ ピッチ = 1mmを考える。ここでKはアンジュレーター・パラメーターでプラズマの密度に比例し、Nはピッチ数である。N値は100で十分である。K値が1より小さい場合には、 $K \times N$ の2乗に放射光の発生量が比例するので、プラズマの密度が十分得られぬときには、Nで稼ぐことはできる。

ここで提案された方法により、100MeVの電子ビームと10μm プラズマ・マイクロアンジュレーターを作ることができれば、発生する光の波長は $\lambda \doteq \lambda_c / 2\gamma^2$ から0.1nm程度のX線が得られることになる。

FELか放射光源かは、加速された電子ビームの性能(エミッタンス、エネルギー幅、電流)に依存する。その性能が十分によい場合には、これによって、誘導放射の増幅が可能になりコヒーレント光が発生できることになる。

参考文献

1. 鈴木 康夫: 核融合研究 68 488 (1992).
2. 鈴木 康夫, 池畑 隆: JAERI-Research 95-009 (1995), 95-028, 95-035など