

[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 μm から 100 μm 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 0.1 cm 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 μm から 100 μm 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

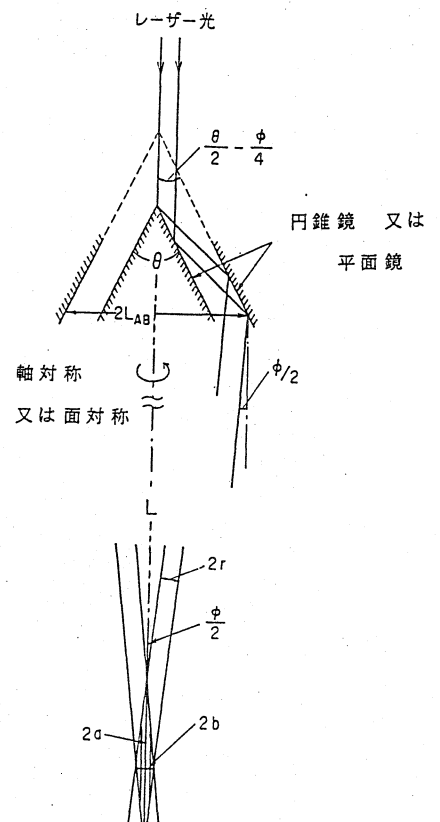


図 1 プラズマ加速管(軸対称の場合)又はプラズマ・マイクロアンジュレーター(面対称の場合)の干渉用光学鏡

* Faculty of Engineering, Ibaraki University

管となり、プラズマ加速管の径 d 、長さ a 、はそれぞれ、

$$d = \lambda_L / 2 \sin(\phi/2),$$

$$a = r / \sin(\phi/2)$$

となる。ここではプラズマ加速管の長さとして中心軸上の長さではなく、円筒部の長さとして半分の a をとっている。具体的な数値を入れてみれば、 $\phi/2 = 1^\circ$ 、 $r = b = 0.5 \text{ mm}$ 、 $\lambda_L = 441.96 \text{ nm}$ とすれば、 $a = 30 \text{ mm}$ 、 $d = 13 \mu\text{m}$ 、しかも、 $L = 300 \text{ mm}$ とすれば、 $L_{As} = 5.1 \text{ mm}$ となり、十分実用に耐えるものとなる。ただし、この方式は中心軸上がプラズマであり、 $r = d$ のところに円筒状にプラズマができると言う同軸型のプラズマ加速管となる。つまり、中心軸上でプラズマ航跡波用プラズマを作り、外周プラズマで航跡波用レーザー光のオプティカルガイドの働きをさせることになる。ここで、レーザー波長、 $\lambda_L = 441.96 \text{ nm}$ としたのは Nd の 1 波長 2 段階イオン化を採用して選定している。これにより、プラズマに運動エネルギーを与えることなく静かで高密度 ($10^{15} / \text{cc}$ 以上) の構造プラズマを作ることができる。

3. 概念設計

レーザーシステムと全体構成を図 2 に示す。

まず電子銃はフォトカソード (レーザー A) により、電子を発生させ直ちに S バンドの高周波加速部で 2 MeV 程度まで電子の速度を高める。出てきた電子はトリプルフォーカス・マグネットを用いて 270 度回転させて、プラズマ加速管部にフォーカスさせる。

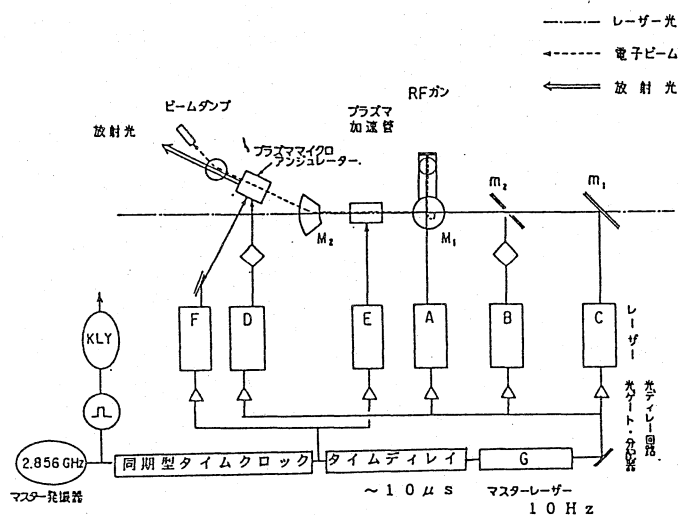


図 2 X線放射光源の概念図

プラズマ加速管から出てきた電子は、スイッチャーマグネットで曲げられ、マイクロアンジュレーター (レーザー D) 部を通過し、その際放射光を放射する。放射光を出した電子はベンディングマ

グネットにより曲げられ捨てられる。レーザーとしては、プラズマ加速管用にレーザー B, C をプラズママイクロアンジュレーター用の原子蒸気発生用にレーザー E, F を準備する。

トリプルフォーカス・マグネット、プラズマ加速管、スイッチャーマグネット、マイクロアンジュレーター部はひとつの真空チェンバーに入れる。

この実験装置の設計は、タイムシーケンス制御が難しい。事象間の時間間隔があるところでは 10 ピコ秒単位であり、実験の再現性を良くするには、ジッターを最少にする必要がある。しかもレーザー光を多用することから、それぞれの発振時刻をどのように制御するかが基本となる。そこで、時間の標準を設定するため、S バンドの高周波に同期した、同期型レーザー (レーザー G) をマスターレーザーとして採用し、そのレーザー光の増幅レーザー、高調波レーザーで全体を構成することとする。そして、各レーザー発振時間制御の基本を光の飛ぶ距離での時間差を利用することとする。(飛行距離調整用ディレイライン等は図 2 では簡略化してある。) 各機器の概要は次のようになる。

1) 電子銃

フォトカソード付き RF ガンを採用する。加速部の高周波 (RF) には、実績のある S バンドを選ぶ。加速された電子エネルギーの下限は次のように設定する。ほぼ光速で進む航跡波に波乗りできるだけの初速度を電子に持たせる必要がある。ここで航跡波の波乗りの条件として航跡波 (波長 $= \lambda_w$) の頂点をはさむ $\pm \lambda_w/4$ に電子がある時としよう。この場合、 $t = 0$ で航跡波のフロントにあり初速度 $\beta (= v/c)$ で進む電子が、 $\lambda_w/2$ の航跡波に乗っていられる時間は加速電場を無視して考えて最低 $\lambda_w/2c(1-\beta)$ となり、その間の移動距離は静止系で $\lambda_w\beta/2(1-\beta)$ となる。つまり、加速距離を稼ぐには、 β を 1 に近づける必要がある。

ここでは、 $\beta = 0.95$ (約 2 MeV) として、 λ_w の 10 倍の加速距離を最低限としたい。

2) トリプルフォーカス・マグネット

電子銃からプラズマ加速管の間には、トリプルフォーカス・マグネットを入れ、プラズマ加速管の領域に電子ビームの収束点が来るようにするとともに、プラズマ加速管を作るためのレーザー光の通る道をも作るようにする。できるだけ小型のものが望ましいので、ギャップを 1 cm 程度として、内置き永久磁石型トリプルフォーカス・マグネットを用いることも可能であろう。

3) プラズマ加速管

プラズマ加速管は、前述のような干渉用光学系を用いる。ただし、軸方向に航跡波励起用レーザー光の通るパスを作るため、穴空きの反射鏡を用い

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441.96 nmをとって2光子電離をおこさせる。最少パルス幅1 ns以下、10 mJ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ー光とは、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 $\lambda_c = d = 13$ μ m, 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、ここでは、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と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、10 ns、10 mJとする。Ndのターゲットはそれぞれの機器から1 cm程度離れた所に置けば10 μ s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、内置きの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10 cmあれば十分で、半径20 cm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10 Hz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 60 cm プラズマ加速器 15 cm 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 2 ns プラズマ加速器 0.5 ns 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10 ps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10 mm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30 G V/mの加速電場が得られるとすると、300 MeVとなる。実効的な加速距離をその1/3と考えると100 MeV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 = 1 mm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、100 MeVの電子ビームと10 μ m 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0.1 nm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