

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2014-13658  
(P2014-13658A)

(43) 公開日 平成26年1月23日(2014.1.23)

(51) Int.Cl.  
H05H 13/04 (2006.01)

F I  
H05H 13/04

テーマコード(参考)  
2G085

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2012-149718 (P2012-149718)  
(22) 出願日 平成24年7月3日(2012.7.3)

(71) 出願人 000005083  
日立金属株式会社  
東京都港区芝浦一丁目2番1号  
(71) 出願人 504151365  
大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構  
茨城県つくば市大穂1番地1  
(74) 代理人 110000729  
特許業務法人 ユニアス国際特許事務所  
(72) 発明者 幸田 勉  
大阪府吹田市南吹田二丁目19番1号 N  
E O M A X エンジニアリング株式会社吹田  
製作所内

最終頁に続く

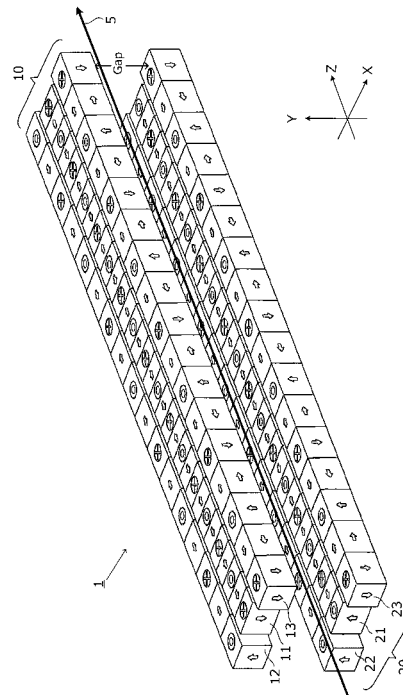
(54) 【発明の名称】 挿入光源

(57) 【要約】

【課題】省スペース化を実現しつつもユーザーの多様な要請に対応できる挿入光源を提供する。

【解決手段】第1磁石列11のX方向に係る両側には第2磁石列12及び第3磁石列13が配置され、第1磁石列11に対してY方向に離間して第4磁石列21が配置され、第4磁石列21のX方向に係る両側には第5磁石列22及び第6磁石列23が配置される。第1磁石列11及び第4磁石列21のうちの少なくとも一方が、他方に対してZ方向に移動可能であると共に、第2磁石列12及び前記第3磁石列13の組と第5磁石列22と第6磁石列23の組のうちの少なくとも一方の組が、他方の組に対して前記Z方向に移動可能に構成されている。

【選択図】 図1A



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

第 1 方向に磁化された第 1 磁石、第 1 方向に直交する第 2 方向に磁化された第 2 磁石、前記第 1 磁石の前記第 1 方向に係る磁化を打ち消す方向に磁化された第 3 磁石、及び前記第 2 磁石の前記第 2 方向に係る磁化を打ち消す方向に磁化された第 4 磁石を、前記第 1 方向に直列に配置してなる 1 単位が繰り返し配列されて形成される磁石列を 6 列有する構成であって、

前記磁石列は、第 1 磁石列、第 2 磁石列、第 3 磁石列、第 4 磁石列、第 5 磁石列、及び第 6 磁石列からなり、前記第 1 磁石列と前記第 4 磁石列を構成する各磁石のうち、少なくとも前記第 1 磁石と前記第 3 磁石、前記第 2 磁石と前記第 4 磁石の前記第 1 方向に係る長さはそれぞれ同一であり、前記第 2 磁石列、第 3 磁石列、第 5 磁石列、及び第 6 磁石列を構成する各磁石のうち、少なくとも前記第 1 磁石と前記第 3 磁石、前記第 2 磁石と前記第 4 磁石の前記第 1 方向に係る長さはそれぞれ同一であり、

前記第 1 磁石列の、前記第 1 方向及び前記第 2 方向に直交する第 3 方向に係る両側には前記第 2 磁石列及び前記第 3 磁石列が配置され、前記第 1 磁石列に対して前記第 2 方向に離間して前記第 4 磁石列が配置され、前記第 4 磁石列の前記第 3 方向に係る両側には前記第 5 磁石列及び前記第 6 磁石列が配置され、

前記第 1 磁石列及び前記第 4 磁石列のうちの少なくとも一方が、他方に対して前記第 1 方向に移動可能であると共に、前記第 2 磁石列及び前記第 3 磁石列の組と前記第 5 磁石列と前記第 6 磁石列の組のうちの少なくとも一方の組が、他方の組に対して前記第 1 方向に移動可能に構成されていることを特徴とする挿入光源。

## 【請求項 2】

前記第 1 磁石列及び前記第 4 磁石列は、それぞれの前記第 2 磁石と前記第 4 磁石が前記第 2 方向に対向し、前記第 2 磁石列及び前記第 5 磁石列、並びに前記第 3 磁石列及び前記第 6 磁石列は、それぞれの前記第 1 磁石と前記第 3 磁石が前記第 2 方向に対向し、前記第 2 磁石列及び前記第 3 磁石列、並びに前記第 5 磁石列及び前記第 6 磁石列は、それぞれの前記第 2 磁石と前記第 4 磁石が前記第 3 方向に対向する磁石配置状態を基準として、

前記第 1 磁石列の前記 1 単位の前記第 1 方向に係る長さを  $y$ 、前記第 2 磁石列の前記 1 単位の前記第 1 方向に係る長さを  $x$  とし、自然数を  $n$  としたとき、前記第 1 磁石列及び前記第 4 磁石列のうちの少なくとも一方が他方に対して前記第 1 方向に  $(2n - 1)y / 2$  の距離の移動が可能であり、前記第 2 磁石列及び前記第 3 磁石列の組と前記第 5 磁石列と前記第 6 磁石列の組のうちの少なくとも一方の組が、他方の組に対して前記第 1 方向に  $(2n - 1)x / 2$  の距離の移動が可能に構成されていることを特徴とする請求項 1 に記載の挿入光源

## 【請求項 3】

前記磁石配置状態を基準として、前記第 1 磁石列及び前記第 4 磁石列のうちの少なくとも一方が他方に対して前記第 1 方向に  $y / 2$  の距離の移動が可能であり、前記第 2 磁石列及び前記第 3 磁石列の組と前記第 5 磁石列と前記第 6 磁石列の組のうちの少なくとも一方の組が、他方の組に対して前記第 1 方向に  $x / 2$  の距離の移動が可能に構成されていることを特徴とする請求項 2 に記載の挿入光源。

## 【請求項 4】

前記第 1 磁石列、前記第 2 磁石列、及び前記第 3 磁石列からなる第 1 磁石列群と、前記第 4 磁石列、前記第 5 磁石列、及び前記第 6 磁石列からなる第 2 磁石列群との間に設けられた空隙部内を前記第 1 方向に電子ビームが通過することを特徴とする請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の挿入光源。

## 【請求項 5】

前記第 1 磁石列及び前記第 4 磁石列のうちの少なくとも一方を他方に対して前記第 1 方向に相対的に所定距離移動させるための第 1 駆動部と、

前記第 2 磁石列及び前記第 3 磁石列の組と前記第 5 磁石列と前記第 6 磁石列の組のうちの少なくとも一方の組を、他方の組に対して前記第 1 方向に相対的に所定距離移動させる

ための第2駆動部とを備えることを特徴とする請求項1～4のいずれか1項に記載の挿入光源。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は挿入光源に関し、特に広い周波数帯域と偏光性に優れた放射光の発生を可能にした挿入光源に関するものである。

【背景技術】

【0002】

現在、世界中で行われている放射光利用実験は、光子エネルギーが4keV以上のX線領域と、10eV～2keVのVUV（真空紫外）～SX（軟X線）領域とに大別される。このうち、多くのユーザーを持つのが4keV～20keVのX線領域であるため、多くの放射光施設はこの領域の放射光を最も効率的に発生できるように設計されている。現在では、3GeV程度のエネルギーを持つ電子蓄積リングと真空封止型アンジュレータ技術を組み合わせて、4keV～20keVのX線を発生する光源を有する放射光施設が世界の潮流となっている。このような3GeV級の光源は世界各所で稼働し、また現在建設予定のものも存在する。

【0003】

一方で、VUV-SX線光源は、ユーザー数の観点では少数派であるものの、電子物性の研究などには不可欠であり、放射光研究施設にとっても必須の光源である。

【0004】

このVUV-SX線領域の放射光を、前記3GeV級の放射光施設でアンジュレータによって得る場合、アンジュレータの周期長を5cm～10cmにすることで、光子エネルギー範囲を200eV～2keVに設定することが一般的である。しかし、近年では、表面物理や環境材料（Li電池、グリーンメモリ）の開発研究を筆頭に、50eV以下のエネルギーを持った放射光を利用する研究課題が重要性を増してきている。このため、一つのビームラインにおいて、光子エネルギー範囲が20eV～2keVにわたる広範囲の放射光を利用したいという要求が高まっている。

【0005】

すなわち、広い光子エネルギー範囲の放射光を発生できる挿入光源を実現するという第1の要請がある。

【0006】

ところで、X線領域に適したアンジュレータによって、低エネルギー放射光を発生させるためには、周期長を長くして磁場を強める方法が考えられる。しかし、このことは、必要な波長以外の大量の高調波成分が同時に放射されることを意味する。これにより増大した放射パワーはビームライン光学素子の熱負荷となってしまう。この熱負荷の存在は、VUV-SX線領域における実験に大きな悪影響を及ぼしかねない。なぜならば、同領域の光は物質との相互作用が非常に強く大気中を通過しないためである。同領域で精密実験を行うに際しては、光学系から測定装置の全てを超高真空中に配置する必要があるが、放射光を受けたミラー等の熱負荷による歪みがこの精密実験に大きな影響を及ぼす可能性がある。

【0007】

つまり、VUV-SX線領域の実験において、熱負荷をなるべく抑制したいという第2の要請がある。

【0008】

また、VUV-SX線領域の実験では、放射光の偏光特性についても重要な要素となる。左右の異なった円偏光状態を形成し、これを切り替えて測定を行う偏光スイッチング実験は、放射光科学で重要な実験手法の一つであり、現在でも広く利用されている。そして、近年では、これに加えて、水平・垂直の線偏光を切り替えて利用する放射光実験も重要になってきた。

## 【0009】

つまり、第1及び第2の要請に加えて、水平・垂直の線偏光を切り替えて利用したいという第3の要請を満足する挿入光源の開発が要求されている。

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

## 【0010】

【特許文献1】特開平10-326700号公報

【特許文献2】特開平5-303000号公報

【特許文献3】特開2000-206296号公報

【特許文献4】特開平8-213199号公報

10

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0011】

以下に説明する課題は、上記の背景を鑑みて本発明者が鋭意研究を行う過程で生じたものである。

## 【0012】

上述した第1～第3の要請を満たす挿入光源として、周期長と偏光が異なる2台のアンジュレータ（低エネルギー用と高エネルギー用）を準備してタンデム（縦列）に並べて、互いに排他的に利用する方法が考えられる。この構成について、図6を参照して説明する。

20

## 【0013】

図6に示すタンデム型挿入光源100は、2つのアンジュレータ101、103をビーム軸105方向に直列に配置した構成である。アンジュレータ101は水平面に対して磁気回路が平行になるように配置されている。一方、アンジュレータ103はアンジュレータ101に対して90°回転させて、水平面に対して磁気回路が垂直になるように配置されている。これにより、アンジュレータ101において垂直磁場を発生させ、アンジュレータ103において水平磁場を発生させることができる。

## 【0014】

このように複数のアンジュレータによって、受け持つエネルギー範囲を異ならせることにより、一のアンジュレータが受け持つべきエネルギー範囲を狭くしながら挿入光源全体として広いエネルギー範囲の放射光を発生させることが可能となる。これにより、一のアンジュレータによって広いエネルギー範囲の放射光を受け持つ場合と比べて、そこまで磁場を強める必要がなくなり、熱負荷の発生をある程度抑制する効果が期待できる。

30

## 【0015】

更に、各アンジュレータ101、103は、それぞれ周期長の異なる磁気回路によって構成することができる。アンジュレータ101を構成する磁気回路の周期長と、アンジュレータ103を構成する磁気回路は、相互に独立して設定することが可能である。

## 【0016】

以上により、タンデム型挿入光源100によれば、上述した第1及び第2の要請を満足する。

40

## 【0017】

また、タンデム型挿入光源100において、一方のアンジュレータのギャップ（磁石列の間隔）を最大にすることにより、ビーム軸105に直交する垂直磁場とビーム軸105に直交する水平磁場を切り替えて利用することが可能である。これにより、第3の要請も満足する。例えば、アンジュレータ101のギャップを最大にすることで垂直磁場を弱め、水平磁場のみを生成することができる。逆に、アンジュレータ103のギャップを最大にすることで水平磁場を弱め、垂直磁場のみを生成することができる。

## 【0018】

しかし、図6の構成によれば、2台のアンジュレータを一の直線部に設置する必要があるので、挿入光源に与えられた同一の設置スペースの下では、1台のアンジュレータあた

50

りに許容される長さは半分以下となる。この結果、放射光強度は半減してしまう。また、1台のアンジュレータで実現できるレベルと同等の放射光強度を実現するためには、2倍以上の設置スペースが必要となるが、特に国土の狭い我が国においては、この要求を実現するのは極めて難しい。つまり、限られた設置スペースの下で、同等の放射光強度を実現しつつ、垂直磁場と水平磁場を切り替えて利用することが可能な挿入光源の実現が要請される。言い換えれば、直線上に複数台のアンジュレータをタンデムに設置しないという第4の要請が存在する。図6の構成ではこの要請を満足していない。

【0019】

別の挿入光源として、周期長と偏光が異なる2台のアンジュレータ（低エネルギー用と高エネルギー用）をクロス型に配置して、互いに排他的に利用する方法が考えられる。この構成について、図7を参照して説明する。

10

【0020】

図7に示すクロス型挿入光源110は、上下と左右の磁気回路を組にした2組のアンジュレータ101, 103から構成される。アンジュレータ101は水平面に対して磁気回路が平行に配置されている。一方、アンジュレータ103はアンジュレータ101に対して90°回転させて、水平面に対して磁気回路が垂直になるように配置されている。

【0021】

クロス型挿入光源110は、図6に示すタンデム型挿入光源100とは異なり、アンジュレータ101とアンジュレータ103を互いに近傍に設置し、両アンジュレータによって一つの閉空間が形成されている。これにより、2台のアンジュレータを一の直線部に縦列に設置することがないため、図6に示すタンデム型挿入光源100と比較して省スペース化が図られる。つまり、第4の要請を満足する。

20

【0022】

そして、クロス型挿入光源110においても、図6に示すタンデム型挿入光源100と同様に、それぞれのアンジュレータの周期長を変えることができ、一方のアンジュレータのギャップを広げることで同アンジュレータ由来の磁場の影響をなくすることができる。これにより、第1～第3の要請を満足することができる。

【0023】

しかしながら、図7の構成によれば、磁気回路全長にわたって相互のアンジュレータ101及び103が閉空間を形成している。この構成は、アンジュレータの設計・建設に対して困難性を与えることとなる。

30

【0024】

実際にアンジュレータを設計・建設する上では、磁石列を電子ビーム軸の上下垂直方向にのみ配置して電子軌道の水平面内の開口を確保することが重要である。クロス型挿入光源110のように、上下の垂直方向に加えて左右の水平方向にも磁石列を形成した場合、アンジュレータ開発に不可欠な磁場測定や、磁石交換・調整を行うのが難しくなる。つまり、工学上、電子軌道の水平面内の開口を制限しない（ビーム軸方向に直交する水平方向にはアンジュレータを配置しない）という第5の要請が要求される。クロス型挿入光源110では、この第5の要請を満足することができない。

【0025】

また、左右の水平方向に磁石列を配置することで、水平方向に広い設置スペースが要求されてしまい、省スペース化という観点においても問題となる。

40

【0026】

なお、上述した特許文献1～4の構成も、本発明が想定するような目的とは別の目的で設計された挿入光源であり、いずれも第1～第5の要請を同時に満足するものではない。

【0027】

特許文献1には、磁石列を電子ビーム軸の上下垂直方向にのみ3列ずつ配置する構成において、接着剤を使用することなく各磁石列をホルダーに保持固定することを目的とした挿入光源が開示されている。この挿入光源では、中央の垂直磁場用磁石列とその両サイドの水平磁場用磁石列によって3列の磁石列が構成され、この3列の磁石列が垂直方向に対

50

向している。そして、3列の磁石列を1組として上下にギャップを介して相対させ、このギャップ長を調整可能にしている。更に、上下一対の磁石列群の各両サイドの磁石列と中央の磁石列とを、ビーム軸方向に対して相対的に移動可能な構成にしている。

【0028】

この構成では、中央の磁石列は垂直磁場を発生し、両サイドの磁石列は水平磁場を発生する。そして、ビーム軸に平行方向に関し、中央の磁石列に対して相対的に両サイドの磁石列を移動させることで、水平磁場を調整する。しかし、この構成ではビーム軸に直交する垂直磁場を打ち消すことができないため、水平・垂直の線偏光を切り替えながら利用することができず、上記第3の要請を満足しない。更に、広い光子エネルギー範囲の放射光を発生するという目的を想定しておらず、また構成上も中央の磁石列と両サイドの磁石列の周期長は同じにしなければならないため、第1及び第2の要請を満足する構成とはなっていない。

10

【0029】

図8は、特許文献1に開示された挿入光源を示す概念図である。図8に示す挿入光源130は、ビーム軸105に対し平行に配置された3列の磁気回路131、132、133と、同じくビーム軸105に対し平行に配置された3列の磁気回路134、135、136とを備える。磁気回路131、132、及び133は、磁気回路134、135及び136に対して、上下方向に対向している。同図の右側には、ビーム移動方向に関する水平磁場及び垂直磁場の分布を示すグラフを示している。

【0030】

20

図8(a)において、両磁気回路131、132、及び133と、磁気回路134、135及び136を完全に対向させたとき、ビーム軸105の方向に垂直な水平磁場 $B_x$ は打ち消されているが、ビーム軸105の方向に垂直な垂直磁場 $B_y$ は現れていることが分かる。両サイドに配置された磁気回路132、133、135、及び136を、ビーム軸方向に移動させることで、水平磁場 $B_x$ が現れる(図8(b)、(c))。しかし、ビーム軸105の方向に垂直な垂直磁場 $B_y$ はやはり打ち消すことができていない。

【0031】

特許文献2には、可視光からX線領域に至る広い波長領域で任意の偏光特性を持つ放射光を、電子ビームの水平方向の開口を制限することなく発生することを目的とした挿入光源が開示されている。つまり、上記第1、第2及び第5の要請を想定した構成といえる。

30

【0032】

図9Aは、特許文献2に開示された挿入光源を示す概念図である。図9Aに示す挿入光源120は、ビーム軸105に対し平行に配置された4列の磁気回路111、112、113及び114を備える。1組の磁気回路111及び112が上方に位置し、別の1組の磁気回路113及び114が下方に位置する。磁気回路の一方の組を他方の組に対して相対的に長手方向(ビーム軸105に平行な方向)に移動させることにより、水平偏光(垂直磁場)、垂直偏光(水平磁場)、楕円偏光(垂直と水平磁場)のモードに切り替えることが可能となっている。図9Bは、磁石列を移動させることで得られる各磁場モードにおけるビーム軸方向に対する水平/垂直磁場の変位を示すグラフであり、(a)が垂直磁場、(b)が水平磁場、(c)が楕円偏光のモードを示している。よって、第3~第5の要請を満たす。

40

【0033】

しかし、特許文献2の構成においては、垂直磁場と水平磁場の周期長は同一である。このため、異なるエネルギー範囲の放射光を別々に受け持たせることで、一台の挿入光源によって広いエネルギー範囲の放射光の発生を可能にすることができず、第1及び第2の要請を満たさない。

【0034】

特許文献3には、ビーム軸に対し平行に配置された3列の磁石列を1組とする2組の磁石列群が上下に対向して配置された構成において、上下間のギャップ長を小さくすることによって生じる磁石列のたわみを抑制することを目的とした挿入光源が開示されている。

50

## 【0035】

この挿入光源では、垂直方向に磁化された磁石と水平方向に磁化された磁石とが交互に列状に（ビーム軸方向に平行に）配置された第1主磁石列、及びこの第1主磁石列と上下方向にギャップを隔てて設けられ、垂直方向に磁化された磁石と水平方向に磁化された磁石とが交互に列状に配置されると共に垂直磁化方向が第1主磁石列と同じで水平磁化方向が第1主磁石列と反対向きとなる第2主磁石列を備える。更に、第1主磁石列の両サイドに第1補助磁石列を、第2主磁石列の両サイドに第2補助磁石列を備える。第1補助磁石列は、垂直方向に磁化された磁石と水平方向に磁化された磁石とが交互に列状に配置される。第2補助磁石列は、第1補助磁石列と上下方向にギャップを隔てて設けられており、垂直方向に磁化された磁石と水平方向に磁化された磁石とが交互に列状に配置されると共に、垂直磁化方向が第1補助磁石列と反対方向で水平磁化方向が第1補助磁石列と同じ向きとなるように配置されている。この構成により、第1及び第2主磁石列間に作用する吸引力を、第1及び第2補助磁石列間に作用する反発力で打ち消すことで、たわみ変形を抑制する効果を得るといえるものである。

10

## 【0036】

しかし、同文献に開示された挿入光源においても、特許文献1に開示されたものと同様、水平・垂直の線偏光を切り替えながら利用することができず、上記第3の要請を満足しない。また、広い光子エネルギー範囲の放射光を発生するという目的を想定しておらず、第1及び第2の要請を満足する構成とはなっていない。特許文献3においては、各磁石列の周期長が等しい構成を想定している。

20

## 【0037】

特許文献4には、直線偏光を発生するリニアアンジュレータにおいて発生する高調波由来の熱負荷による影響を低減することを目的とした挿入光源が開示されている。しかし、その解決方法としては、垂直アンジュレータの周期長を水平アンジュレータの周期長の2倍に設定し、電子ビームを軸線方向からみて8の字上に交互に正逆回転させることで、ビーム軸上での高調波の発生を抑制するというものである。つまり、周期長を自由に選択できる構成ではなく、第1及び第2の要請を満足する構成とはなっていない。また、水平・垂直の線偏光を切り替えながら利用することができないため、上記第3の要請も満足しない。

## 【0038】

本発明は、上述した第1～第5の要請を全て満足することで、省スペース化を実現しつつもユーザーの多様な要請に対応できる挿入光源を提供することを目的としてなされたものである。

30

## 【課題を解決するための手段】

## 【0039】

上記課題を解決すべくなされた本発明に係る挿入光源は、以下の特徴を有する。

## 【0040】

第1方向に磁化された第1磁石、第1方向に直交する第2方向に磁化された第2磁石、前記第1磁石の前記第1方向に係る磁化を打ち消す方向に磁化された第3磁石、及び前記第2磁石の前記第2方向に係る磁化を打ち消す方向に磁化された第4磁石を、前記第1方向に直列に配置してなる1単位が繰り返し配列されて形成される磁石列を6列有する構成である。

40

## 【0041】

そして、前記磁石列は、第1磁石列、第2磁石列、第3磁石列、第4磁石列、第5磁石列、及び第6磁石列からなり、前記第1磁石列と前記第4磁石列を構成する各磁石のうち、少なくとも前記第1磁石と前記第3磁石、前記第2磁石と前記第4磁石の前記第1方向に係る長さはそれぞれ同一であり、前記第2磁石列、第3磁石列、第5磁石列、及び第6磁石列を構成する各磁石のうち、少なくとも前記第1磁石と前記第3磁石、前記第2磁石と前記第4磁石の前記第1方向に係る長さはそれぞれ同一である。

## 【0042】

50

つまり、第 1 磁石列と第 4 磁石列は、繰り返しとなる 1 単位の前記第 1 方向に係る長さ（周期長）が同じである。同様に、第 2 磁石列、第 3 磁石列、第 5 磁石列、及び第 6 磁石列は、繰り返しとなる 1 単位の前記第 1 方向に係る長さ（周期長）が同じである。

【 0 0 4 3 】

そして、前記第 1 磁石列の、前記第 1 方向及び前記第 2 方向に直交する第 3 方向に係る両側には前記第 2 磁石列及び前記第 3 磁石列が配置され、前記第 1 磁石列に対して前記第 2 方向に離間して前記第 4 磁石列が配置され、前記第 4 磁石列の前記第 3 方向に係る両側には前記第 5 磁石列及び前記第 6 磁石列が配置される。

【 0 0 4 4 】

そして、前記第 1 磁石列及び前記第 4 磁石列のうちの少なくとも一方が、他方に対して前記第 1 方向に移動可能であると共に、前記第 2 磁石列及び前記第 3 磁石列の組と前記第 5 磁石列と前記第 6 磁石列の組のうちの少なくとも一方の組が、他方の組に対して前記第 1 方向に移動可能に構成されている。

10

【 0 0 4 5 】

このように構成することで、第 1 磁石列と第 4 磁石列の間で前記第 2 方向に係る磁化方向の打ち消し、並びにこの打ち消しの解除が行える。これにより、前記第 2 方向に磁場を生じさせたり打ち消したりすることができる。

【 0 0 4 6 】

同様に、第 2 磁石列と第 3 磁石列の間、及び第 5 磁石列と第 6 磁石列の間で前記第 3 方向に係る磁化方向の打ち消し、並びにこの打ち消しの解除が行える。これにより、前記第 3 方向に磁場を生じさせたり打ち消したりすることができる。つまり、第 1 方向を電子ビームの進行方向とし、第 2 方向を電子ビームの進行方向に直交する垂直方向、第 3 方向を電子ビームの進行方向に直交する水平方向とすることで、水平磁場と垂直磁場の切り替えが可能となる。

20

【 0 0 4 7 】

そして、第 1 磁石列と第 4 磁石列の周期長（以下、 $y$  表す。）と、第 2 磁石列、第 3 磁石列、第 5 磁石列、及び第 6 磁石列の周期長（以下、 $x$  表す。）とは、相互に独立して設定できる構成である。

【 0 0 4 8 】

よって、受け持つべきエネルギー範囲を狭くしながら挿入光源全体として広いエネルギー範囲の放射光を発生させることが可能となる。また、各磁石列が相互に直列に配置される構成ではないため、設置スペースの省スペース化が実現できる。

30

【 0 0 4 9 】

更には、第 1、第 2、及び第 3 磁石列と、第 4、第 5、及び第 6 磁石列とが前記第 2 方向に離間を有して配置される構成であるため、この離間された領域内を前記第 1 方向に電子ビームを進行させることで放射光の発生が可能である。つまり、ビーム軸方向に直交する水平方向（第 3 方向）に磁石列が配置されておらず、磁場測定や、磁石交換・調整といった作業の困難性の問題もない。

【 0 0 5 0 】

また、上記構成において、前記第 1 磁石列及び前記第 4 磁石列は、それぞれの前記第 2 磁石と前記第 4 磁石が前記第 2 方向に対向し、前記第 2 磁石列及び前記第 5 磁石列、並びに前記第 3 磁石列及び前記第 6 磁石列は、それぞれの前記第 1 磁石と前記第 3 磁石が前記第 2 方向に対向し、前記第 2 磁石列及び前記第 3 磁石列、並びに前記第 5 磁石列及び前記第 6 磁石列は、それぞれの前記第 2 磁石と前記第 4 磁石が前記第 3 方向に対向する磁石配置状態を想定する。

40

【 0 0 5 1 】

上記磁石配置状態の下では、第 2 方向及び第 3 方向の磁場が共に打ち消された状態が実現される。

【 0 0 5 2 】

そして、前記第 1 磁石列の前記 1 単位の前記第 1 方向に係る長さを  $y$ 、前記第 2 磁石

50



列の前記 1 単位の前記第 1 方向に係る長さを  $x$  とし、自然数を  $n$  としたとき、前記第 1 磁石列及び前記第 4 磁石列のうちの少なくとも一方が、他方に対して、初期状態から前記第 1 方向に  $(2n - 1) \cdot y / 2$  の距離の移動が可能であり、前記第 2 磁石列及び前記第 3 磁石列の組と前記第 5 磁石列と前記第 6 磁石列の組のうちの少なくとも一方の組が、他方の組に対して、初期状態から前記第 1 方向に  $(2n - 1) \cdot x / 2$  の距離の移動が可能に構成されている。

【0053】

前記磁石配置状態から、前記第 1 磁石列及び前記第 4 磁石列のうちの少なくとも一方を他方に対して前記第 1 方向に  $(2n - 1) \cdot y / 2$  の距離だけ移動させることで、前記第 2 方向の磁場を出現させることが可能となる。また、初期状態から、前記第 2 磁石列及び前記第 3 磁石列の組と前記第 5 磁石列と前記第 6 磁石列の組のうちの少なくとも一方の組を、他方の組に対して、初期状態から前記第 1 方向に  $(2n - 1) \cdot x / 2$  の距離だけ移動させることで、前記第 3 方向の磁場を出現させることが可能となる。

10

【0054】

このような構成とすることで、第 2 方向及び第 3 方向の磁場が共に打ち消された状態、前記第 3 方向の磁場を打ち消した状態、及び前記第 2 方向の磁場を打ち消した状態の 3 状態間の遷移が可能となる。この状態間遷移は、どのような順序で行われても構わない。

【発明の効果】

【0055】

本発明によれば、上記第 1 ~ 第 5 の要請を全て満足する挿入光源、すなわち、省スペース化を実現しつつもユーザーの多様な要請に対応できる挿入光源が実現される。

20

【図面の簡単な説明】

【0056】

【図 1 A】本発明の挿入光源が備える磁気回路の模式図である。

【図 1 B】図 1 A の状態を展開して平面的に図示した模式図である。

【図 1 C】図 1 A の状態におけるビーム移動方向に関する水平磁場及び垂直磁場の分布を示すグラフである。

【図 2 A】垂直磁場モードにおける磁気回路の模式図である。

【図 2 B】図 2 A の状態を展開して平面的に図示した模式図である。

【図 2 C】図 2 A の状態におけるビーム移動方向に関する水平磁場及び垂直磁場の分布を示すグラフである。

30

【図 3 A】水平磁場モードにおける磁気回路の模式図である。

【図 3 B】図 3 A の状態を展開して平面的に図示した模式図である。

【図 3 C】図 3 A の状態におけるビーム移動方向に関する水平磁場及び垂直磁場の分布を示すグラフである。

【図 4 A】磁場モードの切り替えを行うための駆動手段の模式的構成図である。

【図 4 B】磁場モードの切り替えを行うための別の駆動手段の模式的構成図である。

【図 5 A】垂直磁場モードの実施例における水平磁場及び垂直磁場の分布を示すグラフである。

【図 5 B】水平磁場モードの実施例における水平磁場及び垂直磁場の分布を示すグラフである。

40

【図 6】タンデム型の挿入光源の構造を示す概念図である。

【図 7】クロス型の挿入光源の構造を示す概念図である。

【図 8】特許文献 1 に開示の挿入光源の構造を示す概念図並びにビーム移動方向に関する水平磁場及び垂直磁場の分布を示すグラフである。

【図 9 A】特許文献 2 に記載の挿入光源の構造を示す概念図である。

【図 9 B】特許文献 2 に記載の挿入光源におけるビーム移動方向に関する水平磁場及び垂直磁場の分布を示すグラフである。

【発明を実施するための形態】

【0057】

50

本発明に係る挿入光源の実施形態につき、図面を参照して説明する。なお、以下の各図面において、実際の寸法比と図面上の寸法比は必ずしも一致するものではない。

【0058】

〔磁気回路〕

図1Aは、本挿入光源が備える磁気回路の模式図である。また、図1Bは、図1Aに示される2段からなる3列の磁気回路を、平面的に図示した模式図である。

【0059】

また、図1Bでは、各磁石列群において、磁石列群を構成する磁石列同士が水平方向に間隔を有して配置されているかのように図示されているが、これは各磁石に対して符号を付すためのスペースを確保するための措置である。実際には、図1Aに図示されているように、各磁石列が水平方向に近接して配置されているものとして構わない。

10

【0060】

磁気回路1は、ビーム軸5に平行な方向に複数の磁石を隣接して並べて形成した磁石列を6列有して構成される。なお、以下において、ビーム軸5に平行な方向をZ方向、Z方向に直交する垂直方向（紙面上上向き）をY方向、Z方向に直交する水平方向をX方向と呼ぶ。より詳細には、電子ビームの移動方向を+Z方向、磁石列群20から磁石列群10に向かう方向を+Y方向、磁石列12から磁石列13に向かう方向を+X方向と規定する（図1A参照）。また、以下の図面において、各磁石内に示されている矢印は磁化方向を示している。

【0061】

なお、以下では、方向の正負を区別して記載する場合には、+X方向、+Y方向、+Z方向などのように表し、方向の正負を問わない場合には、符号を付けずに単にX方向、Y方向、Z方向などのように表す。図1Bでは、図1Aの状態下で+Y方向に磁化されている磁石に「N」、-Y方向に磁化されている磁石に「S」、+Z方向に磁化されている磁石に「右向きの矢印」、-Z方向に磁化されている磁石に「左向きの矢印」を付加している。

20

【0062】

各磁石は、Nd-Fe-B系磁石で構成されたものを利用することができるが、本発明においては、これらの材料で構成された磁石に限定されない。

【0063】

磁気回路1は、2つの磁石列群10及び20をY方向に離間して配置される。この離間により形成された空間を電子ビームが通過する。

30

【0064】

第1磁石列群10は、第1磁石列11、第2磁石列12、及び第3磁石列13によって構成される。また、第2磁石列群20は、第4磁石列21、第5磁石列22、及び第6磁石列23によって構成される。第1磁石列11及び第4磁石列21を構成する各磁石のZ方向に係る長さは同一である。また、第2磁石列12、第3磁石列13、第5磁石列22、及び第6磁石列23を構成する各磁石のZ方向に係る長さは同一である。

【0065】

図1Bに示すように、第1磁石列11は、垂直方向（-Y方向）に磁化された磁石11a、水平方向（-Z方向）に磁化された磁石11b、垂直方向（+Y方向）に磁化された磁石11c、及び水平方向（+Z方向）に磁化された磁石11dで構成される4つの磁石を1単位として、これが繰り返しZ方向に配列されたものである。この1単位を構成する磁石列の列方向（Z方向）の長さを周期長と呼ぶ。ここでは、第1磁石列の周期長を $y$ と規定する。第1磁石列11の周期長 $y$ は、第1磁石列を構成する各磁石のZ方向に係る長さによって規定される。

40

【0066】

第2磁石列12は、垂直方向（+Y方向）に磁化された磁石12a、水平方向（+Z方向）に磁化された磁石12b、垂直方向（-Y方向）に磁化された磁石12c、及び水平方向（-Z方向）に磁化された磁石12dで構成される4つの磁石を1単位として、これ

50

が繰り返しZ方向に配列されたものである。第2磁石列12の周期長を  $x$  と規定する。ここでは、 $x$  は  $y$  とは異なる値である。第2磁石列12の周期長  $x$  は、第2磁石列を構成する各磁石のZ方向に係る長さによって規定される。

【0067】

第3磁石列13は、垂直方向(-Y方向)に磁化された磁石13a、水平方向(-Z方向)に磁化された磁石13b、垂直方向(+Y方向)に磁化された磁石13c、及び水平方向(+Z方向)に磁化された磁石13dで構成される4つの磁石を1単位として、これが繰り返しZ方向に配列されたものである。第3磁石列13の周期長は、第2磁石列12の周期長と同じ  $x$  である。

【0068】

第2磁石列群20は、第1磁石列群10よりも下方(-Y方向)に離間して配置される。この離間距離Gap(図1A参照)は所定の値で設定され、通常動作時においてこの値は固定されている。無論、利用条件に応じてこのGap値を変化できる構成としても構わないが、後述するように、本発明に係る挿入光源として利用するに際して、基本的にはこのGap値を変更する必要はない。

【0069】

第4磁石列21は、垂直方向(+Y方向)に磁化された磁石21a、水平方向(-Z方向)に磁化された磁石21b、垂直方向(-Y方向)に磁化された磁石21c、及び水平方向(+Z方向)に磁化された磁石21dで構成される4つの磁石を1単位として、これが繰り返しZ方向に配列されたものである。第4磁石列の周期長は、第1磁石列の周期長と同じ  $y$  である。

【0070】

第5磁石列22は、垂直方向(+Y方向)に磁化された磁石22a、水平方向(-Z方向)に磁化された磁石22b、垂直方向(-Y方向)に磁化された磁石22c、及び水平方向(+Z方向)に磁化された磁石22dで構成される4つの磁石を1単位として、これが繰り返しZ方向に配列されたものである。第5磁石列22の周期長は、第2磁石列12及び第3磁石列13の周期長と同じ  $x$  である。

【0071】

第6磁石列23は、垂直方向(-Y方向)に磁化された磁石23a、水平方向(+Z方向)に磁化された磁石23b、垂直方向(+Y方向)に磁化された磁石23c、及び水平方向(-Z方向)に磁化された磁石23dで構成される4つの磁石を1単位として、これが繰り返しZ方向に配列されたものである。第6磁石列23の周期長は、第2磁石列12、第3磁石列13、及び第5磁石列22と同じ  $x$  である。

【0072】

図1A及び図1Bの状態において、第1磁石列11内に存在するY方向に磁化された磁石と、この磁石とY方向に対向する位置において第4磁石列21内に存在するY方向に磁化された磁石とは、磁化方向が反対向きである。すなわち、Y方向について磁場が打ち消し合う向きに配置されている。

【0073】

また、図1A及び図1Bの状態において、第2磁石列12内に存在する+Y方向に磁化された磁石12aに対してX方向に対向する位置における第3磁石列13内には、-Y方向に磁化された磁石13aが配置される。このため、両磁石12a-13a間には、磁石13aからギャップ内を-X方向に移動して磁石12aに向かう磁束が概念上生じ得る。しかし、これらの磁石とY方向に対向する位置において、第5磁石列22内には+Y方向に磁化された磁石22aが、第6磁石列23内には-Y方向に磁化された磁石23aが存在する。この結果、両磁石22a-23a間には、磁石22aからギャップ内を+X方向に移動して磁石23aに向かう磁束が概念上生じ得る。つまり、磁石12aと13aに関し、第2磁石列12と第3磁石列13の間に生じる磁束と、磁石22aと23aに関し、第5磁石列22と第6磁石列23の間に生じる磁束は、互いに打ち消し合う方向に発生する。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 7 4 】

同様の理屈により、磁石 1 2 c と 1 3 c に関し、第 2 磁石列 1 2 と第 3 磁石列 1 3 の間に生じる磁束と、磁石 2 2 c と 2 3 c に関し、第 5 磁石列 2 2 と第 6 磁石列 2 3 の間に生じる磁束も、互いに打ち消し合う方向に発生する。この結果、第 2 磁石列 1 2 と第 3 磁石列 1 3 の間に発生する水平方向の磁場と、第 5 磁石列 2 2 と第 6 磁石列 2 3 の間に発生する水平方向の磁場が打ち消し合う。すなわち、X 方向についても磁場が打ち消し合う向きに配置されている。

## 【 0 0 7 5 】

以上により、図 1 A 及び図 1 B の状態では、X 方向及び Y 方向に磁場が発生していない、すなわち水平磁場も垂直磁場も発生していないことが分かる。この状態を「ゼロ磁場モード」と呼ぶ。図 1 C に、この状態における Z 方向に関する水平磁場  $B_x$ 、垂直磁場  $B_y$  の分布をグラフに示す。

10

## 【 0 0 7 6 】

本実施形態では、第 1 磁石列 1 1 及び第 4 磁石列 2 1 のうち、一方を他方に対して Z 方向に相対移動可能に構成されている。つまり、第 1 磁石列 1 1 及び第 4 磁石列 2 1 のうち、第 1 磁石列 1 1 のみが Z 方向に移動可能に構成されていても構わないし、第 4 磁石列 2 1 のみが Z 方向に移動可能に構成されていても構わない。無論、両者が Z 方向に移動可能に構成されていても構わない。なお、この移動時において、他の磁石列 1 2、1 3、2 2、及び 2 3 の位置に影響を及ぼすことなく、すなわち、これらの磁石列に対して独立に移動することができる構成である。

20

## 【 0 0 7 7 】

更に、本実施形態では、第 2 磁石列 1 2 と第 3 磁石列 1 3 の一組（以下、「第 1 組」と呼ぶ。）及び第 5 磁石列 2 2 と第 6 磁石列 2 3 の一組（以下、「第 2 組」と呼ぶ。）のうち、一方の組を他方の組に対して Z 方向に相対移動可能に構成されている。つまり、第 1 組及び第 2 組のうち、第 1 組のみが Z 方向に移動可能に構成されていても構わないし、第 2 組のみが Z 方向に移動可能に構成されていても構わない。無論、両組が Z 方向に移動可能に構成されていても構わない。なお、この移動時において、他の磁石列 1 1 及び 2 1 の位置に影響を及ぼすことなく、すなわち、これらの磁石列に対して独立に移動することができる構成である。

30

## 【 0 0 7 8 】

〔磁場の变化方法〕

〔垂直磁場モード〕

図 2 A 及び図 2 B は、図 1 A 及び図 1 B の状態から、第 1 磁石列 1 1 を + Z 方向に半周期 ( $\pi / 2$ ) だけ移動させた状態を示している。このとき、第 2 磁石列 1 2 と第 3 磁石列 1 3 の相対関係、並びに第 5 磁石列 2 2 と第 6 磁石列 2 3 の相対関係は、図 1 A 及び図 1 B の状態からは変化しない。つまり、水平磁場についてはゼロ磁場モードと同じ状態である。

## 【 0 0 7 9 】

一方、第 1 磁石列 1 1 を半周期移動させたことにより、第 1 磁石列 1 1 と第 4 磁石列 2 1 の相対関係が変化している。より具体的には、第 1 磁石列 1 1 内に存在する - Y 方向に磁化された磁石 (1 1 a) に対して Y 方向に対向する位置には、第 4 磁石列 2 1 内に存在する - Y 方向に磁化された磁石 (2 1 c) が存在する。また、第 1 磁石列 1 1 内に存在する + Y 方向に磁化された磁石 (1 1 c) に Y 方向に対向する位置には、第 4 磁石列 2 1 内に存在する + Y 方向に磁化された磁石 (2 1 a) が存在する。つまり、磁石 1 1 a ギャップ 磁石 2 1 c 磁石 2 1 d ギャップ 磁石 2 1 a ギャップ 磁石 1 1 c 磁石 1 1 b 磁石 1 1 a という磁束の流れが発生する。この磁束の流れが、第 1 磁石列 1 1 と第 4 磁石列 2 1 の間の各箇所が生じ、この結果 Y 方向の磁場（垂直磁場）が生じる。図 2 A において、ギャップ領域に太い矢印で示しているのは磁場の向きである。

40

## 【 0 0 8 0 】

従って、図 2 A 及び図 2 B の状態では、X 方向の磁場は発生せず、Y 方向の磁場が発生

50

する。つまり水平磁場は発生しないが垂直磁場が発生していることが分かる。この状態を「垂直磁場モード」と呼ぶ。図2Cに、この状態におけるZ方向に関する水平磁場 $B_x$ 、垂直磁場 $B_y$ の分布をグラフに示す。

【0081】

なお、図2A及び図2Bでは、図1A及び図1Bの状態から、第1磁石列11を+Z方向に半周期( $\pi/2$ )だけ移動させることで、ゼロ磁場モードから垂直磁場モードに移行するものとした。しかし、各磁石列が磁化方向の異なる4つの磁石によって構成される1単位が繰り返し配列されてなることを鑑みれば、第1磁石列11及び第4磁石列21のうち、一方を他方に対してZ方向に $(2n-1)\pi/2$  (ただしnは自然数)だけ移動させれば良いことが分かる。

【0082】

[水平磁場モード]

図3A及び図3Bは、図1A及び図1Bの状態から、第5磁石列22及び第6磁石列23を-Z方向に半周期( $\pi/2$ )だけ移動させた状態を示している。このとき、第1磁石列11と第4磁石列21の相対関係は、図1A及び図1Bの状態からは変化しない。つまり、垂直磁場についてはゼロ磁場モードと同じ状態である。

【0083】

一方、第5磁石列22及び第6磁石列23を半周期移動させたことにより、第2磁石列12と第5磁石列22、第3磁石列13と第6磁石列23の相対関係がそれぞれ変化している。

【0084】

より具体的には、第2磁石列12内に存在する+Y方向に磁化された磁石(12a)にY方向に対向する位置には、第5磁石列22内に存在する-Y方向に磁化された磁石(22c)が存在する。また、第2磁石列12内に存在する-Y方向に磁化された磁石(12c)にY方向に対向する位置には、第5磁石列22内に存在する+Y方向に磁化された磁石(22a)が存在する。

【0085】

同様に、第3磁石列13内に存在する-Y方向に磁化された磁石(13a)にY方向に対向する位置には、第6磁石列23内に存在する+Y方向に磁化された磁石(23c)が存在する。また、第3磁石列13内に存在する+Y方向に磁化された磁石(13c)にY方向に対向する位置には、第6磁石列23内に存在する-Y方向に磁化された磁石(23a)が存在する。

【0086】

この状態の下では、第2磁石列12内の磁石12aと第3磁石列13内の磁石13aの間で、磁石13aからギャップ内を-X方向に移動して磁石12aに向かう磁束が生じる。そして、これらの磁石とY方向に対向する位置において、第5磁石列22内には-Y方向に磁化された磁石22cが、第6磁石列23内には+Y方向に磁化された磁石23cが存在する。この結果、これら両磁石22c-23c間にも、磁石23cからギャップ内を-X方向に移動して磁石22cに向かう磁束が生じる。つまり、このギャップ位置において、-X方向に関する磁場が生じる。

【0087】

同様の理屈により、磁石12cと13cに関し、第2磁石列12と第3磁石列13の間に生じる磁束は+X方向の向きであり、これらの磁石のY方向に関する対向位置に設置された磁石22aと23aに関し、第5磁石列22と第6磁石列23の間に生じる磁束も、やはり+X方向の向きである。よって、このギャップ位置において、+X方向に関する磁場が生じる。

【0088】

以上の説明により、図3A及び図3Bの状態下では、Y方向の磁場は発生せず、X方向の磁場が発生する。つまり垂直磁場は発生しないが水平磁場が発生していることが分かる。この状態を「水平磁場モード」と呼ぶ。図3Cに、この状態におけるZ方向に関する水

10

20

30

40

50

平磁場  $B_x$ 、垂直磁場  $B_y$  の分布をグラフに示す。

【0089】

なお、図3A及び図3Bでは、図1A及び図1Bの状態から、第5磁石列22及び第6磁石列23を-Z方向に半周期( $\lambda_x/2$ )だけ移動させることで、ゼロ磁場モードから水平磁場モードに移行するものとした。しかし、各磁石列が磁化方向の異なる4つの磁石によって構成される1単位が繰り返し配列されてなることを鑑みれば、第2磁石列12及び第3磁石列13の組(第1組)、第5磁石列22及び第6磁石列23の組(第2組)のうち、一方の組を他方の組に対してZ方向に $(2n-1)\lambda_x/2$ (ただしnは自然数)だけ移動させれば良いことが分かる。

【0090】

つまり、本実施形態の構成によれば、ゼロ磁場モード、垂直磁場モード、及び水平磁場モードを切り替えながら挿入光源を利用することが可能となる。そして、垂直磁場を生じるための磁石列(11、21)の周期長 $\lambda_y$ と、水平磁場を生じるための磁石列(12、13、22、23)の周期長 $\lambda_x$ は、互いに独立して設定することが可能である。このため、発生させたい光子エネルギーに応じて自由に周期長を設定することができ、自由度の高い挿入光源が実現できる。

【0091】

なお、本構成によれば、各磁石列をZ方向(ビーム軸方向)に移動させる構成であるため、磁場モードを変更するに際してギャップ間隔をY方向に変化させる必要がない。上下方向に磁石列を移動させてギャップ間隔を変化させることで一方の磁場を消すためには、通常数百mm以上の距離を移動させる必要がある。このことは、切り替えに多くの時間を要したり、駆動機構が大型化することを意味する。これに対し、本構成によれば、最小では周期長の $1/2$ だけZ方向に磁石列を移動させれば良く、高々20mm程度の移動距離で磁場の切り替えが実現できる。これにより、切り替え時間の短縮化と駆動機構の小型化が実現できる。

【0092】

〔駆動方式〕

図4A及び図4Bは、上述した各磁場モードの切り替えを行うための駆動手段を模式的に示す図面である。いずれの図面に示される駆動手段も、各磁石列群10及び20のZ軸方向の外側に設置され、Z軸方向に磁石列を移動させることが可能な構成となっている。なお、これらの各図面において、駆動軸にはハッチングを施しており、ハッチングが施されていない箇所は例えば磁石列の位置を固定するための保持部で構成される。

【0093】

図4Aに示す駆動手段30Aは、駆動軸31及び32を備えている。駆動軸31によって、第1磁石列11をZ方向に移動させることができ、駆動軸32によって第5磁石列22及び第6磁石列23を同時にZ方向に移動させることができる構成である。これにより、駆動軸31によって、第4磁石列21に対して第1磁石列11をZ方向に移動させることができ、駆動軸32によって、第2磁石列12及び第3磁石列13の組(第1組)に対して、第5磁石列22及び第6磁石列23の組(第2組)をZ方向に移動させることができる。

【0094】

なお、保持部33によって第2磁石列12及び第3磁石列13の位置が固定され、保持部34によって第4磁石列21の位置が固定される。

【0095】

図4Bに示す駆動手段30Bは、駆動軸31、32に加えて駆動軸35及び36を備えている。駆動軸31によって、第1磁石列11をZ方向に移動させることができ、駆動軸32によって第5磁石列22及び第6磁石列23を同時にZ方向に移動させることができる。更に、駆動軸35によって、第2磁石列12及び第3磁石列13をZ方向に移動させることができ、駆動軸36によって、第4磁石列21をZ方向に移動させることができる。

。

10

20

30

40

50

## 【0096】

この構成によれば、駆動手段30Aよりも更に磁石列の移動の自由度が増し、多様な磁場を生成することが可能となる。例えば、垂直磁場用の磁石列の周期長 $\lambda_y$ と水平磁場用の磁石列の周期長 $\lambda_x$ を1:2にとった場合、周期長が違う垂直磁場と水平磁場を切り替えて使うという上記の利用態様に加えて、8の字型アンジュレータとしての機能を実現することが可能となる。また、 $\lambda_y = \lambda_x$ とすることで、円偏光アンジュレータとしての機能も実現できる。

## 【0097】

〔理論的な説明〕

図1Bに示したゼロ磁場モードにおける配置状態を初期状態とする。この初期状態に対して、第1磁石列11のZ方向の変位位相を $\theta_u$ 、第2磁石列12及び第3磁石列13のZ方向の変位位相を $\theta_d$ 、第4磁石列21のZ方向の変位位相を $\phi_u$ 、第5磁石列22及び第6磁石列23のZ方向の変位位相を $\phi_d$ と規定する。基準点 $Z = 0$ における垂直磁場、水平磁場の大きさをそれぞれ $B_{y0}$ 、 $B_{x0}$ とすると、 $Z = z$ における垂直磁場、水平磁場の大きさ $B_y(z)$ 、 $B_x(z)$ はそれぞれ以下の数1によって表される。

## 【0098】

【数1】

$$B_y(z) = \frac{1}{2} B_{y0} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_y} z + \theta_u\right) + \frac{1}{2} B_{y0} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_y} z + \theta_d\right) \quad 20$$

$$B_x(z) = \frac{1}{2} B_{x0} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_x} z + \phi_u\right) + \frac{1}{2} B_{x0} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_x} z + \phi_d\right)$$

## 【0099】

上記数1を展開してまとめると、以下の数2のように表される。

## 【0100】

【数2】

$$B_y(z) = \left[ B_{y0} \cos\left(\frac{\theta_d - \theta_u}{2}\right) \right] \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_y} z + \frac{\theta_u + \theta_d}{2}\right)$$

$$B_x(z) = \left[ B_{x0} \cos\left(\frac{\phi_d - \phi_u}{2}\right) \right] \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_x} z + \frac{\phi_u + \phi_d}{2}\right) \quad 40$$

## 【0101】

数2により、 $\lambda_x$ 、 $\lambda_y$ を任意とし、 $\theta_u - \theta_d = \pm \pi$ とすると、 $B_x(z) = 0$ となり、垂直磁場モード（水平偏光）が実現される。また、 $\lambda_x$ 、 $\lambda_y$ を任意とし、 $\phi_u - \phi_d = \pm \pi$ とすると、 $B_y(z) = 0$ となり、水平磁場モード（垂直偏光）が実現される。

## 【0102】

なお、 $\lambda_x = \lambda_y$ 、 $\theta_u = \theta_d = \pm \pi/2$ とすることで、円（楕円）偏光アンジュレー

10

20

30

40

50

タが実現される。更に、 $x = 2y$ 、 $u = d = 0$ 、 $u = d = 0$ とすることで、8の字型アンジュレータが実現される。

【0103】

上述の実施形態では、第1磁石列11及び第4磁石列21を構成する各磁石のZ方向に係る長さは同一であるものとした。しかし、これらの磁石列を構成する磁石のうち、少なくともY方向に磁化された磁石(11a、11c、21a、21c)についてZ方向に係る長さが同一であり、且つ、Z方向に磁化された磁石(11b、11d、21b、21d)についてZ方向に係る長さが同一であればよい。

【0104】

同様に、上述の実施形態では、第2磁石列12、第3磁石列13、第5磁石列22、及び第6磁石列23を構成する各磁石のZ方向に係る長さは同一であるものとした。しかし、これらの磁石列を構成する磁石のうち、少なくともY方向に磁化された磁石(12a、12c、13a、13c、22a、22c、23a、23c)についてZ方向に係る長さが同一であり、且つ、Z方向に磁化された磁石(12b、12d、13b、13d、22b、22d、23b、23d)についてZ方向に係る長さが同一であればよい。

10

【0105】

〔実施例〕

中央部の磁石列(第1磁石列11、第4磁石列21)としては、幅40mm、高さ40mm、厚み15mmのNd-Fe-B系磁石(日立金属株式会社製 材質名:NMX-46CH)で構成された磁石をZ方向に配置して形成した。また、両サイド部(第2磁石列12、第3磁石列13、第5磁石列22、第6磁石列23)としては、幅40mm、高さ40mm、厚み30mmのNd-Fe-B系磁石(日立金属株式会社製 材質名:NMX-46CH)で構成された磁石をZ方向に配置して形成した。なお、ここで「幅」とはX方向の長さを、「高さ」とはY方向の長さを、「厚み」とはZ方向の長さを指している。

20

【0106】

このとき垂直磁場用の磁石列の周期長 $y$ は、 $y = 15\text{mm} \times 4 = 6\text{cm}$ であり、垂直磁場用の磁石列の周期長 $x$ は、 $x = 30\text{mm} \times 4 = 12\text{cm}$ である。本実施例では、中央部を10周期、両サイド部を5周期として構成した。つまり、Z方向の磁石列の全長を60cmとして構成した。なお、両磁石列群間のY方向のGapを2.1mm、中央部の磁石列と両サイドの磁石列の間のX方向に係る間隔を1mmとした。

30

【0107】

このとき、磁石列を上述した方法で移動させることで垂直磁場モードを形成した時の、Z方向に関する水平磁場 $B_x$ 、垂直磁場 $B_y$ の分布に関するグラフを図5Aに示す。同様に、水平磁場モードを形成した時の、Z方向に関する水平磁場 $B_x$ 、垂直磁場 $B_y$ の分布に関するグラフを図5Bに示す。図5Aでは水平磁場が打ち消され、図5Bでは垂直磁場が打ち消されていることが分かる。なお、本実施例では、垂直磁場モードにおける最大磁場 $B_{y_{max}} = 0.68\text{T}$ 、水平磁場モードにおける最大磁場 $B_{x_{max}} = 0.37\text{T}$ であり、いずれも十分高い磁場形成が実現できている。

【符号の説明】

【0108】

- 1 : 本発明に係る挿入光源が備える磁気回路
- 5 : ビーム軸
- 10 : 第1磁石列群
- 11 : 第1磁石列
- 11a、11b、11c、11d : 第1磁石列内の磁石
- 12 : 第2磁石列
- 12a、12b、12c、12d : 第2磁石列内の磁石
- 13 : 第3磁石列
- 13a、13b、13c、13d : 第3磁石列内の磁石
- 20 : 第2磁石列群

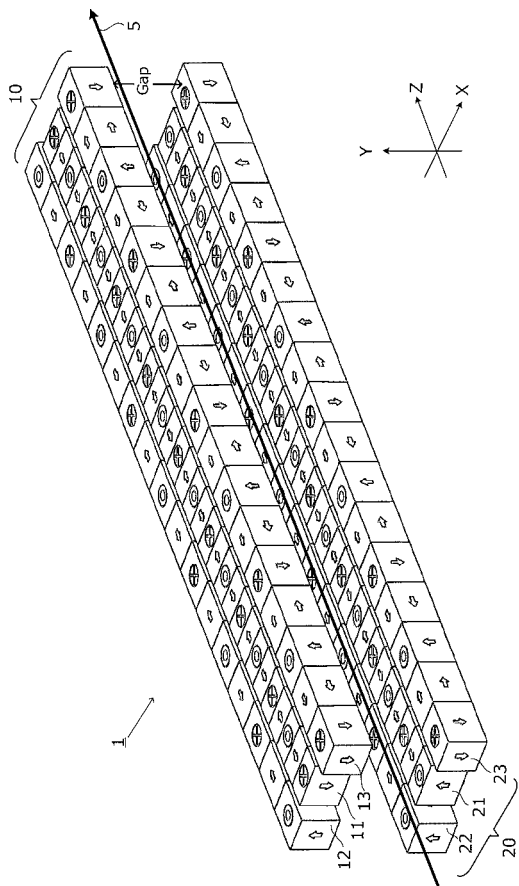
40

50

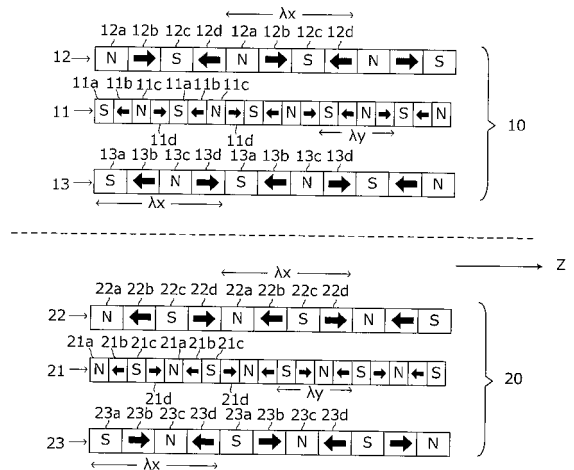


- 2 1 : 第 4 磁石列
- 2 1 a、2 1 b、2 1 c、2 1 d : 第 4 磁石列内の磁石
- 2 2 : 第 5 磁石列
- 2 2 a、2 2 b、2 2 c、2 2 d : 第 5 磁石列内の磁石
- 2 3 : 第 6 磁石列
- 2 3 a、2 3 b、2 3 c、2 3 d : 第 6 磁石列内の磁石
- 3 0 A、3 0 B : 駆動手段
- 3 1、3 2 : 駆動軸
- 3 3、3 4 : 保持部
- 3 5、3 6 : 駆動軸
- 1 0 0 : タンデム型挿入光源
- 1 0 1 : アンジュレータ
- 1 0 3 : アンジュレータ
- 1 0 5 : ビーム軸
- 1 1 0 : クロス型アンジュレータ
- 1 1 1、1 1 2、1 1 3、1 1 4 : 磁気回路
- 1 3 0 : 従来の挿入光源
- 1 3 1、1 3 2、1 3 3、1 3 4、1 3 5、1 3 6 : 磁気回路

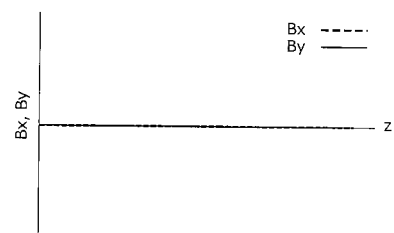
【 図 1 A 】



【 図 1 B 】

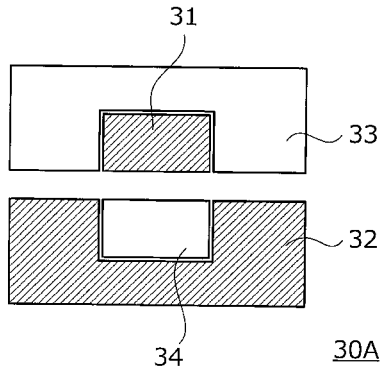


【 図 1 C 】

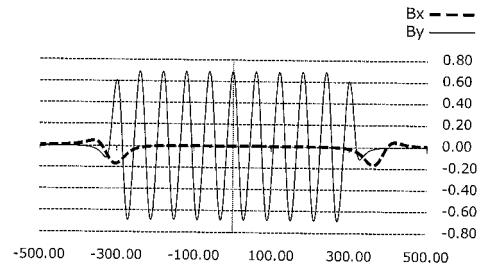




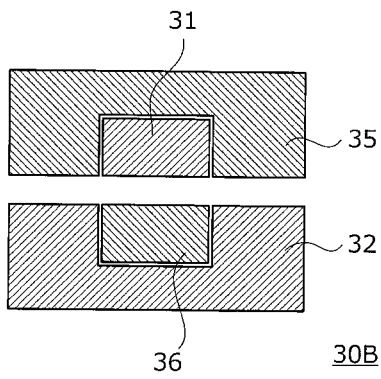
【 図 4 A 】



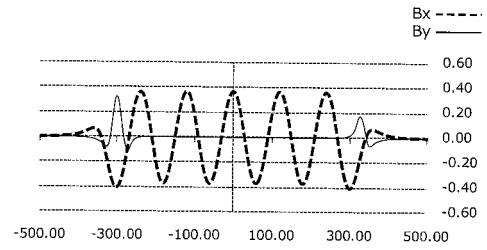
【 図 5 A 】



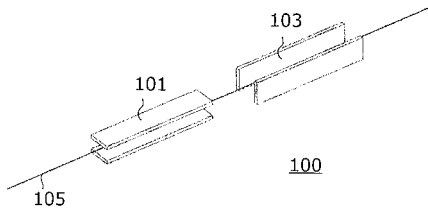
【 図 4 B 】



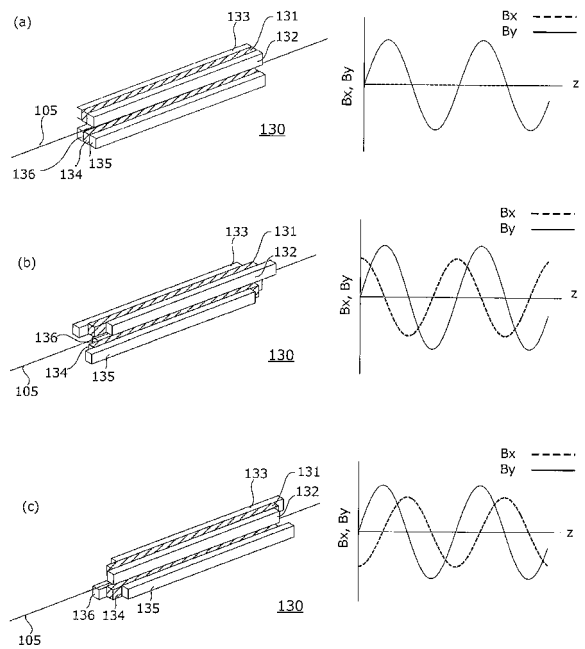
【 図 5 B 】



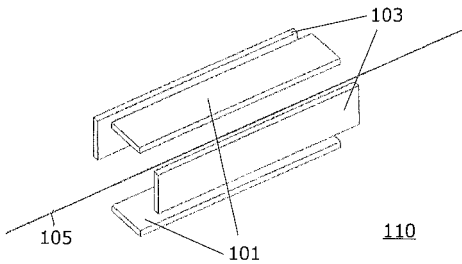
【 図 6 】



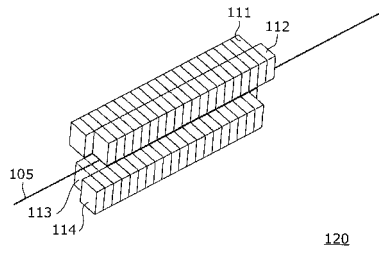
【 図 8 】



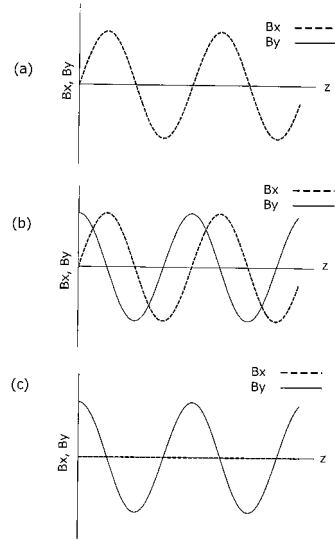
【 図 7 】



【 図 9 A 】



【 図 9 B 】



---

フロントページの続き

(72)発明者 小部 公央

茨城県つくば市大穂1番地1 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構内

Fターム(参考) 2G085 AA13 BC01 BC11 CA11 DB08