

JAERI - M
92-157

垂直偏光アンジュレータの開発

1992年10月

角野 和義*・佐々木茂美

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

垂直偏光アンジュレータの開発

日本原子力研究所・理化学研究所大型放射光施設計画推進共同チーム
角野 和義*・佐々木茂美

(1992年9月24日受理)

磁界解析ソフトウェアを利用して垂直偏光アンジュレータの概念設計を行った。設計計算に際し、アンジュレータの磁場周期長80mm、周期数6(全長480mm)、永久磁石の残留磁束密度1.1T、永久磁石の幅35mm、高さ40mmを仮定した。ここで報告する垂直偏光アンジュレータの構成は1磁場周期に合計8個の磁石を使用するタイプと16個の磁石を使用するタイプとした。それぞれのモデルと以前に報告した新型可変偏光アンジュレータの垂直偏光モード時の磁場強度の比較を行った。

解析の結果、ギャップが20mmの時、1磁場周期に16個の磁石を使用するタイプが新型可変偏光アンジュレータの垂直偏光モードに対し、1.3倍高いピーク磁場を示すことが明らかになった。さらにこの16個の磁石を使用するタイプの磁石列の位相をずらすことにより、新型可変偏光アンジュレータと同様に円偏光を発生できることも判明した。また、この際に新型可変偏光アンジュレータの円偏光モード時よりわずかではあるが高い螺旋磁場が得られることがわかった。

Conceptual Design of Vertical Undulator

Kazunori KAKUNO* and Shigemi SASAKI

JAERI-RIKEN SPring-8 Project Team
2-28-8 Honkomagome, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received September 24, 1992)

A new undulator requiring no constraints in the horizontal beam direction is proposed for generating vertically polarized radiation. This undulator consists of two pairs of planar permanent magnet arrays above and below the electron orbit plane, and generates horizontal magnetic field on the electron orbit which induces vertically sinusoidal electron motion. The configuration of magnet blocks in each array is same as the conventional Halbach type undulator.

This device generates 1.3 times higher horizontal peak magnetic field compared with new helical undulator proposed by Sasaki et. al. in vertical polarization mode. In addition, this device can also generate helical magnetic field for generating circularly polarized radiation by changing the relative position of magnet arrays (phasing).

Keywords: Insertion Device, Undulator, Vertical Polarization, Circular Polarization, Permanent Magnet

* On leave from Shin-Etsu Chemical Co., Ltd.

目 次

1. 序 論	1
2. 構造モデル及び磁場解析	1
3. 円偏光アンジュレータへの応用	2
4. 可変偏光アンジュレータとの比較	3
5. 考 察	3
6. 結 論	4
参考文献	5

Contents

1. Introduction	1
2. Structural Model and Analysis	1
3. Application to Helical Undulator	2
4. Comparisons with Other Devices	3
5. Discussion	3
6. Conclusion	4
References	5

1. 序 論

シンクロトロン放射光が、様々な分野で応用されていることは周知のとおりである。なかでも、アンジュレータ放射光は、偏向電磁石からの光にくらべ、桁違いに高輝度かつ準単色であるため、とりわけ有用である。一般に使われているアンジュレータは、永久磁石を電子軌道面の上下に配置し水平面内で電子を蛇行させるため、水平面内に直線偏光（水平偏光）した光を発生させる。一方、利用分野によっては電子軌道面に対して垂直面内に直線偏光（垂直偏光）または円偏光した放射光を用いる実験も盛んになりつつある。例えば、構造相転移、散漫散乱、生体高分子などの実験では垂直偏光した光の利用が望まれ、磁気散乱、固体電子分光などの実験では円偏光した放射光が利用されている。

これまで、垂直偏光または円偏光した放射光を得るためにさまざまな工夫がなされてきた。[1]～[9] これらの挿入装置は非対称ウイグラー[7]を除いてすべて電子軌道（水平）面内に磁極を持つ構造となっている。しかし、このような構造では真空ダクトの形状等の制限により、水平面内の磁極間隔を十分小さくとれないため短い磁場周期で十分な磁場強度が得られない。つまり、短波長領域の垂直偏光あるいは円偏光したアンジュレータ放射光を発生させることは不可能に近い。そこで、従来の水平偏光アンジュレータと類似の構造で電子軌道面内に磁極構造を持たない磁石列の配置で円偏光と直線偏光が可能なアンジュレータが Elleaumeにより最初に考案された。[10] しかし、このタイプのアンジュレータにおける直線偏光モードの場合水平面に対して 45° に傾いた偏光となる。また、磁場特性自体も上方の磁石列で水平磁場を、下方の磁石列で垂直磁場をそれぞれ分担しているため、十分な強磁場は得られていない。続いて Diviacco と Walkerにより高い螺旋状磁場が得られるアンジュレータが開発された。[11] このタイプのアンジュレータの欠点は直線偏光の発生が不可能であるばかりでなく、円偏光についてもヘリシティが変更できない。これらの問題を解決するために新しい可変偏光アンジュレータが提案された。[12] 本報告ではこの可変偏光アンジュレータよりも垂直偏光モードで高い磁場性能をもつ垂直偏光アンジュレータを提案する。さらに、このアンジュレータは、可変偏光アンジュレータと同様に隣り合う磁石列の磁場周期をずらすことにより円偏光モードでの使用も可能であることを示す。

2. 構造モデル及び磁場解析

電子軌道面内に磁極構造を持たない垂直偏光アンジュレータのモデルとして新しく提案した2つのタイプのアンジュレータと可変偏光アンジュレータの垂直偏光モード時の磁場特性について議論を行う。

それぞれのアンジュレータのパラメータは、次のように決めた。

1. 序 論

シンクロトロン放射光が、様々な分野で応用されていることは周知のとおりである。なかでも、アンジュレータ放射光は、偏向電磁石からの光にくらべ、桁違いに高輝度かつ準単色であるため、とりわけ有用である。一般に使われているアンジュレータは、永久磁石を電子軌道面の上下に配置し水平面内で電子を蛇行させるため、水平面内に直線偏光（水平偏光）した光を発生させる。一方、利用分野によっては電子軌道面に対して垂直面内に直線偏光（垂直偏光）または円偏光した放射光を用いる実験も盛んになりつつある。例えば、構造相転移、散漫散乱、生体高分子などの実験では垂直偏光した光の利用が望まれ、磁気散乱、固体電子分光などの実験では円偏光した放射光が利用されている。

これまで、垂直偏光または円偏光した放射光を得るためにさまざまな工夫がなされてきた。[1]～[9] これらの挿入装置は非対称ウイグラー[7]を除いてすべて電子軌道（水平）面内に磁極を持つ構造となっている。しかし、このような構造では真空ダクトの形状等の制限により、水平面内の磁極間隔を十分小さくとれないため短い磁場周期で十分な磁場強度が得られない。つまり、短波長領域の垂直偏光あるいは円偏光したアンジュレータ放射光を発生させることは不可能に近い。そこで、従来の水平偏光アンジュレータと類似の構造で電子軌道面内に磁極構造を持たない磁石列の配置で円偏光と直線偏光が可能なアンジュレータが Elleaumeにより最初に考案された。[10] しかし、このタイプのアンジュレータにおける直線偏光モードの場合水平面に対して 45° に傾いた偏光となる。また、磁場特性自体も上方の磁石列で水平磁場を、下方の磁石列で垂直磁場をそれぞれ分担しているため、十分な強磁場は得られていない。続いて Diviacco と Walkerにより高い螺旋状磁場が得られるアンジュレータが開発された。[11] このタイプのアンジュレータの欠点は直線偏光の発生が不可能であるばかりでなく、円偏光についてもヘリシティが変更できない。これらの問題を解決するために新しい可変偏光アンジュレータが提案された。[12] 本報告ではこの可変偏光アンジュレータよりも垂直偏光モードで高い磁場性能をもつ垂直偏光アンジュレータを提案する。さらに、このアンジュレータは、可変偏光アンジュレータと同様に隣り合う磁石列の磁場周期をずらすことにより円偏光モードでの使用も可能であることを示す。

2. 構造モデル及び磁場解析

電子軌道面内に磁極構造を持たない垂直偏光アンジュレータのモデルとして新しく提案した2つのタイプのアンジュレータと可変偏光アンジュレータの垂直偏光モード時の磁場特性について議論を行う。

それぞれのアンジュレータのパラメータは、次のように決めた。

磁石周期長	$\lambda_u = 80 \text{ mm}$
周期数	$N_u = 6 \text{ (} L_u = 480 \text{ mm)}$
磁石寸法	$w = 35 \text{ mm}$
	$h = 40 \text{ mm}$
残留磁束密度	$B_r = 1.1 \text{ T}$

タイプ1のアンジュレータの磁石構造の概念をFig. 1に示す。ここで、 g は上部磁石列と下部磁石列のギャップ、 λ_u は磁場周期長、 h と w はそれぞれの磁石の高さと幅である。図に示した磁石ブロック中の矢印は磁化方向を示している。それぞれの磁石の磁化方向は、隣り合った磁石に対して反対となっている。このような構造を採用することで電子軌道上、すなわちアンジュレータ軸上で水平方向（ x 成分）の磁場を得ることができる。

タイプ2のアンジュレータの磁石構造の概念図をFig. 2に示す。この構造はハルバック型アンジュレータ2組を $\lambda_u/2$ だけ磁場周期をずらして並べたものであり、タイプ1と同じく軸上で x 成分の磁場を得ることができる。

Fig. 3にアンジュレータのギャップが20mmのときのそれぞれのタイプの電子軌道軸上における磁場の x 成分（ B_x ）の分布を示す。同じ電子の軌道軸上における磁場の y 成分（ B_y ）と z 成分（ B_z ）はそれぞれのタイプにおいて現われなかった。また、Fig. 4にそれぞれのアンジュレータのギャップを変えたときの B_x のピーク磁場の変化を示す。これらの結果よりタイプ2のアンジュレータが最も効率がよく電子軌道軸上に磁束を集中できることがわかる。なお、本報告での磁場解析は、積分方程式法を用いた非線形静磁場解析プログラムELF/MAGICを用いた。

3. 円偏光アンジュレータへの応用

このアンジュレータは、表題に示した通り、垂直直線偏光した放射光を発生させるため電子軌道上で水平磁場を効率良く発生できるよう最適化した磁気回路を組んだが、以下に示すように円偏光を発生させることも可能である。

Fig. 5は、タイプ2のアンジュレータを z 軸方向に対して左下の磁石列と右上の磁石列を同期して同じ磁場周期の位相（ $1/4$ ） λ_u だけずらしたときの状態を示したものである。ここで、 D は左右の磁石列に対する位相のずれ幅を示している。

Fig. 6に左右の磁石列の位相を変化させたときの解析結果を示す。これらはアンジュレータ軸上の磁場分布すなわち電子軌道上の分布を示す。Fig. 6において実線は軌道上磁場の x 成分（ B_x ）を示し、波線は y 成分（ B_y ）を示す。このように磁石列の位相を変化させることにより、垂直、水平、螺旋状の磁場を発生できることがわかる。円偏光を得るためには B_x と B_y のピーク磁場強度が等しくなるよう位相差 D を

磁石周期長	$\lambda_u = 80 \text{ mm}$
周期数	$N_u = 6 \text{ (} L_u = 480 \text{ mm)}$
磁石寸法	$w = 35 \text{ mm}$
	$h = 40 \text{ mm}$
残留磁束密度	$B_r = 1.1 \text{ T}$

タイプ1のアンジュレータの磁石構造の概念をFig. 1に示す。ここで、 g は上部磁石列と下部磁石列のギャップ、 λ_u は磁場周期長、 h と w はそれぞれの磁石の高さと幅である。図に示した磁石ブロック中の矢印は磁化方向を示している。それぞれの磁石の磁化方向は、隣り合った磁石に対して反対となっている。このような構造を採用することで電子軌道上、すなわちアンジュレータ軸上で水平方向 (x 成分) の磁場を得ることができる。

タイプ2のアンジュレータの磁石構造の概念図をFig. 2に示す。この構造はハルバック型アンジュレータ2組を $\lambda_u/2$ だけ磁場周期をずらして並べたものであり、タイプ1と同じく軸上で x 成分の磁場を得ることができる。

Fig. 3にアンジュレータのギャップが20mmのときのそれぞれのタイプの電子軌道軸上における磁場の x 成分 (B_x) の分布を示す。同じ電子の軌道軸上における磁場の y 成分 (B_y) と z 成分 (B_z) はそれぞれのタイプにおいて現われなかった。また、Fig. 4にそれぞれのアンジュレータのギャップを変えたときの B_x のピーク磁場の変化を示す。これらの結果よりタイプ2のアンジュレータが最も効率がよく電子軌道軸上に磁束を集中できることがわかる。なお、本報告での磁場解析は、積分方程式法を用いた非線形静磁場解析プログラムELF/MAGICを用いた。

3. 円偏光アンジュレータへの応用

このアンジュレータは、表題に示した通り、垂直直線偏光した放射光を発生させるため電子軌道上で水平磁場を効率良く発生できるよう最適化した磁気回路を組んだが、以下に示すように円偏光を発生させることも可能である。

Fig. 5は、タイプ2のアンジュレータを z 軸方向に対して左下の磁石列と右上の磁石列を同期して同じ磁場周期の位相 ($1/4$) λ_u だけずらしたときの状態を示したものである。ここで、 D は左右の磁石列に対する位相のずれ幅を示している。

Fig. 6に左右の磁石列の位相を変化させたときの解析結果を示す。これらはアンジュレータ軸上の磁場分布すなわち電子軌道上の分布を示す。Fig. 6において実線は軌道上磁場の x 成分 (B_x) を示し、波線は y 成分 (B_y) を示す。このように磁石列の位相を変化させることにより、垂直、水平、螺旋状の磁場を発生できることがわかる。円偏光を得るためには B_x と B_y のピーク磁場強度が等しくなるよう位相差 D を

($0/8$) λ_u から ($2/8$) λ_u の間で調整すればよい。さらに位相を反対方向にずらすことにより右周り、または左周りの円偏光が可能となる。

4. 可変偏光アンジュレータとの比較 (円偏光モード)

可変偏光アンジュレータでは、左右の磁石列の位相差が零のときに電子軌道上で垂直磁場を発生するように磁石配列を決めたが、垂直偏光アンジュレータでは位相差が零のときに水平磁場を発生する。そこで両者を比較するためにタイプ2のアンジュレータを位相差が 0° のときに水平偏光モード(垂直磁場)となるように磁石列の位相をずらし、かつアンジュレータ端部の磁石を構成し直し磁場計算を行った。この再構成によって端部の磁場特性は変化するが、内部の磁場特性は位相が半波長($\lambda_u/2$)ずれるだけで全く同等である。Fig. 7にタイプ2(再構成されたもの)の磁石列の位相が($5/16$) λ_u のときと可変偏光アンジュレータの磁石列の位相が($3/8$) λ_u のときの、それぞれのギャップを変化させたときのピーク磁場の変化を示す。この図よりタイプ2のアンジュレータの方が円偏光モードの時にも強い磁場が得られることがわかる。これは 45° の磁化方向を 90° (垂直)にすることにより電子軌道上のピークの B_x 成分を増加させることができたためである。

5. 考 察

x方向の正弦波状磁場を得るために2つのタイプの磁気回路を考案した。可変偏光アンジュレータの垂直偏光モードのときとタイプ1、2の磁石配置を比較した結果タイプ2で最も高いピーク磁場が得られた。半面、タイプ1では可変偏光アンジュレータと同程度のピーク磁場となった。これはタイプ1においてx方向と同じようにz方向にも逆極性の磁石が隣接しており、この方向にも磁束が流れるためである。

一方、タイプ2ではz方向に隣接する逆極性の磁石は存在しないため、x軸方向に隣接する逆極性の磁石に多く磁束が流れ、結果的にx成分が増加したと考えられる。

磁化方向が水平面に対して 45° 傾いた可変偏光アンジュレータの場合、水平偏光モード(垂直磁場)では磁束を電子軌道軸上に集中させることができ、 90° の垂直偏光アンジュレータの場合より高いピーク磁場 B_y が得られる。しかし垂直偏光モード(水平磁場)では、磁束は電子軌道上に十分に到達できずリターンしてしまう。これに対し磁化方向が 90° の場合磁束をより遠くまで到達させることができる。このため、円偏光モードにおいても B_x が増加する結果となり、可変偏光アンジュレータに比べ高い螺旋状磁場が得られた。

($0/8$) λ_u から ($2/8$) λ_u の間で調整すればよい。さらに位相を反対方向にずらすことにより右周り、または左周りの円偏光が可能となる。

4. 可変偏光アンジュレータとの比較 (円偏光モード)

可変偏光アンジュレータでは、左右の磁石列の位相差が零のときに電子軌道上で垂直磁場を発生するように磁石配列を決めたが、垂直偏光アンジュレータでは位相差が零のときに水平磁場を発生する。そこで両者を比較するためにタイプ2のアンジュレータを位相差が 0° のときに水平偏光モード(垂直磁場)となるように磁石列の位相をずらし、かつアンジュレータ端部の磁石を構成し直し磁場計算を行った。この再構成によって端部の磁場特性は変化するが、内部の磁場特性は位相が半波長($\lambda_u/2$)ずれるだけで全く同等である。Fig. 7にタイプ2(再構成されたもの)の磁石列の位相が($5/16$) λ_u のときと可変偏光アンジュレータの磁石列の位相が($3/8$) λ_u のときの、それぞれのギャップを変化させたときのピーク磁場の変化を示す。この図よりタイプ2のアンジュレータの方が円偏光モードの時にも強い磁場が得られることがわかる。これは 45° の磁化方向を 90° (垂直)にすることにより電子軌道上のピークの B_x 成分を増加させることができたためである。

5. 考 察

x方向の正弦波状磁場を得るために2つのタイプの磁気回路を考案した。可変偏光アンジュレータの垂直偏光モードのときとタイプ1、2の磁石配置を比較した結果タイプ2で最も高いピーク磁場が得られた。半面、タイプ1では可変偏光アンジュレータと同程度のピーク磁場となった。これはタイプ1においてx方向と同じようにz方向にも逆極性の磁石が隣接しており、この方向にも磁束が流れるためである。

一方、タイプ2ではz方向に隣接する逆極性の磁石は存在しないため、x軸方向に隣接する逆極性の磁石に多く磁束が流れ、結果的にx成分が増加したと考えられる。

磁化方向が水平面に対して 45° 傾いた可変偏光アンジュレータの場合、水平偏光モード(垂直磁場)では磁束を電子軌道軸上に集中させることができ、 90° の垂直偏光アンジュレータの場合より高いピーク磁場 B_y が得られる。しかし垂直偏光モード(水平磁場)では、磁束は電子軌道上に十分に到達できずリターンしてしまう。これに対し磁化方向が 90° の場合磁束をより遠くまで到達させることができる。このため、円偏光モードにおいても B_x が増加する結果となり、可変偏光アンジュレータに比べ高い螺旋状磁場が得られた。

(0/8) λ_u から (2/8) λ_u の間で調整すればよい。さらに位相を反対方向にずらすことにより右周り、または左周りの円偏光が可能となる。

4. 可変偏光アンジュレータとの比較 (円偏光モード)

可変偏光アンジュレータでは、左右の磁石列の位相差が零のときに電子軌道上で垂直磁場を発生するように磁石配列を決めたが、垂直偏光アンジュレータでは位相差が零のときに水平磁場を発生する。そこで両者を比較するためにタイプ2のアンジュレータを位相差が 0° のときに水平偏光モード(垂直磁場)となるように磁石列の位相をずらし、かつアンジュレータ端部の磁石を構成し直し磁場計算を行った。この再構成によって端部の磁場特性は変化するが、内部の磁場特性は位相が半波長($\lambda_u/2$)ずれるだけで全く同等である。Fig. 7にタイプ2(再構成されたもの)の磁石列の位相が(5/16) λ_u のときと可変偏光アンジュレータの磁石列の位相が(3/8) λ_u のときの、それぞれのギャップを変化させたときのピーク磁場の変化を示す。この図よりタイプ2のアンジュレータの方が円偏光モードの時にも強い磁場が得られることがわかる。これは 45° の磁化方向を 90° (垂直)にすることにより電子軌道上のピークの B_x 成分を増加させることができたためである。

5. 考 察

x方向の正弦波状磁場を得るために2つのタイプの磁気回路を考案した。可変偏光アンジュレータの垂直偏光モードのときとタイプ1、2の磁石配置を比較した結果タイプ2で最も高いピーク磁場が得られた。半面、タイプ1では可変偏光アンジュレータと同程度のピーク磁場となった。これはタイプ1においてx方向と同じようにz方向にも逆極性の磁石が隣接しており、この方向にも磁束が流れるためである。

一方、タイプ2ではz方向に隣接する逆極性の磁石は存在しないため、x軸方向に隣接する逆極性の磁石に多く磁束が流れ、結果的にx成分が増加したと考えられる。

磁化方向が水平面に対して 45° 傾いた可変偏光アンジュレータの場合、水平偏光モード(垂直磁場)では磁束を電子軌道軸上に集中させることができ、 90° の垂直偏光アンジュレータの場合より高いピーク磁場 B_y が得られる。しかし垂直偏光モード(水平磁場)では、磁束は電子軌道上に十分に到達できずリターンしてしまう。これに対し磁化方向が 90° の場合磁束をより遠くまで到達させることができる。このため、円偏光モードにおいても B_x が増加する結果となり、可変偏光アンジュレータに比べ高い螺旋状磁場が得られた。

アンジュレータ等に使用される高い磁場特性を示す永久磁石として、現在希土類の焼結磁石が使われる。しかし、焼結磁石は磁化方向を 45° に傾け直接製造することは困難である。このような磁石を製造するときは一旦磁化方向を水平または垂直にして焼結した直方体の磁石から磁化方向を 45° に合わせ、削り出さなければならない。よって製造の面からも磁化方向が 90° の方が必要な磁石を削り出す必要がなくコストを低く抑えることができる。

6. 結 論

電子軌道（水平）面内に磁極構造を持たない新しい横磁場型垂直偏光アンジュレータの提案を行った。ギャップが20 mmで磁場周期長が80 mmのとき可変偏光アンジュレータの垂直偏光モードより1.3倍強いピーク磁場が得られた。さらに可変偏光アンジュレータと同じようにここで提案されたアンジュレータの磁石列の位相を変化させることにより、わずかながら可変偏光アンジュレータより強い螺旋状磁場が得られた。また、各磁石ブロックの磁化方向が従来型（ハルバックタイプ）と同じであるため、可変偏光アンジュレータより磁石の製造コストが低くなる大きなメリットがある。

アンジュレータ等を使用される高い磁場特性を示す永久磁石として、現在希土類の焼結磁石が使われる。しかし、焼結磁石は磁化方向を 45° に傾け直接製造することは困難である。このような磁石を製造するときは一旦磁化方向を水平または垂直にして焼結した直方体の磁石から磁化方向を 45° に合わせ、削り出さなければならない。よって製造の面からも磁化方向が 90° の方が必要な磁石を削り出す必要がなくコストを低く抑えることができる。

6. 結 論

電子軌道（水平）面内に磁極構造を持たない新しい横磁場型垂直偏光アンジュレータの提案を行った。ギャップが20mmで磁場周期長が80mmのとき可変偏光アンジュレータの垂直偏光モードより1.3倍強いピーク磁場が得られた。さらに可変偏光アンジュレータと同じようにここで提案されたアンジュレータの磁石列の位相を変化させることにより、わずかながら可変偏光アンジュレータより強い螺旋状磁場が得られた。また、各磁石ブロックの磁化方向が従来型（ハルバックタイプ）と同じであるため、可変偏光アンジュレータより磁石の製造コストが低くなる大きなメリットがある。

参 考 文 献

- [1] K. J. Kim, Nucl. Instr. and Meth. **219** (1984) 425.
- [2] K. J. Kim, Nucl. Instr. and Meth. **222** (1984) 11.
- [3] For example , see Photon Factory Activity Rep. (1983/84) IV-34.
- [4] H. Onuki , Nucl. Instr. and Meth. **A246** (1986) 94.
- [5] S. Yamamoto and H. Kitamura, Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1987) L1613.
- [6] S. Yamamoto, H. Kawata, H. Kitamura and M. Ando, Phys. Rev. Lett. **62** (1989) 2672.
- [7] J. Goulon, P. Elleaume and D. Raoux, Nucl. Instr. and Meth. **A254** (1987) 192.
- [8] H. Ohmi, Photon Factory Activity Rep. **8** (1990) R-13.
- [9] K. Yagi, H. Onuki, S. Sugiyama, and T. Yamazaki , Rev. Sci. Instrum. **63**(1992) 396.
- [10] P. Elleaume, Nucl. Instr. and Meth. **A291** (1990) 371.
- [11] B. Divacco and R. P. Walker, Nucl. Instr. and Meth. **A292** (1990) 517.
- [12] S. Sasaki, K. Miyata and T. Takada, Submitted to Jpn. J. Appl. Phys.

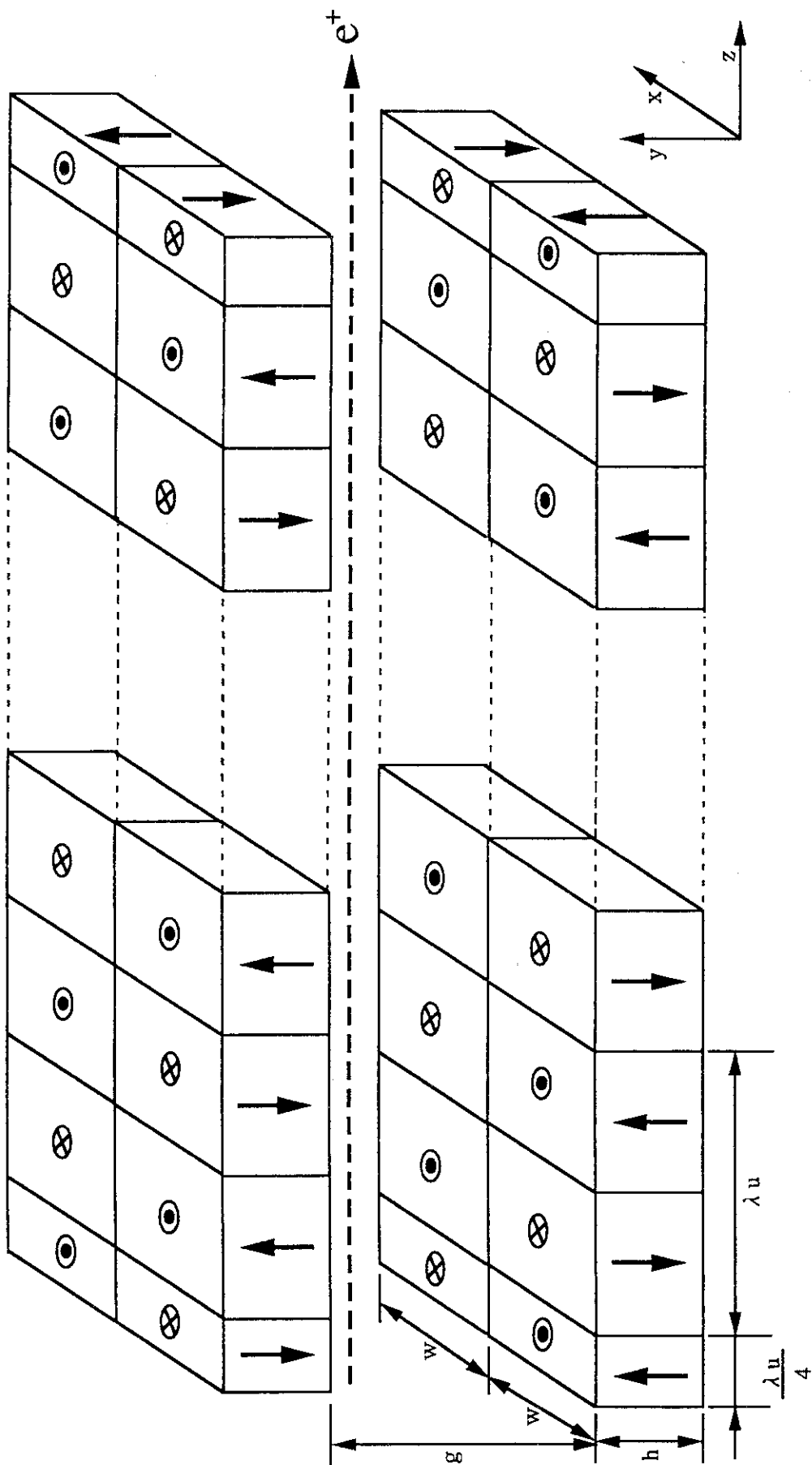


Fig. 1 Schematic view of the magnetic structure for generating vertically polarized undulator radiation (type 1).

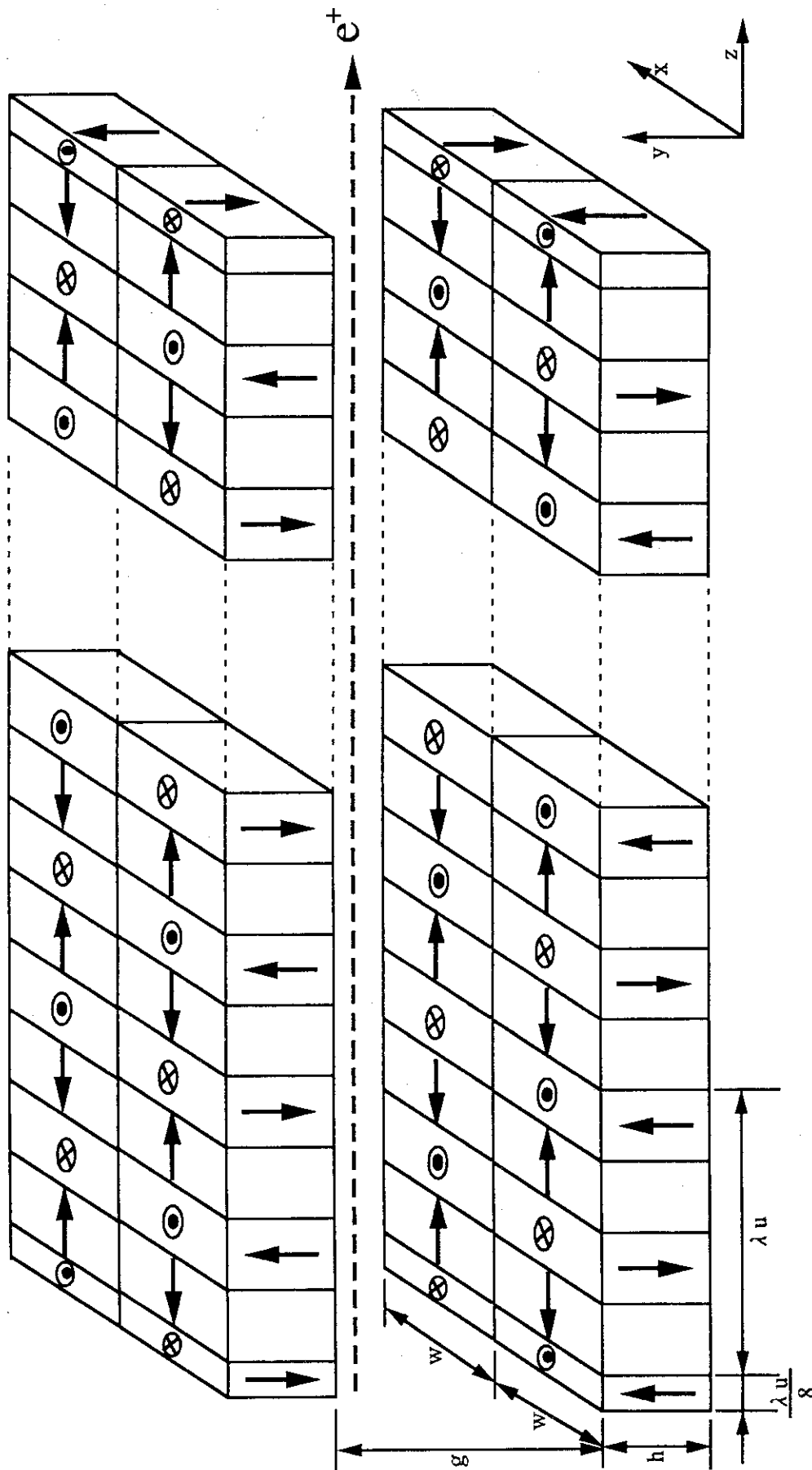


Fig. 2 Schematic view of the magnetic structure for generating vertically polarized undulator radiation (type 2).

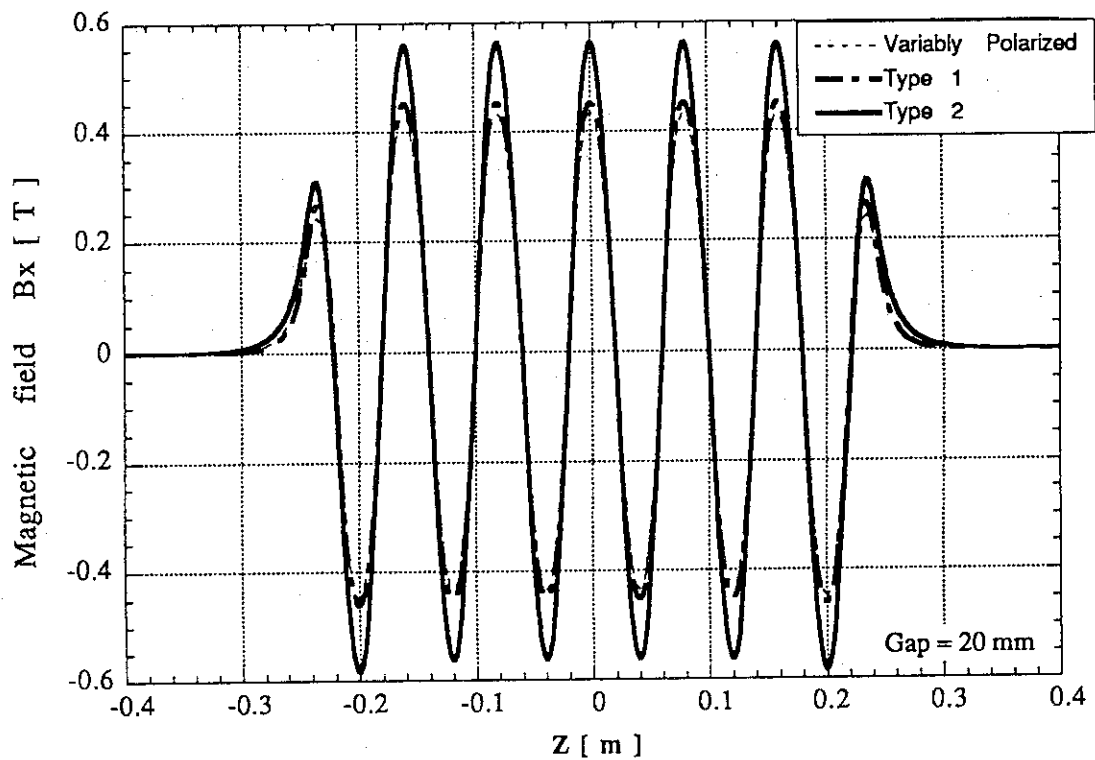


Fig. 3 Comparison of on-axis magnetic field (B_x) distributions for three undulators (planar variable polarized undulator in vertical polarization mode[12], undulator of type 1, and undulator of type 2).

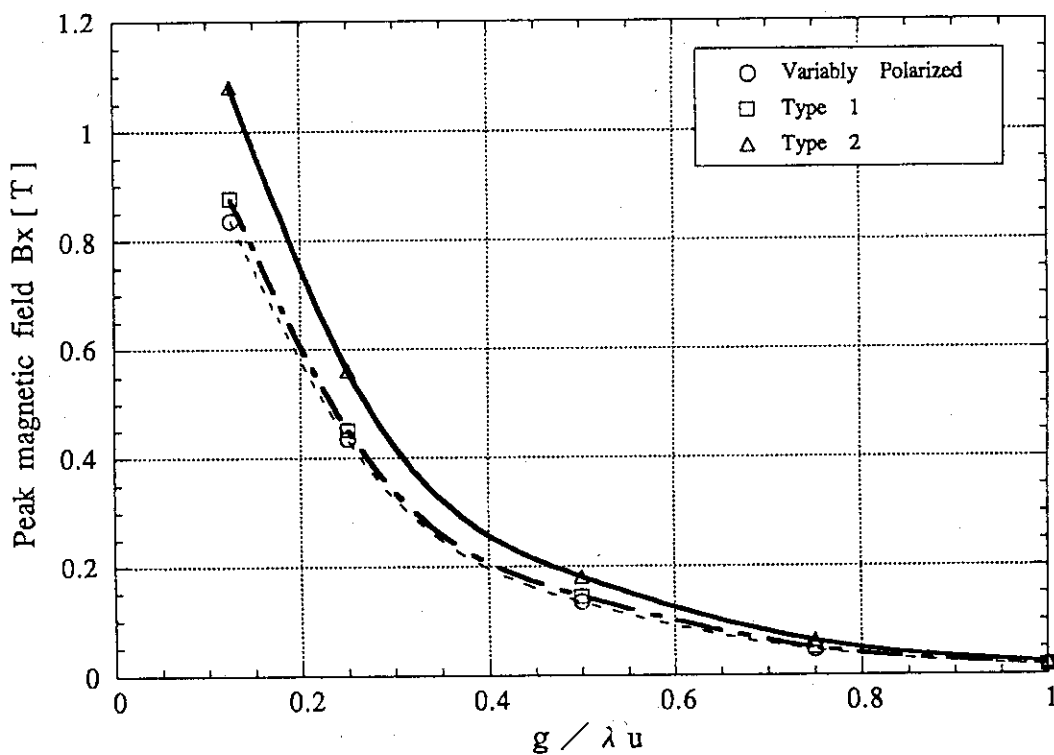


Fig. 4 Comparison of peak field as a function of the gap for three devices in vertical polarization mode.

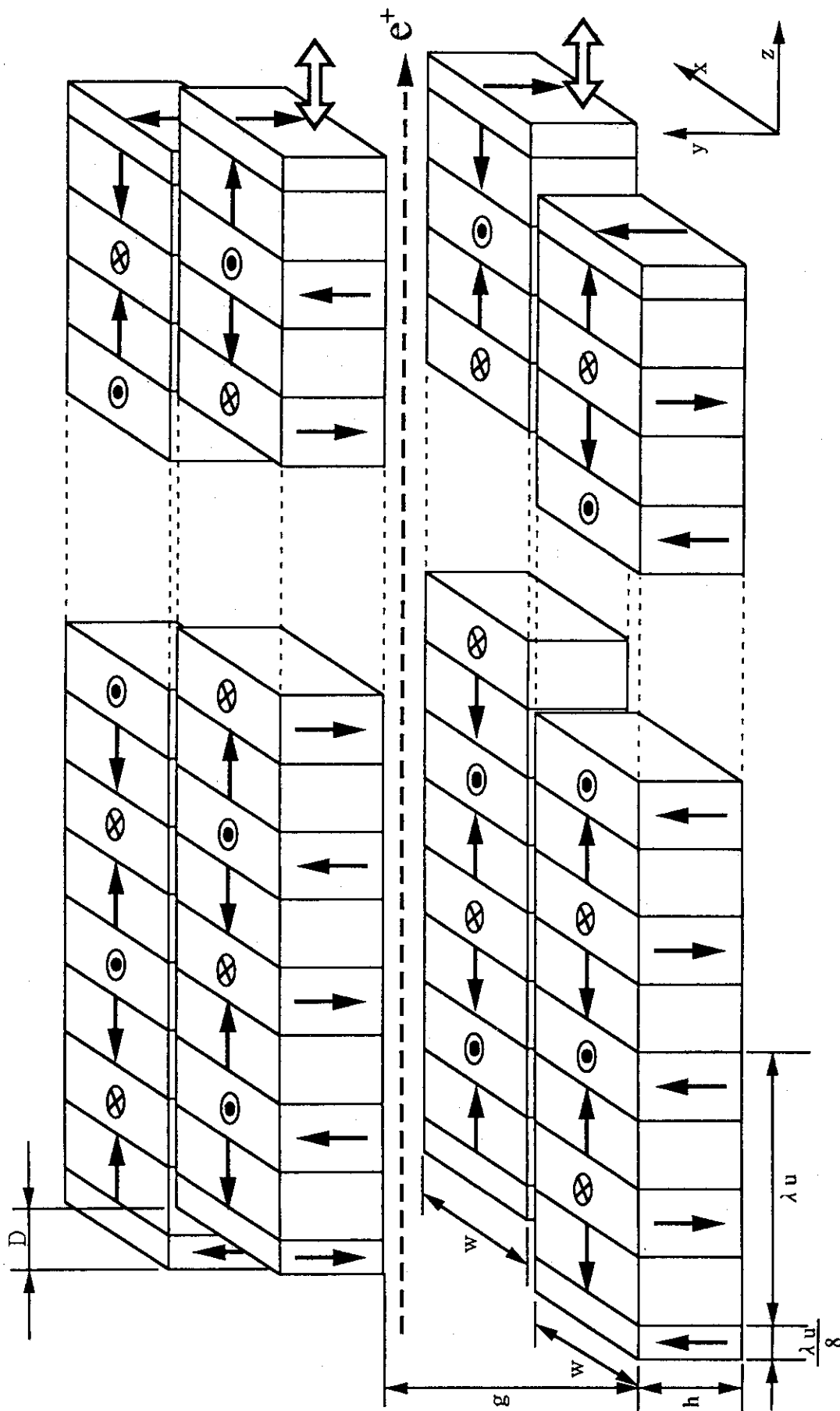


Fig. 5 Schematic view of the magnetic structure for generating variably polarized undulator radiation. $D = \lambda u/4$.

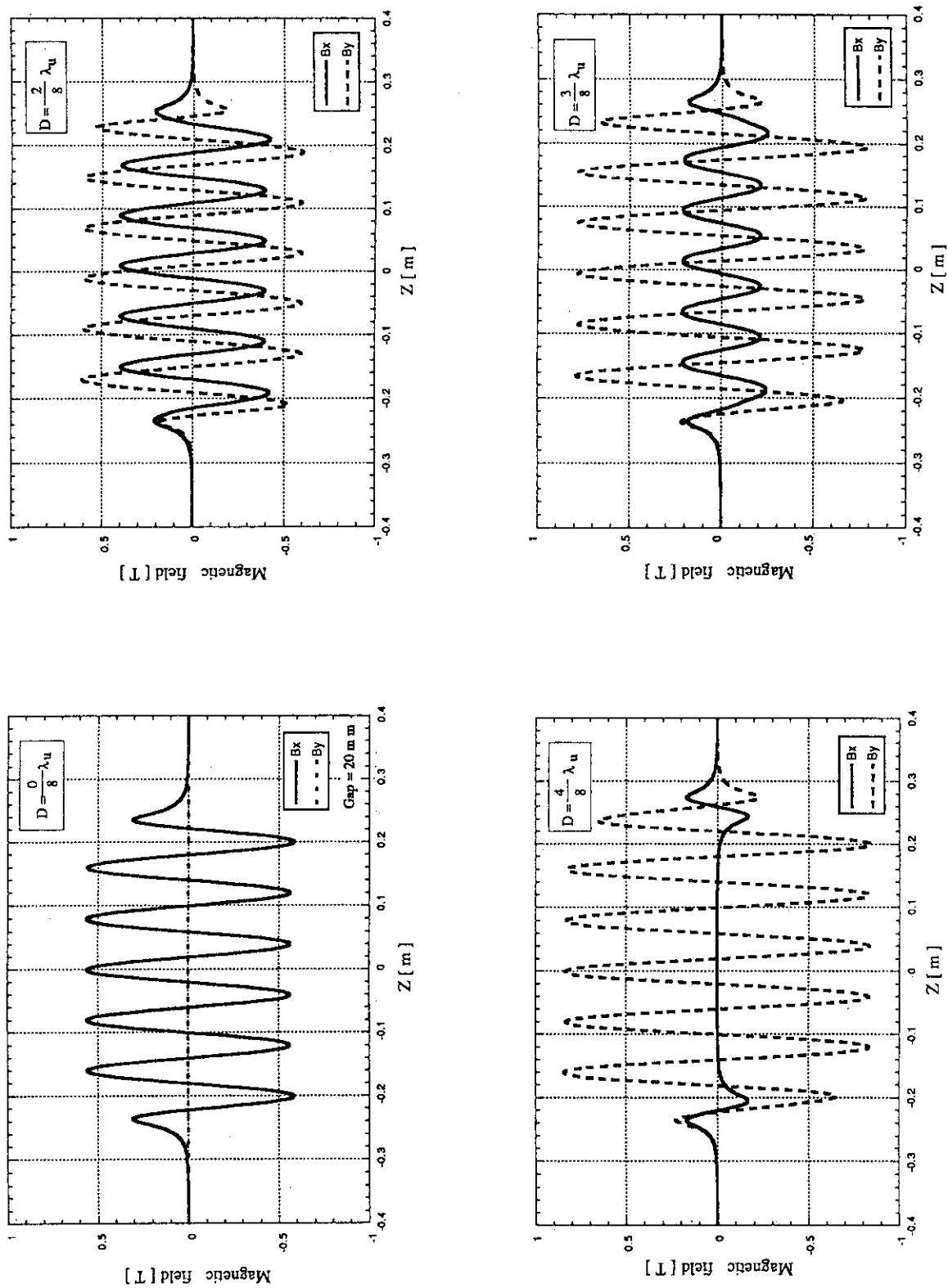


Fig. 6 On-axis magnetic field distributions in various phases ($D = 0, 0.4\lambda_u/8, 2\lambda_u/8, 3\lambda_u/8$) for a short period magnetic structure. Solid line: B_x , Broken line: B_y .

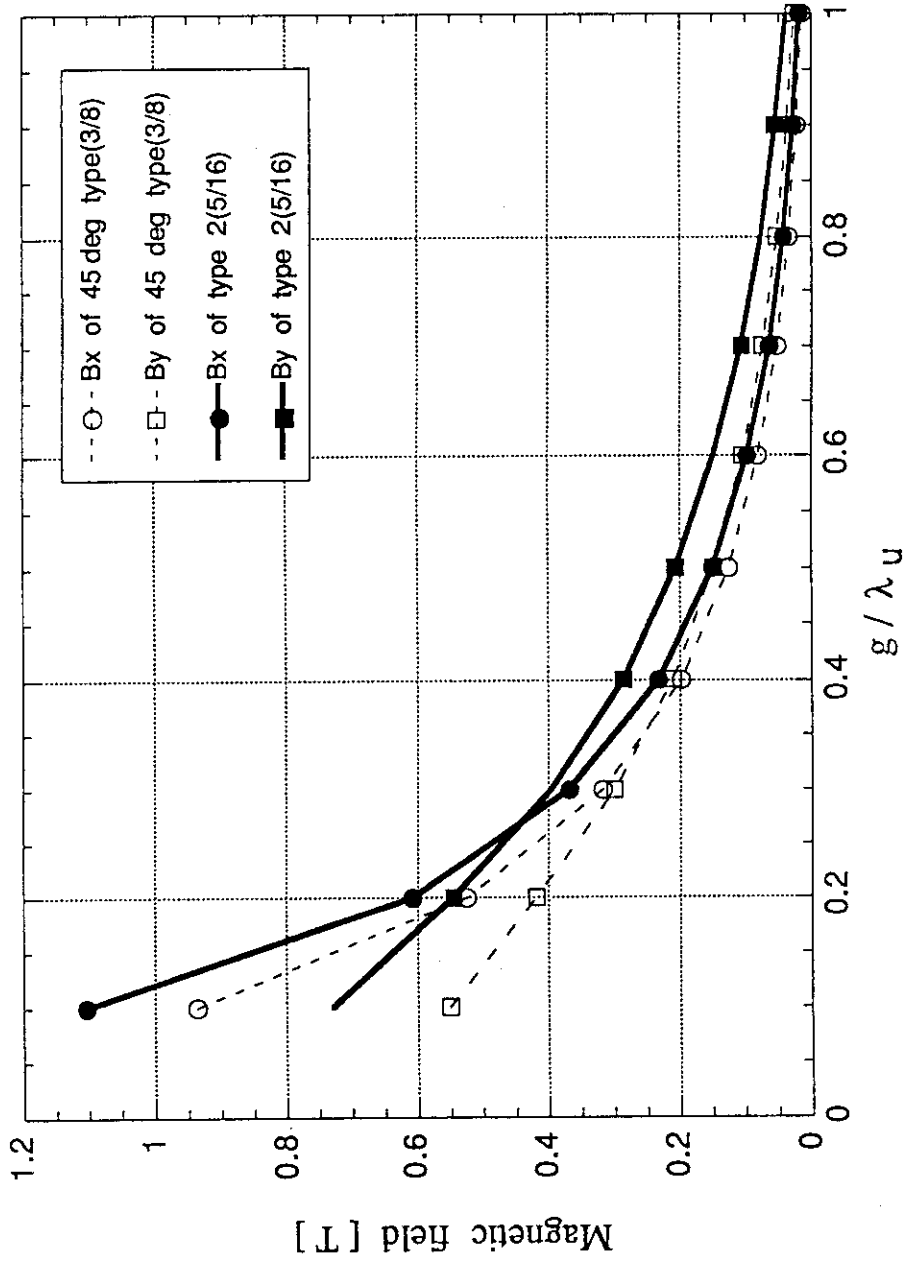


Fig. 7 Comparison of peak field as a function of the gap in circular polarization mode.