



СОЮЗ СОВЕТСКИХ  
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ  
РЕСПУБЛИК

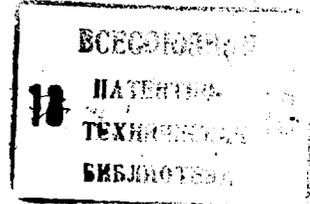
(19) SU (11) 1064487 A

3(5D) Н 05 Н 7/04

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР  
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

# ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

## К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ



(21)3491864/18-21  
(22)08.09.82  
(46)30.12.83. Бкл. № 48  
(72)Е.Г. Бессонов и В.И. Алексеев  
(71)Ордена Ленина физический институт им. П.Н. Лебедева  
(53)621.384.6(088.6)  
(56)1.Авторское свидетельство СССР № 538508, кл. Н 05 Н 7/04, 1975.

2. Алферов Д.Ф. и др. Ондулятор как источник электромагнитного излучения. - Particle accelerators, v.9, № 4, p. 233, 1979 (прототип).

(54)(57) ОНДУЛЯТОР, содержащий цилиндрический каркас с размещенными вдоль его оси постоянными магнитами, отличающийся тем, что, с целью расширения функциональных возможностей ондулятора, каждый постоянный магнит повернут относительно

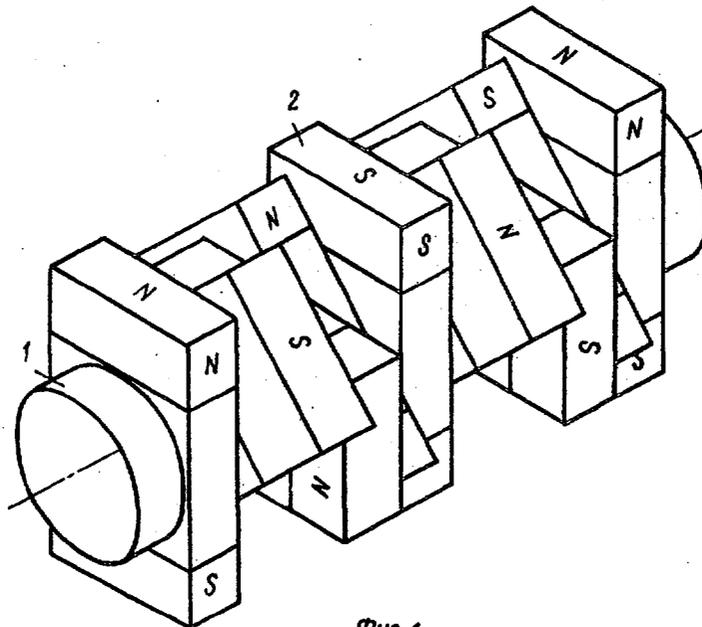
предыдущего на угол  $\varphi$ , определяемый соотношением

$$\varphi = \pi \left( \frac{m-1}{m} \right),$$

при этом длина магнитов  $L$  выбирается из соотношений

$$\frac{L_{2k}}{L_{2k-1}} = \cos \frac{\pi}{m}; L_{2k-1} = L_{2k+1}; L_{2k} = L_{2k+2}$$

где  $m$  - порядок симметрии кривой закона циркуляции вектора скорости частицы в ондуляторе,  $k$  - 1, 2, 3, ... - порядковый номер магнита.



Фиг. 1

(19) SU (11) 1064487 A

Изобретение относится к ускорительной технике и может быть использовано для получения поляризованного электромагнитного излучения в широкой области спектра.

Ондулятором называется устройство, в котором под действием внешнего магнитного поля релятивистские заряженные частицы совершают вынужденные периодические колебания относительно некоторого равномерно движущегося центра. Колебательное движение частиц сопровождается электромагнитным излучением. Ondуляторное излучение обладает интересными поляризационными характеристиками. Если частицы в ондуляторе движутся по спирали, то излучение, испускаемое ими, циркулярно поляризовано. Циркулярно поляризованное излучение необходимо для исследования химических или биологических структур, обладающих дихроизмом.

Известен ондулятор, позволяющий получить циркулярно поляризованное излучение, содержащий цилиндрический каркас, на котором концентрично расположены две обмотки, каждая из которых намотана двумя последовательно соединенными проводниками, образующими двухзаходную спираль, заходы которой сдвинуты друг относительно друга на половину шага намотки [1].

В данном ондуляторе можно получить циркулярно поляризованное излучение при включении только одной обмотки. Однако в диапазоне углов  $\Delta\theta = \frac{1}{2}\theta$  вблизи направления  $\theta = 0$  сосредоточена в основном первая гармоника, степень циркулярной поляризации которой 100%, а на гармониках высших порядков в направлениях соответствующих их максимальной жесткости и интенсивности излучения степень циркулярной поляризации равна нулю.

Наиболее близким по технической сущности к предлагаемому является ондулятор, содержащий цилиндрический каркас с размещенными вдоль его оси постоянными магнитами. Магниты расположены вдоль оси таким образом, что при переходе к соседнему магниту направление магнитного поля поворачивается на угол  $\frac{2\pi}{n}$ , где  $n$  - целое число [2].

В указанном ондуляторе формируется кусочно-однородное монотонное вращающееся магнитное поле, вдоль геометрической оси сосредоточена в основном первая гармоника излучения, а на гармониках высших порядков, в направлениях, соответствующих их максимальной жесткости и интенсивности излучения, как и в аналоге, степень циркулярной поляризации равна нулю. Это не позволяет использовать

ондулятор как источник жесткого циркулярно поляризованного излучения в области мягкого рентгена при энергиях ускорителя 1-5 ГэВ. Кроме того, излучение на гармониках высших порядков направлено не по геометрической оси ондулятора, что значительно затрудняет использование его как источника для облучения объектов. Для получения излучения в области мягкого рентгена на первой гармонике необходимо уменьшать длину периода магнитного поля  $\Delta\lambda_0$  ондулятора. По техническим причинам сделать  $\Delta\lambda_0 \sim 1$  см при зазоре между полюсами магнитом  $h = 2$  см (определяется рабочей областью синхротронов и накопителей), сохранив достаточно большой амплитуду магнитного поля, нельзя.

Цель изобретения - расширение функциональных возможностей ондулятора путем увеличения жесткости излучения и получение высокой степени циркулярно поляризованного излучения по заранее заданному закону циркуляции вектора скорости частицы в ондуляторе на гармониках высших порядков в максимуме их интенсивности по оси ондулятора.

Поставленная цель достигается тем, что в ондуляторе, содержащем цилиндрический каркас с размещенными вдоль его оси постоянными магнитами, каждый постоянный магнит повернут относительно предыдущего на угол  $\varphi$ , определяемый соотношением

$$\varphi = \pi \left( \frac{m-1}{m} \right),$$

при этом длина магнитов  $L$  выбирается из соотношений

$$\frac{L_{2k}}{L_{2k-1}} = \cos \frac{\pi}{m}; \quad L_{2k-1} = L_{2k+1}; \quad L_{2k} = L_{2k+2},$$

где  $m$  - порядок симметрии кривой закона циркуляции вектора скорости частицы в ондуляторе,  $k = 1, 2, 3 \dots$  порядковый номер магнита.

На фиг. 1 приведена схема ондулятора.

Ондулятор содержит цилиндрический каркас 1, постоянные магниты 2; на фиг. 2 - заданный закон циркуляции вектора скорости частицы с  $m = 4$ ; на фиг. 3 - проекция циркуляции вектора скорости частицы в ондуляторе-прототипе на плоскость, перпендикулярную оси ондулятора, на фиг. 4 - то же, но для предлагаемого ондулятора, степень циркулярной поляризации - 3; 4 - интенсивность излучения, 5 - жесткость излучения.

Поляризационные характеристики можно представить в виде параметров Стокса

$$\frac{dE_k}{d\Omega} = \frac{cR_0^2 k}{\omega_k} |\vec{E}_k|^2 \quad \xi_1 = 0 \quad \xi_3 = \sqrt{1 - \xi_2^2}, \quad (1)$$

$$\xi_2 = 2 \frac{\operatorname{Re} E_{xk} \cdot \operatorname{Im} E_{yk} - \operatorname{Re} E_{yk} \cdot \operatorname{Im} E_{xk}}{|\vec{E}_{xk}|^2 + |\vec{E}_{yk}|^2}, \quad (2)$$

где:  $\xi_i$  - параметры Стокса,

$$\vec{E}_k = \frac{ie\omega_k \omega_k}{2\pi c R_0} [\vec{n} [\vec{n} \cdot \vec{v}_k]] - \text{компонент}$$

Фурье напряженности электрического поля волны ОИ,

$$\vec{v}_k = \int_{-T'/2}^{T'/2} \vec{\beta}(t') \exp \left\{ ik\Omega \left[ t' - \frac{\vec{n} \cdot \vec{\delta}_v(t')}{c(1 - \vec{n} \cdot \vec{\beta}(t'))} \right] \right\} dt';$$

$$\omega_k = \frac{\Omega}{1 - \vec{n} \cdot \vec{\beta}}; \quad \omega_k = k\omega_k;$$

$k$  - номер гармоники ОИ;

$\Omega$  - частота колебаний частицы в ондуляторе;

$R_0$  - расстояние от ондулятора до точки наблюдения;

$$T' = \frac{2\hat{n}}{\Omega}; \quad \vec{\beta} = \frac{\vec{v}}{c};$$

$\vec{v}$  - вектор скорости частицы;  
 $\vec{\beta}_0$  - средняя скорость частицы в ондуляторе,

$\vec{\delta}_v(t') = \vec{v}(t') - \vec{v}_0 t'$  - отклонение радиуса вектора частицы от центра ее колебаний в ондуляторе;

$e$  - заряд частицы;

$c$  - скорость света.

Выражение (2) справедливо под углами  $\theta \ll 1$ , когда

$$|\vec{E}_{zk}|^2 \ll |\vec{E}_{xk}|^2 + |\vec{E}_{yk}|^2.$$

Если  $E_{xk}$  и  $E_{yk}$  представить в виде

$$E_{xk} = i \operatorname{Re} E_{yk} - \operatorname{Im} E_{yk}$$

$$E_{yk} = \operatorname{Re} E_{yk} + i \operatorname{Im} E_{yk}$$

и подставить в (2), получим

$$\xi_2 = - \frac{(\operatorname{Im} E_{yk})^2 + (\operatorname{Re} E_{yk})^2}{|\vec{E}_{yk}|^2} = - \frac{|\vec{E}_{yk}|^2}{|\vec{E}_{yk}|^2} = -1,$$

отсюда  $|\xi_2| = 1$ , это означает, что степень циркулярной поляризации близка к 100% на  $k$ -й гармонике в том случае, когда  $E_{xk} = iE_{yk}$ . Списанный случай может иметь место в каком-то одном или нескольких направлениях  $\vec{n}$ . В других направлениях  $|\xi_2| < 1$ .

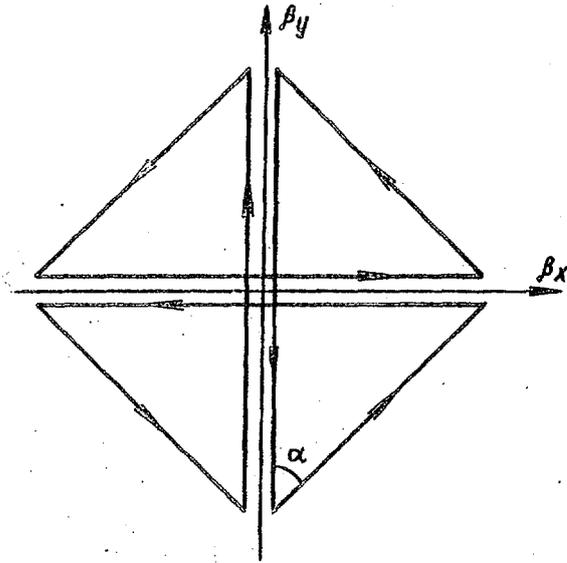
Исследуем циркулярно поляризованное ОИ, испускаемое в направлении  $\vec{n} \parallel \vec{k}$ , где  $\vec{k}$  - орт вдоль оси  $Z$  ондулятора. Чтобы в направлении  $\vec{n}$  эффективно испускалось циркулярно поляризованное ОИ на высших гармониках необходимо, чтобы вектор  $\vec{\beta}(t')$  периодически проходил через это направление, а его компоненты  $\beta_x, \beta_y$  списывали кривую, обладающую симметрией порядка  $m \geq 3$ , а компонента  $\beta_z$  являлась периодической функцией с периодом  $mT'$ .

В ондуляторе (фиг. 1) направление магнитного поля от магнита к магниту меняется вдоль оси на  $135^\circ$  в соответствии с заданным законом циркуляции вектора скорости частицы (фиг. 2). В соответствии с этим законом длина магнитов с четными и нечетными номерами отличается в  $\sqrt{2}$  раз.

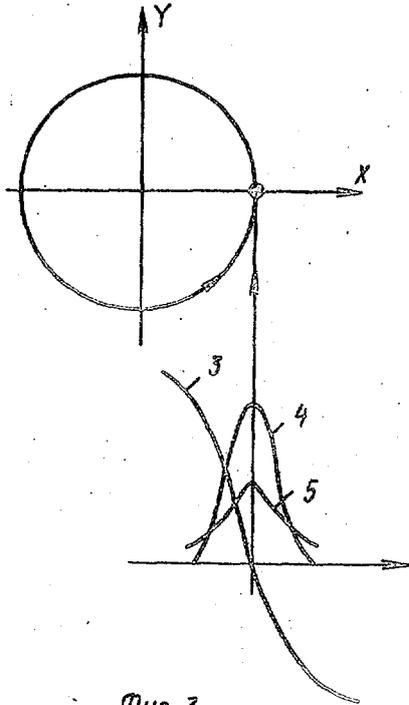
В прототипе (фиг. 3) изображающая точка частицы движется по окружности на  $k$ -й гармонике. Излучение направлено под углом к геометрической оси ондулятора и в максимуме интенсивности излучения 4 и жесткости излучения 5  $k$ -й гармоники степень циркулярной поляризации 3 равна нулю.

В предлагаемом ондуляторе (фиг. 4) изображающая точка частицы на гармониках высших порядков движется по диагоналям и сторонам квадрата, изменяя каждый раз в его углах направление движения на  $135^\circ$ . В этом случае излучение на  $k$ -й гармонике направлено по оси ондулятора и в максимуме интенсивности излучения 4 и жесткости излучения 5 степень циркулярной поляризации 3 равна 100%.

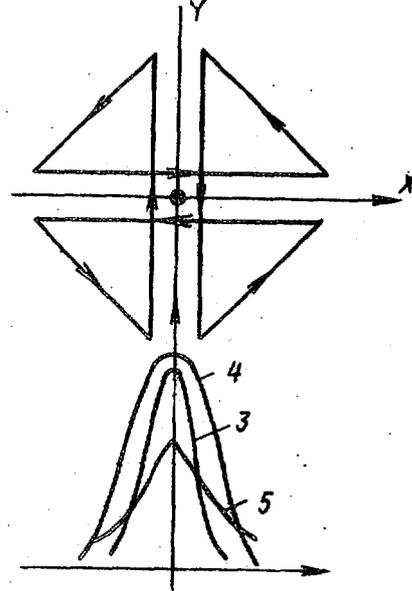
Предлагаемый ондулятор может быть эффективно использован как источник жесткого циркулярно поляризованного излучения для облучения объектов.



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

Редактор Е. Кривина

Составитель С. Шитов  
Техред А.Ач

Корректор А.Ференц

Заказ 10364/60

Тираж 845

Подписное

ВНИИПИ Государственного комитета СССР  
по делам изобретений и открытий  
113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., д. 4/5

Филиал ИПИ "Патент", г. Ужгород, ул. Проектная, 4