УДК 535.41 DOI: 10.17277/vestnik.2018.03.pp.512-522

## СЛОЖЕНИЕ И ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ДВУХ КОГЕРЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С ЛИНЕЙНОЙ И ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЯМИ

## О. В. Ломакина<sup>1</sup>, Н. Я. Молотков<sup>2</sup>, А. Б. Гриднев<sup>1</sup>

Кафедры: «Техническая механика и детали машин» (1); «Физика» (2), ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; lomakinaolga@mail.ru

**Ключевые слова:** интерференция; когерентность; поляризация волн; сложение; электромагнитные волны.

Аннотация: Рассмотрено взаимодействие двух когерентных волн, одна из которых обладает линейной, а другая – эллиптической или круговой поляризацией. Дана теория сложения двух когерентных волн с различным характером поляризации, а также теория их интерференции при наличии анализатора. Полученные выводы подтверждены экспериментом в диапазоне СВЧ. Представлены интерференционные картины при различных условиях и полярные диаграммы результирующих волн в различных точках волнового интерференционного поля.

В научной и учебной литературе по волновой оптике [1 - 3] проблема сложения и интерференции двух когерентных электромагнитных волн с линейной и эллиптической поляризациями не рассматривается, хотя представляет не только чисто методический, но и научный интерес, тем более, что теоретические выводы могут быть подтверждены экспериментально в сантиметровом диапазоне волн ( $\lambda = 3,2$  см).

Под сложением двух когерентных волн с различным характером поляризации будем понимать исключение из канонических уравнений волн времени и нахождение траектории движения конца электрического вектора в плоскости, перпендикулярной направлению движения волн. По виду этой траектории можно судить о поляризации результирующей волны. Под интерференцией волн с различным характером поляризации (линейной и эллиптической) будем понимать наложение параллельных составляющих волн, проходящих через анализатор, установленный на их пути. Результат интерференции определяется зависимостью результирующей интенсивности волны, проходящей через анализатор, от разности фаз двух когерентных волн, приходящих в точку наблюдения. Зависимость интенсивности результирующей волны, выходящей из анализатора, от угла его поворота определяет так называемую полярную диаграмму волны, полученной от сложения волн с различным характером поляризации: линейной и эллиптической. Полярная диаграмма также определяет поляризацию результирующей волны.

В целях конкретизации теории рассмотрим экспериментальную установку для исследования интерференции в диапазоне СВЧ, выполненную по схеме Т. Юнга (рис. 1). Между источником радиоволн *1* и приемной антенной *2* установлен металлический экран *3* с двумя щелями шириной 40 мм каждая. Для получения волны с эллиптической или круговой поляризацией одна из щелей пере-

крывается анизотропной металлоленточной «пластинкой  $\frac{\lambda}{4}$ » [4]. Главная ось *P* 



Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования интерференции волн в диапазоне СВЧ

анизотропной пластинки располагается параллельно горизонтальной оси *x*. Источник и приемник радиоволн рассматриваются как поляризатор и анализатор соответствующего оптического прибора, и они могут вращаться вокруг своих продольных осей. Для сканирования волнового интерференционного поля приемник может дополнительно перемещаться по окружности с центром на щелях. Положение приемника в пространстве определяется углом θ.

#### Теория сложения когерентных волн с линейной и эллиптической поляризациями

Пусть электрический вектор  $\overline{E}$  волны, па́дающей на щели, составляет с осью *x* произвольный угол  $\alpha$  (рис. 2), где  $O\Pi$  – линия поляризатора. Волна, проходящая открытую щель, остается линейно поляризованной с прежней ориентацией вектора  $\overline{E}$ . Линейно поляризованная волна, па́дающая на щель, перекрытую анизотропной «пластинкой  $\frac{\lambda}{4}$ », распадается в ней на две волны: обыкновенную  $\overline{E}_O$ и необыкновенную  $\overline{E}_e$  с ортогональными линиями поляризации. При этом амплитуды этих взаимно перпендикулярных компонент определяются выражениями:

$$E_O = E \sin \alpha; \ E_e = E \cos \alpha.$$
 (1)

Так как при выходе из «пластинки  $\frac{\lambda}{4}$ » обыкновенная и необыкновенная вол-

ны имеют разность фаз  $\frac{\pi}{2}$ , то результирующая волна при произвольном  $\alpha$  имеет

эллиптическую, а при  $\alpha = 45^{\circ}$  – круговую поляризации.

Пусть от открытой щели в произвольную точку расположения приемной антенны приходит волна, описываемая уравнением

$$\xi = E\cos\omega t. \tag{2}$$

Разложим вектор  $\overline{E}$  линейно поляризованной волны в точке наблюдения на две составляющие по осям x и y, амплитуды которых могут быть записаны в виде:

$$E_{mx} = E \cos \alpha; \qquad E_{my} = E \sin \alpha.$$
 (3)

Канонические уравнения для линейно поляризованной волны в точке наблюдения могут быть записаны в виде:

$$\xi_x = E_{mx} \cos \omega t = E \cos \alpha \cos \omega t; \quad \xi_y = E_{my} \cos \omega t = E \sin \alpha \cos \omega t.$$
(4)



От щели, перекрытой «пластинкой  $\frac{\lambda}{4}$ », в точку наблюдения приходит волна с эллиптической поляризацией, каноническое уравнение которой может быть записано в виде:

взаимодействующих волн

$$\xi_e = E_e \cos(\omega t + \varphi); \quad \xi_O = E_O \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right), \tag{5}$$

где  $\varphi$  – разность фаз между волнами, приходящими от различных щелей в точку наблюдения, которая определяется их геометрической разностью хода  $\Delta = d \sin \theta$ , где d – расстояние между центрами щелей  $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$ . Для определения характера поляризации результирующей волны в точке наблюдения осуществим сложение четырех уравнений (4) – (5), построив векторную диаграмму (рис. 3), где учтено, что, согласно формулам (1) и (3),  $E_{mx} = E_e$ ;  $E_{my} = E_O$ . Сложив векторы  $\overline{E}_{mx}$  и  $\overline{E}_e$ , найдем результирующую амплитуду волны, электрический вектор которой совершает колебания по оси *x*:

$$E_x^2 = E_{mx}^2 + E_e^2 + 2E_{mx}E_e \cos\varphi \text{ или } E_x^2 = 2E_{mx}^2(1+\cos\varphi).$$
(6)

Начальная фаза  $\delta_x$  приведенной результирующей волны по оси *x* определяется из векторной диаграммы

$$tg\delta_x = \frac{E_{mx}\sin\phi}{E_{mx} + E_{mx}\cos\phi} = \frac{\sin\phi}{1 + \cos\phi}.$$
(7)

Аналогично, сложив векторы  $\overline{E}_{my}$  и  $\overline{E}_O$ , найдем амплитуду  $E_y$  и фазу  $\delta_y$  результирующей приведенной волны по оси *y*:

$$E_y^2 = 2E_{my}^2 \left[ 1 + \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \right]; \tag{8}$$

$$tg\delta_{y} = \frac{E_{my}\sin\left[180^{\circ} - \left(\phi + \frac{\pi}{2}\right)\right]}{E_{my} - E_{my}\cos\left[180^{\circ} - \left(\phi + \frac{\pi}{2}\right)\right]} = \frac{\cos\phi}{1 - \sin\phi}.$$
(9)

Следовательно, уравнения приведенных результирующих колебаний поляризованной волны по осям *x* и *y* в точке наблюдения имеют вид:

$$\xi_{\Pi x} = E_x \cos(\omega t + \delta_x); \quad \xi_{\Pi y} = E_y \cos(\omega t + \delta_y).$$
(10)

Исключив из этих уравнений время *t*, получим неканоническое уравнение эллипса, которое в краткой форме имеет вид

$$\frac{\xi_{\pi x}^2}{E_x^2} - 2\frac{\xi_{\pi x}\xi_{\pi y}}{E_x E_y}\cos\delta + \frac{\xi_{\pi y}^2}{E_y^2} = \sin^2\delta,$$
(11)

где  $\delta = \delta_y - \delta_x$  есть разность фаз между результирующими колебаниями по осям *x* и *y*. Таким образом, в результате сложения двух когерентных волн с различным характером поляризации образуется результирующая волна, обладающая эллиптической поляризацией.

## Сложение линейно поляризованной волны и волны с круговой поляризацией

Положим, согласно изложенной теории,  $\alpha = 45^{\circ}$ .

1. При разности фаз взаимодействующих волн  $\varphi = 0$  на основании формул (3), (6), (8) найдем амплитуды результирующих волн по осям *x* и *y*:  $E_x = \sqrt{2}E$ ,  $E_y = E$ , а также с учетом формул (7), (9) разность фаз между ними  $\delta = \delta_x - \delta_y = 45^\circ$ . Подставляя полученные результаты в формулу (11), найдем неканоническое уравнение эллипса

$$\xi_{\Pi x}^2 - 2\xi_{\Pi x}\xi_{\Pi y} + 2\xi_{\Pi y}^2 = E^2.$$
(12)

Следовательно, в результате сложения волн с линейной и круговой поляризациями в центре волнового поля образуется результирующая волна с эллиптической поляризацией (рис. 4, *a*).



Рис. 4. Характер поляризации результирующих волн: a – эллиптическая при  $\varphi = 0$ ;  $\delta$  – линейная (электрический вектор совпадает с осью x); s – линейная (электрический вектор совпадает с осью y); z – эллиптическая при  $\varphi = \frac{3}{2}\pi$ 

ISSN 0136-5835. Вестник ТГТУ. 2018. Том 24. № 3. Transactions TSTU

2. При разности фаз  $\varphi = 90^{\circ}$  аналогично найдем  $E_x = E$ ;  $E_y = 0$ . Следовательно, в данной точке волнового фронта результирующая волна обладает линейной поляризацией, причем направления колебаний электрического вектора  $\overline{E}$  совпадают с осью *x* (рис. 4,  $\delta$ ).

3. При разности фаз  $\varphi = 180^{\circ}$  найдем  $E_x = 0$ ;  $E_y = E$ , и результирующая волна обладает линейной поляризацией (рис. 4, e).

4. При разности фаз  $\varphi = 270^{\circ}$  найдем  $E_x = E$ ;  $E_y = \sqrt{2}E$ ;  $\delta = 135^{\circ}$  и, следовательно, результирующая волна обладает эллиптической поляризацией (рис. 4, *г*):

$$2\xi_{\Pi x}^2 - 2\xi_{\Pi x}\xi_{\Pi y} + \xi_{\Pi y}^2 = E^2.$$
 (13)

Расчеты показывают, что при других разностях фаз взаимодействующих волн их сложение приводит к результирующей волне с эллиптической поляризацией. Результирующая волна с круговой поляризацией получиться не может.

## Теория интерференции двух когерентных волн с различным характером поляризации

Для наблюдения интерференции рассматриваемых волн необходимо на их пути установить анализатор, главная линия ОА которого составляет с главной осью «пластинки  $\frac{\lambda}{4}$ », то есть осью *x*, произвольный угол  $\beta$  (см. рис. 2). В этом случае анализатор пропускает три параллельные компоненты: E';  $E'_O$ ;  $E'_e$ , которые являются составляющими векторов  $\overline{E}$ ,  $\overline{E}_O$ ,  $\overline{E}_e$  волн, выходящих из щелей. Сложение этих однонаправленных колебаний обеспечивает интерференцию волн с различным характером поляризации. Амплитуды трех интерферирующих компонент могут быть найдены из пространственной диаграммы (см. рис. 2):

$$E' = E\cos(\alpha - \beta); \quad E'_e = E_e \cos\beta; \quad E'_O = E_O \sin\beta.$$

При учете формул (1) получим:

$$E' = E \cos(\alpha - \beta);$$
  

$$E'_{e} = E \cos\alpha \cos\beta;$$
  

$$E'_{O} = E \sin\alpha \sin\beta.$$
  
(14)

Учитывая фазовые соотношения интерферирующих волн в точке наблюдения, уравнения колебаний трех интерферирующих компонент могут быть записаны в виде:

$$\xi' = E' \cos \omega t = E \cos(\alpha - \beta) \cos \omega t;$$
  

$$\xi'_{e} = E'_{e} \cos(\omega t + \varphi) = E \cos \alpha \cos \beta \cos(\omega t + \varphi);$$
  

$$\xi'_{O} = E'_{O} \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) = E \sin \alpha \sin \beta \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right).$$
(15)

Для нахождения амплитуды  $E_p$  результирующей волны при интерференции трех указанных компонент на основании выражений (15) построим векторную диаграмму (рис. 5). Произведем сложение векторов  $\overline{E}_O$  и  $\overline{E'}_e$ , то есть



Рис. 5. Векторная диаграмма интерференции волн

 $\overline{E}'_{O} + \overline{E}'_{e} = \overline{E}''$ . При этом модуль вектора  $\overline{E}''$  равен  $E'' = \sqrt{{E'_{O}}^{2} + {E'_{e}}^{2}}$ . При учете формул (14) найдем амплитуду данной приведенной волны

$$E'' = E\sqrt{\cos^2\alpha\cos^2\beta + \sin^2\alpha\sin^2\beta}.$$
 (16)

Из векторной диаграммы найдем также фазовый угол ү

$$tg\gamma = \frac{E'_O}{E'_e} = \frac{E\sin\alpha\sin\beta}{E\cos\alpha\cos\beta} = tg\alpha tg\beta.$$
 (17)

Сложением векторов  $\overline{E}'$  и  $\overline{E}''$  найдем амплитуду  $E_{\rm p}$ , а следовательно, и интенсивность I результирующей волны при интерференции волн с различным характером поляризации

$$I = E_{\rm p}^2 = E'^2 + E''^2 + 2E'E''\cos(\varphi + \gamma)$$
(18)

или

$$I = E_{\rm p}^2 = (E' + E'')^2 - 4E'E''\sin^2\frac{\varphi + \gamma}{2}.$$
 (19)

Подставляя значения двух амплитуд  $\overline{E}'$  и  $\overline{E}''$  приведенных интерферирующих волн, согласно формулам (14) и (16), окончательно найдем

$$I = E^{2} \left\{ \left[ \cos(\alpha - \beta) + \sqrt{\cos^{2} \alpha \cos^{2} \beta + \sin^{2} \alpha \sin^{2} \beta} \right]^{2} - 4\cos(\alpha - \beta)\sqrt{\cos^{2} \alpha \cos^{2} \beta + \sin^{2} \alpha \sin^{2} \beta} \sin^{2} \frac{\phi + \gamma}{2} \right\}.$$
 (20)

С одной стороны, данную формулу (20) следует рассматривать как результат интерференции двух когерентных волн, одна из которых линейно поляризована, а вторая – обладает эллиптической поляризацией. При этом положение интерференционных максимумов и минимумов зависит не только от разности фаз  $\varphi$  волн, но и углов  $\alpha$  и  $\beta$ , то есть ориентации главных осей поляризатора и анализатора в пространстве. С другой стороны, формула (20) определяет зависимость интенсивности волны *I*, проходящей через анализатор от поворота угла  $\beta$  в данной точке наблюдения, характеризуемой постоянной разностью фаз интерферирующих волн ( $\varphi = \text{const}$ ). Данная функциональная зависимость  $I = I(\beta)$ , выраженная в полярных координатах, графически определяет так называемую *полярную диаграмму* результирующей волны, по которой можно судить о характере ее поляризации.

517

## Исследование явления интерференции двух волн, одна из которых линейно поляризована, а вторая имеет круговую поляризацию

Для этого случая достаточно в полученных формулах перейти к  $\alpha = 45^{\circ}$ . Из формулы (17) найдем  $\gamma = \beta$ . Тогда формула (20) примет вид

$$I = I_O \left\{ \left[ \cos(45^\circ - \beta) + \frac{1}{\sqrt{2}} \right]^2 - \frac{4}{\sqrt{2}} \cos(45^\circ - \beta) \sin^2 \frac{\phi + \beta}{2} \right\},\$$

где  $I_O = E^2$  – интенсивность одной из волн, па́дающих на щели. Учитывая, что  $\cos(45^\circ - \beta) = \frac{1}{\sqrt{2}}(\cos\beta + \sin\beta)$ , получим

$$I = I_O \left[ \frac{1}{2} (\cos\beta + \sin\beta + 1)^2 - 2(\cos\beta + \sin\beta) \sin^2 \frac{\varphi + \beta}{2} \right].$$
(21)

Рассмотрим частные случаи интерференции.

1. Пусть главная линия анализатора составляет с горизонтальной осью *x* угол β = 0. Интерференционная картина, согласно формуле (21), описывается

$$I = 2I_O \cos^2 \frac{\varphi}{2}.$$
 (22)

При  $\varphi = 0$  в центре волнового фронта должен наблюдаться максимум интерференции с интенсивностью, равной  $2I_0$ . На рисунке 6 (кривая *I*) приведена экспериментальная интерференционная картина при  $\beta = 0$ , то есть зависимость интенсивности принимаемой волны, измеряемой микроамперметром Ф195, от угла поворота  $\theta$  приемной антенны вокруг щелей. То, что боковые максимумы интерференции меньше центрального максимума, объясняется наличием дифракции Фраунгофера на щелях.

2. При  $\beta = 90^{\circ}$  интерференционная картина описывается уравнением

$$I = 2I_0 \cos^2 \frac{\phi + 90^\circ}{2}.$$
 (23)

Соответствующая экспериментальная интерференционная картина показана на рис. 6 (кривая 2). Очевидно, что при повороте анализатора на угол 90° интерференционная картина сдвигается по фазе на  $\frac{\pi}{2}$ , то есть интерференционные картины не становятся дополнительными.



Рис. 6. Экспериментальные интерференционные картины при различных ориентациях анализатора:

 $l - \beta = 0; \ 2 - \beta = 90^{\circ}$ 



Рис. 7. Интерференционная картина и ее отсутствие:  $1 - \beta = 45^{\circ}; 2 - \beta = 135^{\circ}$ 

3. При  $\beta = 45^{\circ}$  интерференционная картина описывается уравнением

$$I = I_0 \left( \frac{3}{2} + \sqrt{2} - 2\sqrt{2} \cdot \sin^2 \frac{\varphi + 45^\circ}{2} \right).$$
(24)

Соответствующая экспериментальная интерференционная картина приведена на рис. 7 (кривая *1*). Главный максимум смещен незначительно от центра волнового поля.

4. При  $\beta = 135^{\circ}$  интерференционная картина отсутствует, то есть интенсивность принимаемой волны во всех точках пространства сохраняется постоянной

$$I = \frac{1}{2}I_0.$$
 (25)

519

Объясняется это тем, что при  $\beta = 135^{\circ}$  главная линия анализатора оказывается перпендикулярной электрическому вектору *E* линейно поляризованной волны, выходящей из открытой щели. Анализатор пропускает только волну с круговой поляризацией. На рисунке 7 (кривая 2) показано экспериментальное распределение интенсивности по волновому фронту при указанных условиях. По сути дела наблюдается главный максимум дифракции Фраунгофера на щели, перекрытой

«пластинкой  $\frac{\pi}{4}$ ».

#### Анализ поляризации результирующей волны, полученной от сложения волн с различным характером поляризации

Формулу (21), описывающую интерференцию данных волн, можно рассматривать как зависимость интенсивности I волны, проходящей через анализатор, от угла  $\beta$  его поворота в данной точке наблюдения, которая характеризуется постоянной разностью фаз  $\varphi = \text{const}$ . Данная математическая зависимость  $I = I(\beta)$ , выраженная графически в полярных координатах, называется *полярной диаграммой результирующей волны* в точке наблюдения, по которой можно судить о характере поляризации. По формуле (21) рассчитаем теоретические полярные диаграммы в различных точках волнового фронта (рис. 8).

1. В центре волнового фронта при  $\varphi = 0$  полярная диаграмма согласно расчету по формуле (21) имеет вид, изображенный на рис. 8, *а*. Следовательно, результирующая волна обладает эллиптической поляризацией. Это подтверждается экспериментально в диапазоне СВЧ вращением приемной рупорной антенны вокруг своей продольной оси, когда она расположена в центре волнового фронта при  $\theta = 0$ .



Рис. 8. Полярные диаграммы результирующих волн при различных разностях фаз  $\phi$ ,  $\stackrel{\circ}{:} a - 0; \delta - 90; e - 180; c - 270$ 

2. При разности фаз  $\phi = 90^{\circ}$  согласно теории результирующая волна обладает линейной поляризацией (см. рис. 8,  $\delta$ ), что также подтверждается опытным путем при  $\theta = 6^{\circ}$ . Линия поляризации совпадает с осью *х*. При небольшом увеличении разности фаз результирующая волна становится эллиптически поляризованной.

3. При разности фаз  $\varphi = 180^{\circ}$  результирующая волна снова становится линейно поляризованной (см. рис. 8, *в*). Линия поляризации волны этой волны совпадает с осью *у*. Она наблюдается, когда приемная антенна находится под углом

 $\theta = 12^{\circ}$ .

4. При разности фаз  $\varphi = 270^{\circ}$  результирующая волна снова становится эллиптически поляризованной (см. рис. 8, *г*). Положение приемной антенны при этом определяется углом  $\theta = 18^{\circ}$ .

Полученные полярные диаграммы (см. рис. 8) целесообразно сравнить с результатами сложения волн линейно поляризованной и с круговой поляризацией (см. рис. 4). По полярным диаграммам определим отношение полуосей соответствующих эллипсов

$$\frac{a}{s} = \sqrt{\frac{I_{\max}}{I_{\min}}}$$

и сравнить полученные результаты с полуосями теоретических эллипсов.

#### Заключение

1. Рассмотрена теория сложения двух когерентных волн, обладающих линейной и эллиптической поляризациями. В частном случае показано, что сложение волн линейно поляризованной и с круговой поляризацией приводит к образованию эллиптически поляризованной волны, которая при определенной разности фаз может вырождаться в волну с линейной поляризацией.

2. Приводится теория интерференции двух волн с линейной и эллиптической поляризациями при наличии анализатора, установленного на их пути. Рассчитаны теоретические интерференционные картины при взаимодействии волн с линейной и круговой поляризациями, которые подтверждаются экспериментально в диапазоне СВЧ.

3. Рассчитаны полярные диаграммы результирующих волн, которые образуются при сложении волн с линейной и круговой поляризациями. Теоретические полярные диаграммы также согласуются с экспериментом в диапазоне СВЧ. Проведено некоторое соответствие между сложением и результатами интерференции волн с различным характером поляризации.

#### Список литературы

1. Френель, О. Избранные труды по оптике / О. Френель. – М. : Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1955. – 604 с.

2. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М. : Наука, 1970. – 856 с.

3. Сивухин, Д. В. Общий курс физики: в 5 т. Т. 4. Оптика / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1980. – 752 с.

4. Молотков, Н. Я. Учебные эксперименты по волновой оптике. СВЧ демонстрации / Н. Я. Молотков. – Долгопрудный : Интеллект, 2011. – 347 с.

5. Молотков, Н. Я. Колебательные процессы. Учебные эксперименты : учебное пособие / Н. Я. Молотков. – Долгопрудный : Интеллект, 2013. – 286 с.

6. Молотков, Н. Я. Волновые электромагнитные процессы. Оптика и СВЧ / Н. Я. Молотков, О. И. Гайнутдинов. – Saarbrucken, Deutschland : Palmarium Academik Publishing, 2014. – 538 с.

### Addition and Interference of Two Coherent Electromagnetic Waves with Linear and Elliptical Polarizations

O. V. Lomakina<sup>1</sup>, N. Ya. Molotkov<sup>2</sup>, A. B. Gridnev<sup>1</sup>

Departments of Technical Mechanics and Machine Parts (1); Physics (2), TSTU, Tambov, Russia; lomakinaolga@mail.ru

**Keywords:** interference; coherence; wave polarization; addition; electromagnetic waves.

**Abstract:** The paper considers the interaction of two coherent waves, one of which has linear, and the other has elliptical or circular polarization. The theory of the addition of two coherent waves with different polarization patterns, as well as the theory of their interference in the presence of an analyzer isdescribed. The findings are confirmed by an experiment in the microwave range. Interference patterns under different conditions and polar diagrams of the resulting waves at various points of the wave interference field are presented.

521

### References

1. Frenel', O. *Izbrannyye trudy po optike* [Selected Works on Optics], Moscow: Gosudarstvennoye izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1955, 604 p. (In Russ.)

2. Born M., Vol'f E. *Osnovy optiki* [Foundations of Optics], Moscow: Nauka, 1970, 856 p. (In Russ.)

3. Sivukhin D.V. *Obshchiy kurs fiziki. Tom 4. Optika* [General Course of Physics. Volume 4. Optics], Moscow: Nauka, 1980. – 752 p. (In Russ.)

4. Molotkov N.Ya. Uchebnyye eksperimenty po volnovoy optike. SVCH demonstratsii [Educational Experiments on Wave Optics. Microwave Demonstration], Dolgo-prudnyy: Intellekt, 2011, 347 p. (In Russ.)

5. Molotkov N. Ya. *Kolebatel'nyye protsessy. Uchebnyye eksperimenty* [Oscillatory Processes. Educational Experiments], Dolgoprudnyy: Intellekt, 2013, 286 p. (In Russ.)

6. Molotkov N.Ya., Gaynutdinov O.I. *Volnovyye elektromagnitnyye protsessy. Optika i SVCH* [Wave Electromagnetic Processes. Optics and Microwave], Saarbrucken, Deutschland: Palmarium Academik Publishing, 2014, 538 p.

### Addition und Interferenz von zwei kohärenten elektromagnetischen Wellen mit linearer und elliptischer Polarisation

**Zusammenfassung:** Es ist die Wechselwirkung von zwei kohärenten Wellen betrachtet, von denen eine lineare und die andere elliptische oder zirkulare Polarisation aufweist. Die Theorie der Addition zweier kohärenter Wellen mit unterschiedlichen Polarisationsmustern wird ebenso wie die Theorie ihrer Interferenz beim Vorhandensein eines Analysators gegeben. Die Ergebnisse sind durch ein Experiment im Mikrowellenbereich bestätigt. Es sind Interferenzmuster unter verschiedenen Bedingungen und Polardiagramme der resultierenden Wellen an verschiedenen Punkten des Welleninterferenzfeldes dargestellt.

# Addition et interférence de deux ondes électromagnétiques cohérentes avec une polarisation linéaire et elliptique

**Résumé:** Est examinée l'interaction de deux ondes cohérentes, l'une ayant une polarisation linéaire et l'autre une polarisation elliptique ou circulaire. Est donnée la théorie de l'addition de deux ondes cohérentes avec une nature différente de la stratification, ainsi que la théorie de leur interférence en présence d'un analyseur. Les conclusions semi-précises sont confirmées par l'expérience dans la gamme des micro-ondes. Des tableaux d'interférence sont présentés dans de différentes conditions ainsi que des diagrammes polaires des ondes résultantes de différents points du champ d'interférence de la vague.

Авторы: Ломакина Ольга Владимировна – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин»; Молотков Николай Яковлевич – доктор педагогических наук, профессор кафедры «Физика»; Гриднев Александр Борисович – магистрант кафедры «Техническая механика и детали машин», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: Дмитриев Олег Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.