

Поляризационные свойства лазерного резонатора с уголковым отражателем

Е.Н. Абариана^{1,2}, А.И. Тиханков^{2,3}

¹Московский технологический университет (МИРЭА)

² АО «НИИ “Полус” им. М. Ф. Стельмаха»

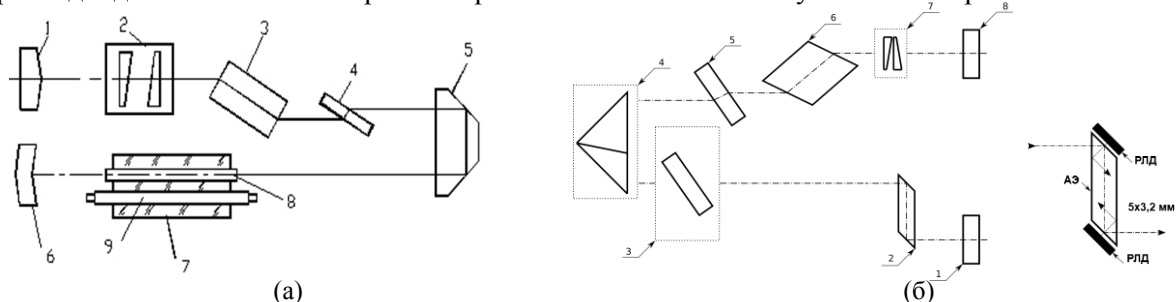
³Московский физико-технический институт (государственный университет)

В лазерной технике известен класс приборов, которые называются лазерные целеуказатели-дальномеры – ЛЦД, предназначенные для разведки целей, измерения их координат и лазерного подсвета (целеуказания) для наведения управляемых артиллерийских или авиационных боеприпасов (рис. 1). ЛЦД включает в свой состав лазерный передатчик, основой которого является твердотельный лазерный излучатель с активным элементом из алюмоиттриевого граната с неодимом. Во всех отечественных разработках ЛЦД конструкция оптического резонатора твердотельного излучателя выполнена, помимо зеркал и электрооптического затвора с поляризатором, с применением уголкового отражателя отражателя (другое название – трипель-призма).



Рис. 1 – Расчет с лазерным целеуказателем-дальномером ЛЦД-4.

На рис.2 показаны схемы лазерных излучателей. Под буквой а) представлен излучатель с ламповой накачкой активного элемента. Видно, что конструкция резонатора излучателя выполнена по П-образной схеме, в которой оба зеркала резонатора (с коэффициентами отражения R_1, R_2) расположены на одной базе (например, на силовом переднем фланце корпуса излучателя), а уголковый отражатель замыкает резонатор, при этом в силу нечувствительности УО к угловым перемещениям, требования к его позиционированию в условиях внешних температурных воздействий существенно менее жесткие (1°), чем требования к позиционированию зеркал резонатора (угловые секунды). Под буквой б) показана вторая схема лазерного излучателя, в которой используется полупроводниковая продольная накачка активного элемента двумя решетками лазерных диодов. И в этой схеме резонатор включает в свой состав уголковый отражатель.



1 – 100 % зеркало резонатора; 2 – узел оптических клиньев; 3 – электрооптический элемент; 4 – поляризационная пластина; 5 – уголковый отражатель; 6 – выходное зеркало резонатора; 7 – кварцевый моноблок с отражающим серебряным покрытием; 8 – активный элемент из АИГ:Nd³⁺; 9 – лампа накачки

1 – выходное зеркало; 2 – активный элемент; 3 – пластина; 4 – уголковый отражатель; 5 – поляризатор; 6 – электрооптический элемент (LiNbO₃); 7 – узел оптических клиньев; 8 – “глухое” зеркало; 9 – РЛД

Рис. 2 – а) схема лазерного излучателя с ламповой накачкой;

б) схема лазерного излучателя с продольной накачкой активного элемента двумя решетками лазерных диодов.

Такие конструкции позволяют повысить устойчивость резонатора к внешним воздействиям, кроме этого обеспечивается эффективное увеличение длины резонатора в два раза без увеличения линейных габаритов конструкции излучателя пропорционально $1/(L)1/2$, где L – длина резонатора, что позволяет снизить расходимость выходного излучения.

Наличие в резонаторе излучателя ЛЦД, работающего в режиме модуляции добротности, уголкового отражателя уголкового отражателя и поляризатора Π из состава электрооптического затвора вызывает вопрос у разработчика: какова должна быть оптимальная взаимная ориентация УО и оси пропускания поляризатора Π ?

Из работы американского автора, который рассматривал резонатор, образованный только УО и плоским зеркалом, была получена информация о поляризационных свойствах этого резонатора. Было показано, что собственным вектором такого резонатора является линейная поляризация, составляющая угол 16° или 106° относительно оси x , откуда следовало, что под указанным углом и должна быть установлена ось пропускания поляризатора. **Задачей** настоящей работы являлось рассмотрение резонатора, с целью получения аналитического выражения, описывающего потери по интенсивности электрического поля в резонаторе, обусловленные взаимным положением УО и поляризатора.

Для достижения поставленной цели использовался метод матриц и векторов Джонса. Рассмотрим реальный лазерный резонатор (рис. 3), включающий два зеркала, уголкового отражателя, активный элемент длиной l и поляризационный затвор, включающий поляризатор и электрооптический элемент.

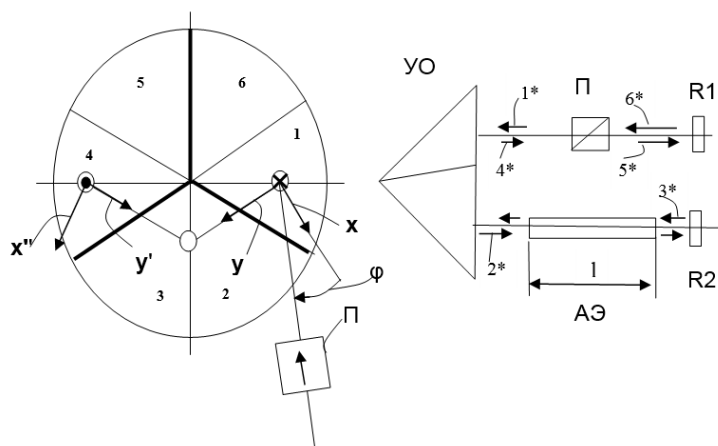


Рис. 3. Выбор осей координат для двух центрально-симметричных секторов входной грани УО (проекция действительных ребер показаны жирными линиями, проекции мнимых ребер – тонкими линиями) и рассматриваемый лазерный резонатор (УО – уголкового отражателя; R1, R2 – коэффициенты отражения зеркал; l – длина активного элемента АЭ; Π – поляризационный затвор)

На рис. 3 (слева), показан вид со стороны входной грани УО. Жирными линиями показаны проекции действительных ребер, тонкими – проекции мнимых ребер. $x(x')$, $y(y')$ – единичный вектор, перпендикулярный и параллельны плоскости падения, соответственно, оба вектора перпендикулярны направлению распространения g . φ – это угол оси пропускания поляризатора относительно оси x . Угол падения лазерного луча на отражающие грани УО при полном внутреннем отражении определяется выражением (1) и составляет $54,7^\circ$.

$$\theta = \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) = 54,7^\circ \quad (1)$$

Рассмотрим матрицу кругового прохода резонатора, начиная с точки 1^* по маршруту $1^*, 2^*, 3^*, 4^*, 5^*, 6^*, 1^*$. Указанная матрица M имеет вид (2)

$$M = R(-\varphi) \times T_{\Pi} \times R(\varphi) \times T_M \times R(\varphi) \times T_{\Pi} \times R(-\varphi) \times T_{\text{ПВО}} \times R(60) \times T_{\text{ПВО}} \times R(-60) \times T_{\text{ПВО}} \times T_M \times T_{\text{ПВО}} \times R(-60) \times T_{\text{ПВО}} \times R(60) \times T_{\text{ПВО}} \quad (2)$$

После подстановки всех множителей, суммарная матрица всех элементов в резонаторе, действующая на излучение имеет вид (3). Каждая компонента матрицы находится из формул (4).

$$M = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} M_{11} &= c_{11} \cdot \cos^2 \varphi + c_{12} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \\ M_{22} &= c_{12} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi + c_{22} \cdot \sin^2 \varphi \\ M_{12} &= c_{12} \cdot \cos^2 \varphi + c_{22} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \\ M_{21} &= c_{11} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi + c_{12} \cdot \sin^2 \varphi \end{aligned} \quad (4)$$

Рассмотрим теперь изменение интенсивности излучения в схеме резонатора. Для этого нужно найти собственное значение матрицы Джонса через собственный вектор матрицы, представлен формулой (5).

$$\begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \Lambda \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (5)$$

Условие самовозбуждения генератора имеет вид, представленный формулой (6). Величина $\frac{1}{2l} \ln \frac{1}{|\Lambda|^2}$ характеризует потери по интенсивности в резонаторе.

$$\begin{aligned} R_1 \cdot R_2 \cdot e^{2l(g-\beta)} \cdot |\Lambda|^2 &= 1, \\ g &= \beta + \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{R_1 \cdot R_2 \cdot |\Lambda|^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

$|\Lambda|^2$ (7) есть фактически коэффициент пропускания по интенсивности за один круговой проход резонатора, зависящий от разности скачков фаз δ и угла φ , определяющего положение поляризатора. Скачки фазы вычисляются с использованием формул (8).

$$|\Lambda|^2 = (3 \cos \frac{8\delta}{2} - 3 \cos \frac{6\delta}{2} + 1) + \sin^2 2\varphi \cdot 2 \cos \frac{6\delta}{2} (2 \cos \frac{6\delta}{2} - 3 \cos \frac{2\delta}{2} + 1) + \sqrt{3} \sin 4\varphi \cdot \cos \frac{6\delta}{2} (-2 \cos \frac{4\delta}{2} + \cos \frac{2\delta}{2} + 1) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\delta \perp / 2) &= \frac{n \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}}{\cos \theta} \\ \operatorname{tg}(\delta \parallel / 2) &= \frac{\sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}}{n \cos \theta} \end{aligned} \quad (8)$$

Для кварца, из которого изготавливают уголкового отражателя ($n=1,457$), угол падения луча на отражающую грань УО $\theta=54,7^\circ$ откуда $\delta \approx 42^\circ$.

График функции (7) приведен на рис. 4. Функция достигает максимумов при углах $\varphi=16,13^\circ$ и $106,13^\circ$, при этом $|\Lambda|_{\max}^2=1$. При углах $\varphi=16,13 \pm 45^\circ$ функция достигает минимумов, при этом $|\Lambda|_{\min}^2=0,105$.

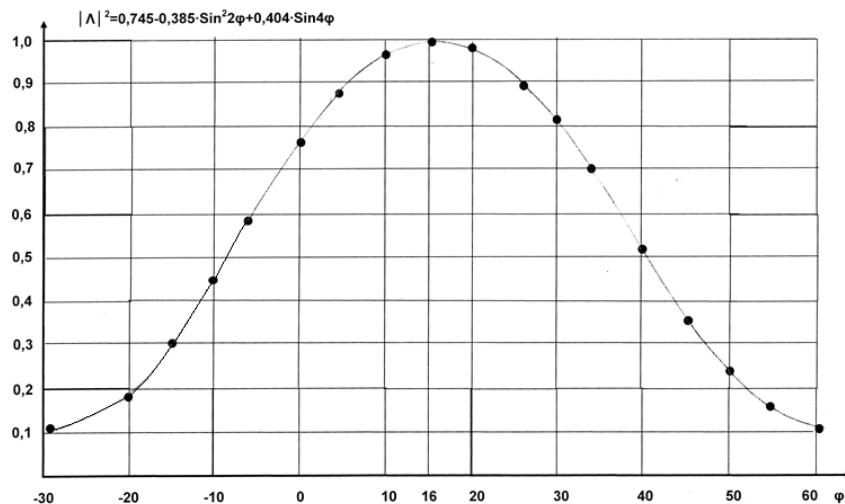


Рис. 4. Зависимость квадрата модуля собственного значения матрицы $|\Lambda|^2$ от угла φ для $\delta=42^\circ$

Так же был найден вид вектора Джонса на входе и выходе из УО. На рис. 4 приведен вид вектора Джонса в секторе 4 для случая, когда вектор Джонса на входе в сектор 1 представляет собой линейную поляризацию А или В, составляющую угол 16° или 106° с осью х или углы 14° , относительно вертикальной или горизонтальной осевых линий. Видно, что это также линейная поляризация А' или В', составляющая угол 16° или 106° с осью х' или углы 14° относительно вертикальной или горизонтальной осевых линий. Фактически это означает, что при проходе через

УО из сектора 1 в сектор 4 линейная поляризация поворачивается на угол 28° . При других углах φ на выходе из сектора 4 вектор Джонса будет иметь эллиптическую поляризацию. Которую можно рассчитать с помощью поляризационной переменной Γ . Она характеризует основные параметры поляризационного эллипса: азимут и угол эллиптичности.

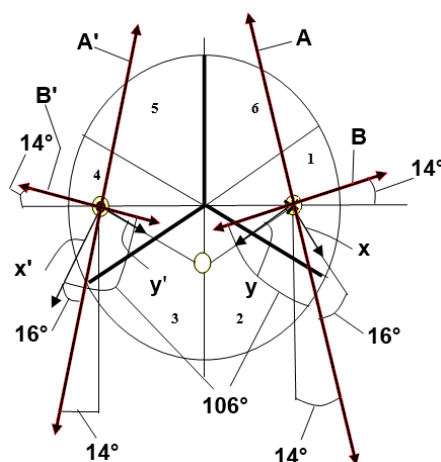


Рисунок 5 – Ориентация входных/выходных линейных поляризаций вектора Джонса электрического поля

По результатам проведенных расчетов установлено, что резонатор лазерного генератора, выполненный по П-образной схеме с двумя зеркалами, уголкового отражателем и электрооптическим затвором с поляризатором, имеет собственный вектор, представляющий собой линейную поляризацию, при этом поляризационные потери, обусловленные взаимным положением уголкового отражателя и поляризатора, отсутствуют при углах φ равных 16° и 106° .

Получено аналитическое выражение, определяющее зависимость квадрата модуля собственного значения матрицы Джонса, описывающей изменение вектора Джонса электрического поля при круговом обходе резонатора, от угла φ и разности скачков фаз δ при полном внутреннем отражении от граней уголкового отражателя для компонент вектора электрического поля, перпендикулярной и параллельной плоскости падения. Указанный квадрат модуля собственного значения характеризует потери по интенсивности излучения в резонаторе, обусловленные взаимным положением уголкового отражателя и поляризатора электрооптического затвора.

Показано, что при вышеуказанных углах 16° и 106° , определяющих положение оси пропускания поляризатора, линейная поляризация вектора Джонса электрического поля при проходе через уголкового отражателя преобразуется в линейную поляризацию, повернутую относительно исходной на угол 28° . При других углах φ на выходе уголкового отражателя возникает эллиптическая поляризация.

Получены выражения для расчета параметров поляризационного эллипса вектора Джонса на выходе уголкового отражателя, в который преобразуется входная линейная поляризация.

Литература

1. Пашков В.А., Плешков А.А., Прядеин В.А. Наземные лазерные целеуказатели-дальномеры для систем высокоточного оружия с полуактивными ГСН. Военный Парад, сентябрь-октябрь 2002, № 5(53), стр.68-69.
2. Зверев Г.М., Голяев Ю.Д. Лазеры на кристаллах и их применение. М.: Радио и связь, 1994. 312 с.
3. Koechner W., Bass M. Solid-State Lasers. Springer, 2003. 422 p.
4. Peck E.R. Polarization properties of corner reflectors and cavities. Journal of the Optical Society of America, v.52, Number 3, March 1962, p.253-257.
5. Иценко Е.Ф., Соколов А.Л. Поляризационная оптика. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Физматлит, 2012 г. 456с.
6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973 г. 721 с.