

光学谐振腔的 CAD

田来科¹ 田东涛² 杨志勇¹ 王 冰¹

姚合宝¹ 董庆彦¹ 柴昕锋¹

(1 西北大学物理学系, 西安 710069)

(2 英业达集团西安无敌科技公司, 西安 710068)

摘 要 根据光线传输矩阵、光学谐振腔及高斯光束的理论, 用 Turbo C 进行了光学谐振腔的 CAD 软件开发研制, 获得了将计算和绘图融为一体的设计应用软件. 该软件采用人机对话的方式, 用简单明晰易操作的汉化选单系统为界面, 对输入参量或选定腔型的腔体, 以文本和图形两种形式, 将其腔内电磁场分布形态及其相应器件输出的有关参量, 谐振腔的几何结构及等价共焦腔显示于屏幕之上.

关键词 光线传输矩阵; 光学谐振腔; C 语言; CAD

0 引言

21 世纪, 是科学技术飞速发展、信息化迅猛发展、产业信息化继续推进的世纪. 计算机辅助设计 (CAD) 技术必将, 渗透到各个领域. 作为交叉学科的典型代表, 现代高新科学与技术象征之一的激光科学与技术的信息化, 也是其发展的一个重要趋势之一^{1,2}.

本文以光线传输矩阵、光学谐振腔及高斯光束的理论为基础, 结合利用计算机中的 C 语言, 研制开发了由主菜单控制, 可以调用包括稳定, 临界, 非稳三大类共 13 种结构的光子振腔的典型腔库, 也可以通过键盘输入参量, 以人机对话方式进行激光器光学谐振腔的腔型设计, 并以图文并茂的形式, 将相关参量和腔型的等效几何结构、等价共焦腔等结果显示于屏幕之上的光学谐振腔的 CAD 系统.

1 光线传输矩阵

空间任意一条直线位置的完全确定, 一般需要四个独立变量. 例如, 在 XYZ 直角坐标系中, 可选垂直于 Z 轴的 XY 平面为参考面, 则空间光线的位置可由它与 XY 面交点坐标 (x, y) 和光线对 X, Y 轴的方向余弦角 (θ, φ) 共同确定. 对于

近轴光线, θ, φ 均很小, 空间光线经过任意光学系统变换后的位置和方向也可用此四个量来表示, 且选择适当的坐标, 可使这种变换呈线性关系. 若光线原来位置和方向为 (x, y, θ, φ) , 经任意光学系统后, 其空间位置和方向变为 $(x', y', \theta', \varphi')$, 两者间关系可表示为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \\ \varphi' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & B_{11} & B_{12} \\ A_{21} & A_{22} & B_{21} & B_{22} \\ C_{11} & C_{12} & D_{11} & D_{12} \\ C_{21} & C_{22} & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \\ \varphi \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \\ \varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)为用几何光学方法研究空间近轴光线变换的基本方程. T 为光线传输矩阵, T 一般为 4×4 矩阵. 而对于轴对称光学系统, 取 Z 轴为其对称轴, 则 (x, θ) 和 (y, φ) 所经历的变化相同. 故只需研究光线在光学系统主截面内轨迹即可. 也就是说, 只需用 (x, θ) 或 (y, φ) 中一组坐标参量即可. 另一个则和其一样. 这样, 光线传输矩阵 T 就由 4×4 矩阵简化为 2×2 矩阵了.

设有一傍轴光线, 在传输过程中偏离光轴 Z 的距离为 x_0 , 传输方向和 Z 轴夹角为 θ_0 , 经过任意的一光学系统变换后, 光线的空间坐标从 $(x_0,$

θ_0) 变成 (x_1, θ_1) , 则两者关系为^{3~10}

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_1 = Ax_0 + B\theta_0 \\ \theta_1 = Cx_0 + D\theta_0 \end{cases} \quad (3)$$

由光路可逆定理得

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} = T^{-1} T \begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} = T^{-1} \begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

而

$$T^{-1} = |T|^{-1} (T_{ji})_{mn} \quad (5)$$

根据光路可逆定理, 光线变换矩阵的行列式为

$$\det(T) = |T| = AD - BC \equiv \eta_1 / \eta_2 \quad (6)$$

式中, η_1 为入射光线所在空间介质的折射率, η_2 为出射光线所在空间介质的折射率. 当 $\eta_1 = \eta_2$ 时, 即光线在均匀同种介质中传输时

$$\det(T) = AD - BC = 1 \quad (7)$$

经过不同的光学系统, 光线传输矩阵 T 也不同. 若一个光学系统由 n 个光学元件组成, 设输入参考面到光学系统的第 1 个元件的传输矩阵为 T_{i1} , 而第 1 个元件到第 2 个元件传输矩阵为 $T_{1,2}$, 依此类推, 第 $(n-1)$ 个元件到第 n 个元件传输矩阵为 $T_{n-1,n}$, 和 n 个元件到输出参考面传输矩阵为 T_{n0} , 而从组成光学系统的第 1 个元件开始, 一直到第 n 个光学元件, 它们各自的光线传输分别为 $T_1, T_2, \dots, T_{n-1}, T_n$, 则从输入参考面到输出参考面的光线传输矩阵为

$$\begin{aligned} T &= T_{n0} T_n T_{n-1,n} T_{n-1} T_{n-2,n-1} T_{n-2} \cdots \\ &\quad \cdot T_2 T_{1,2} \cdot T_1 T_{i1} \\ &= \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

2 光学谐振腔

2.1 无源腔

考虑由 M_1 和 M_2 两反射镜组成的共轴球面腔, M_1 和 M_2 的曲率半径分别为 R_1 和 R_2 , 两镜相距 L , 两镜面曲率中心构成系统的轴线 Z 为腔轴, 腔对于 Z 轴是柱对称的, 所以, 只需考虑子午面内的光线传播行为.

设光线从 M_1 镜出发向 M_2 镜方向传播, 其初始坐标为 (x_0, θ_0) , 到达 M_2 上时, 坐标变成 (x_1, θ_1) , 被 M_2 反射后坐标变为 (x_2, θ_2) , 光线从 M_2 传到 M_1 上时, 坐标为 (x_3, θ_3) , 经 M_1 反射后坐标成为 (x_4, θ_4) 则由光线传输矩阵可得各坐标参量

间关系式^{3~10}

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x_4 \\ \theta_4 \end{pmatrix} &= T(R_1) \begin{pmatrix} x_3 \\ \theta_3 \end{pmatrix} \\ &= T(R_1) T(L) \begin{pmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} \\ &= T(R_1) T(L) T(R_2) \begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} \\ &= T(R_1) T(L) T(R_2) T(L) \begin{pmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{pmatrix} \\ &= T \begin{pmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

式中

$$T(R_1) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2R_1^{-1} & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$T(R_2) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2R_2^{-1} & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$T(L) = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

分别为 M_1, M_2 及光线在腔内传输的传输矩阵. 得

$$T = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - 2L/R_2 & \\ -2/R_1 - 2/R_2 + 4L/(R_1 R_2) & \\ 2L(1 - L/R_2) & \\ -2L/R_1 + (1 - 2L/R_1)(1 - 2L/R_2) & \end{pmatrix} \quad (13)$$

由此可见, 光线在共轴球面腔内的往返传输矩阵 T 与光线的初始坐标无关. 因而它可描述任意近轴光线在腔内往返传播的行为.

当光线在腔内往返传播 n 次后, 光线传输矩阵则为 n 个往返矩阵 T 连乘积, 利用矩阵的 Sylvester 定理得

$$\begin{aligned} T^n &= \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}^n = \frac{1}{\sin \phi} \\ &\quad \cdot \begin{pmatrix} A \sin n\phi - \sin(n-1)\phi & B \sin n\phi \\ C \sin n\phi & D \sin n\phi - \sin(n-1)\phi \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

式中

$$\phi = \arccos 2^{-1}(A + D) \quad (15)$$

经 n 次往返后光线未逸出腔外, 仍在镜面上, 其坐标为 (x_n, θ_n) , 则

$$M_n = \begin{pmatrix} x_n \\ \theta_n \end{pmatrix} = T^n \begin{pmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

则要求 T^n 的各个元素 A_n, B_n, C_n 及 D_n 对任意值 n 均保持有限,即要求式(14)中 ϕ 为实数(且 $\phi \neq K\pi, K=0,1,2,\dots$)由式(15)得

$$-1 < 2^{-1}(A+D) < 1 \quad (17)$$

将 A, D 代入式(17)得

$$0 < (1-L/R_1)(1-L/R_2) < 1 \quad (18)$$

令

$$g_1 = 1 - L/R_1 \quad g_2 = 1 - L/R_2 \quad (19)$$

则

$$0 < g_1 g_2 < 1 \quad (20)$$

g_1, g_2 为表征腔的几何尺寸的因子,所有满足

$$0 < g_1 g_2 < 1$$

条件的共轴球面腔傍轴光线在腔内经任意多次往返传播而不会逸出腔外,光线在腔内传播时能量损耗很小,称之为稳定腔⁵.

所有满足

$$g_1 g_2 > 1, g_1 g_2 < 0 \quad (21)$$

条件的共轴球面腔称为非稳腔.傍轴光线在腔内往返有限次后,必然从侧面逸出腔外,光线传播几何损耗高³.

所有满足

$$g_1 g_2 = 0, g_1 g_2 = 1 \quad (22)$$

条件的共轴球面腔称为临界腔⁵.

2.2 有源腔

对于处于运转状态的激光器,其光学谐振腔一般称为有源腔.有源腔由于器件需要,可在腔内加入其它光学元件,再加之热效应的影响,其等效的腔型计算则除了考虑两端腔镜外,还必须考虑腔内均匀的、非均匀的光学传播介质,其它光学元件等因素.这时,为判别其等效腔型只需按如下三步骤进行^{3,7}.

1)先计算两腔镜之间传播介质及元件的光线变换矩阵

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_k & b_k \\ c_k & d_k \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{pmatrix} \quad (23)$$

2)求出等效腔的 g 参量,设两腔镜曲率半径分别为 R_1 和 R_2 ,几何腔长为 L 则此激活腔的 g 参量为

$$\begin{cases} g_1 = a - bR_1^{-1} = 1 - \frac{L/R_1 L}{R_1(1-a) + b} = 1 - L/R_1 \\ g_2 = d - bR_2^{-1} = 1 - \frac{L/R_2 L}{R_2(1-d) + b} = 1 - L/R_2 \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} R_1 = \frac{R_1 L}{R_1(1-a) + b} \\ R_2 = \frac{R_2 L}{R_2(1-d) + b} \end{cases} \quad (25)$$

3)求出 g_1, g_2 之积,利用稳定、临界及非稳腔条件即可判别出等效腔型,利用式(25)求出等效腔曲率半径 R_1, R_2 .

3 高斯光束

对于开放式光学谐振腔,当腔镜尺寸 $a_i > \lambda$ ($i=1,2$)腔 $L \gg \lambda$ (λ 为腔内传播光波波长)时,任意稳定球面腔和共焦腔一样,谐振腔内的稳定光场的基模均具有高斯光束的特征.若取腔轴为 Z 轴,则沿 Z 轴方向传播的基模高斯光束,不管其由何种结构的稳定腔所产生,其横向模式场均可表示为如下的一般形式^{5,6,9,10}

$$\psi_{00}(x, y, z) = \frac{C}{\omega(z)} e^{-\frac{r^2}{\omega^2(z)}} \cdot e^{-i[k(z+r^2/2R) - \arctan(z/f)]} \quad (26)$$

式中 C 为常量因子,其余各符号的意义分别为

$$\begin{aligned} r^2 &= x^2 + y^2, K = 2\pi/\lambda, \omega(z) = \omega_0 \\ &\cdot \sqrt{1 + (z/f)^2}, R = R(z) = z[1 + (f/z)^2], \\ f &= \pi\omega_0^2/\lambda, \omega_0 = \sqrt{\lambda f/\pi} \end{aligned} \quad (27)$$

式中 ω_0 为基模高斯光束的腰斑半径; f 为高斯光束的共焦参量; $R(z)$ 为与腔轴相交于 z 点的高斯光束等相位面的曲率半径; $\omega(z)$ 为与腔轴相交于 z 点的高斯光束等相位面上的光斑半径.对于由一般稳定球面腔(R_1, R_2, L)所形成的高斯光束,参量 ω_0 及 f 与 $R_1 R_2$ 和 L 的关系为

$$\begin{cases} \omega_0^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 \frac{L(R_1-L)(R_2-L)(R_1+R_2-L)}{(R_1+R_2-2L)^2} \\ f^2 = \frac{L(R_1-L)(R_2-L)(R_1+R_2-L)}{(R_1+R_2-2L)^2} \end{cases} \quad (28)$$

高斯光束在自由空间传播时,在其传输轴附近可近似看成是一种非均匀的球面波.其曲率中心随着传输过程而不断改变,但其振幅和强度在横截面内始终保持高斯分布,且其等相位面始终保持为球面,球面曲率半径 $R(z)$ 和光斑半径如式(27)所给.定义在基模高斯光束强度 e^{-2} 点的远场发散角为

$$\theta_0 = \lim_{z \rightarrow \infty} [2\omega(z)/z] = 2(\lambda/\pi\omega_0) = 2\sqrt{\lambda/\pi f} \quad (29)$$

由式(27)中 $\omega(Z)$ 式两边平方整理得 $\omega(z)$ 随 z 变化为

$$\omega^2(Z)/\omega_0^2 - z^2/f^2 = 1 \quad (30)$$

根据任意一个共焦球面(或抛物面)腔与无穷多个稳定球面腔等价;和任一稳定球面腔唯一地等价于某一个共焦腔,及稳定球面腔的稳定光场分布在腔镜处的等相位面和腔面完全吻合,可得一般球面稳定腔的等价共焦腔的中心 O 的位置和共焦参量 f . 设一般稳定球面腔的参量为 (R_1, R_2, L) , 其等价共焦腔的中心 o 距一般稳定球面腔 M_1 、 M_2 镜的坐标分别为 z_1, z_2 , 共焦参量为 $f(z_1, z_2, f)$ 与 (R_1, R_2, L) 关系为

$$\begin{cases} z_1 = \frac{L(R_2 - L)}{(L - R_1) + (L - R_2)} \\ z_2 = \frac{L(R_1 - L)}{(L - R_1) + (L - R_2)} \\ f^2 = \frac{L(R_1 - L)(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)}{[(L - R_1) + (L - R_2)]^2} \end{cases} \quad (31)$$

一般稳定球面腔 (R_1, R_2, L) 行波场基模光斑半径分布、腔镜面 M_1, M_2 上的光斑半径及基模体积和高阶模体积可表示为^{5~10}

$$\begin{cases} \omega(z) = \sqrt{\frac{\lambda L}{\pi}} [1 + (\frac{z}{f})^2] = \omega_0 \sqrt{1 + (\frac{z}{f})^2} \\ \omega_{s_1} = \sqrt{\frac{\lambda L}{\pi}} [\frac{R_1^2(R_2 - L)}{L(R_1 - L)(R_1 + R_2 - L)}]^{1/4} \\ = \sqrt{\frac{\lambda L}{\pi}} [\frac{g_2}{g_1(1 - g_1 g_2)}]^{1/4} \\ \omega_{s_2} = \sqrt{\frac{\lambda L}{\pi}} [\frac{R_2^2(R_2 - L)}{L(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)}]^{1/4} \\ = \sqrt{\frac{\lambda L}{\pi}} [\frac{g_1}{g_1(1 - g_1 g_2)}]^{1/4} \\ \omega_0 = \sqrt{\frac{\lambda L}{\pi}} [\frac{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}{(g_1 + g_2 - 2g_1 g_2)^2}]^{1/4} \\ V_{00} = \frac{1}{2} L \pi (\frac{\omega_{s_1} + \omega_{s_2}}{2})^2 = \frac{1}{2} L^2 \lambda \\ \cdot [2 + \sqrt{\frac{g_1}{g_2}} + \sqrt{\frac{g_2}{g_1}}] \frac{1}{4 \sqrt{1 - g_1 g_2}} \\ V_{mn} = \sqrt{(2m+1)(2n+1)} V_{00} \end{cases} \quad (32)$$

4 光学谐振腔的 CAD

4.1 软件设计思想结构及功能

在激光设计中,光学谐振腔的设计为其关键的一环,腔型结构不但决定了激光工作物质能否被充分利用,在给定条件下,使激光器处于最佳工作状态,且直接影响和决定着腔内光场的分布特征及输出光束的特性. 光学谐振腔 CAD 的开发,就是为不同用途的器件设计,选择最佳光学谐振腔提供方便而快捷的咨询参考,尤其对于激活腔,通过利用公式(23)~(32)编程计算,可大大减少试验投入,达到预期光束参量要求,满足客户的需要.

软件结构可分为四大块:

1) 曲型腔库

包括稳定、临界和非稳腔三大类共计 13 种腔型. 稳定腔有:双凹稳定腔、凹凸稳定腔、平凹稳定腔;临界腔有:平-平腔、共焦腔、共心腔(实共心腔、虚共心腔);非稳腔有:双凸非稳腔、平凸非稳腔、双凹非稳腔、凹凸非稳腔、实共焦非稳腔和虚共焦非稳腔等.

典型腔库给出以上各种腔的 g_1, g_2 及 $g_1 \times g_2$ 的值域;腔结构示意图;稳定腔的等价共焦腔等.

2) 无源腔的 CAD

分为无工作物质腔和有工作物质腔. 当选无工作物质腔时,屏幕提示输入 g_1, g_2, L (腔长), λ (激光波长)等参量. 然后软件依据 1~3 部分所介绍的理论公式,代入输入参量计算出结果,并在屏幕上输出相应腔型结构示意图,并在图右下角注明显示图与实际图尺寸比例;对于稳定腔,还给出等价共焦腔示意图、相应腔型及基模高斯光束的参量. 如 $g_1, g_2, g_1 \times g_2, R_1, R_2, \omega_0, W_{s1}, \omega_{s2}, \theta_0$ (基模远场发散角), f (共焦参量)和等价共焦腔中心 O 距稳定腔镜 M_1, M_2 的距离 z_1 和 z_2 等.

当选有工作物质腔时,屏幕将显示出一些常用工作物质供用户选择,当选定工作物质后,屏幕将提示输入 g_2, g_2 腔的几何长度 L , 工作物质长度 l , 激光波长 λ 等参量. 在计算中,所需工作物质折射率等参量,当你选定工作物质后,软件将自动选择代入相应参量,输出功能参量及示意图等,和无工作物质腔雷同.

3) 有源腔的 CAD

有源腔是在无源腔的基础上,加入了工作物质在运转状态时可能产生的热效应,特殊器件腔内加入其它元件时的等效腔计算. 这时,对谐振

g 因子、等效腔曲率半径 R_1', R_2' 的计算主要依据 2.2 部分中的式(23)、(24)和(25)。然后再结合其它公式,计算出相关参量。

4) 其它

提供了常见的一些激光工作物质有关参量指标、常用物理常量等,供器件设计时选用工作物质参考。给出软件使用说明、参考文献等,以供用户查阅应用。

4.2 实现方法及特点

本软件设计中,依据的主要物理及公式在 1~3 部分已给出,因文章篇幅限制,对有些未给出,如非稳腔共轭象点、光束几何放大率等一些内容。采用 C 语言编程,以模块化结构形式,将计算和绘图融为一体。并采用人机对话方式,以简

参考文献

- 1 于德利,王润文,陶永祥.铜蒸汽激光器计算机辅助设计.强激光与粒子束,2001,13(3):303~308
- 2 傅雷,李建国,史红民等.非稳腔准直和失调影响的计算机仿真.中国激光,2001,28(8):709~713
- 3 田来科. $CW Nd^{3+}:YAC$ 激光器激活腔的分析与选择.激光杂志,1995,16(5):204~206
- 4 田来科.薄膜的光学特性分析.光子学报,1996,25(6):555~560
- 5 周炳琨,高以智,陈倜嵘等.激光原理.北京:国防工业出版社,2000,30~40,88~98
- 6 吕百达.激光光学.成都:四川大学出版社,1992:269~325
- 7 蔡伯荣.激光器件.长沙:湖南科技出版社,1983:227~253
- 8 赫光生,雷仁湛.激光器件设计基础.上海:上海科学技术出版社,1979:19~55
- 9 沈柯.激光原理教程.北京:北京工业学院出版社,1986:153~220
- 10 冯志超,程哲源,许冰.激光物理.成都:成都电讯工程学院出版社,1988:16~57,122~181

明而易操作的汉化菜单为界面,对输入的谐振腔参量或选定的腔体,以文本和图形两种形式,将其腔内电磁场分布形态及相应器件输出的有关参量、

谐振腔的几何结构及等价共焦腔呈现于屏幕之上。由于采用模块化结构,所以,可根据需要,灵活而方便地添加、修改和维护。

5 小结

在光学谐振腔的设计中,腔型结构是最重要和最复杂的一方面。但除腔型结构外,还需考虑谐振腔本底材料的选择、反射膜的镀制等其它一些方面。本软件仅考虑了激光器腔型结构设计,还有许多方面有待进一步完善。

OPTICAL RESONATORS CAD

Tian Laike¹, Tian Dongtao², Yang Zhiyong¹, Wang Bin¹

Yao Hebao¹, Dong Qingyan¹, Chai Xifeng¹

1 Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069 China

2 Besta Techonology Company, Inventec Group, Xi'an 710068 China

Received date:2001-12-08

Abstract The software of optical resonators CAD is developed by Turbo C according to theory of Gaussian beam, optical resonator and ray-transfer matrix. The applied software has two functions of calculating and drawing. In this software, man-machine interaction is used, The interface of Chinese menu system is simple, clear and easy to operate. The electromagnetic field distribution in cavity and relevant parameters for lasers are displayed by means of text and grapher on screen. the geometric constitution of resonator and equivalent confocal cavity are also displayed on screen.

Keywords Ray-transfer matrix; Optical resonator; C Language; CAD

Tian Laike was born in 1949, in Xi'an, China. He graduated from the physics department of University of Science and Technology of China. He has been teaching and doing research work in the areas of laser and optronics. He is interested in the fields of laser science and technology, optical information, light scattering, optronics and so on. He has published about thirty papers.

