

非均匀介质对强激光传播的影响

刘世林 戴静华 马兴孝

(中国科技大学化学物理系, 合肥 230026)

摘 要 以强激光应用在化学工程中所遇到的物理问题为背景, 研究介质的热透镜效应、吸收强弱、吸收饱和程度以及介质的流动等因素对激光传播的影响。根据一组简化模型, 提出了描述光场行为的方程组, 给出了不同情况下介质的温度分布情况、光线在介质中的变化行为以及激光光强的分布变化情况。所得结果, 对光化学工程设计有一定的参考价值。

关键词 强激光, 饱和吸收, 非均匀色散, 传播。

1 引 言

随着各种大功率激光器不断出现, 激光在化工领域中应用的可能性愈来愈大, 若能利用激光有选择地控制化学反应的进行, 以得到大量的以前无法得到的特殊物质, 对整个化工生产来说, 无论是技术是还是理论上都将将是重大的变革。但是, 这里存在着一个不可避免的问题, 那就是, 当激光穿过吸收介质时, 由于吸收, 光强将逐渐衰减; 同时, 还由于吸收光强横向分布的不均匀性, 引起介质的热透镜效应; 此外, 由于光化学工程中激光强度较高(而且必须高, 以提高产率), 介质的吸收很容易达到饱和, 因此其饱和效应对光束的影响不可忽视; 还有, 反应过程中介质必须流动, 以便将反应产物及时运走, 流动方向的不同也会对传播情况产生影响。由于光化学过程中介质的吸收系数很大, 而且必须很大, 导致介质密度梯度的变化也很大, 一些与密度有关的物理量值在空间各点也有所不同, 例如吸收系数 α , 饱和光强 I_s 等, 这些物理量的变化又会反过来影响光的传播行为。由此可见, 强激光与吸收介质之间的相互作用是个很复杂的非线性问题。了解这种情况下激光在介质中的传播行为, 对光化学工程来说是必不可少的, 同时对一些光化学实验来说也是很重要的。本工作就是基于上述背景, 通过一些简化模型, 研究强激光在气体吸收介质中的传播行为。

2 理论处理

本文所研究的问题恰好与大气传输问题互为补充。对于大气传输, 通常是弱热透镜效应的长距离传输^[1~3], 而本文面临的却是强吸收、热透镜效应显著的短程传输。因此, 处理大气传输问题所通常采取的方法在此并不适用, 作者从最根本的物理图象出发, 将所研究的问题以方程组的形式写出, 然后求解并讨论。

2.1 方程组的建立

根据能量守恒, 介质中单位体积内的能量增加必定等于介质所吸收的光能,

$$\nabla \cdot (IS) + \alpha I = 0, \quad (1)$$

式中 I 为光强, S 为能流方向矢量, 即光线方向矢量, α 为介质吸收系数与光强有关。对 $\alpha(I)$ 是这样考虑的: 首先, 它应尽量简单, 以便计算; 其次, 它应尽量符合光化学反应实际情况, 而且表达式中所含参数尽可能少。采用:

$$\alpha = \alpha_0 / (1 + I/I_s), \quad (2)$$

式中 α_0 为线性吸收系数, I_s 为吸收饱和光强。

方程(1)的求解须知光线矢量 S 的变化情况, 为此采用几何光学描述光线, 这在所关心的几何尺度范围内(如光束半径, 反应器尺寸等)是成立的。对单色光, 波矢量 k 满足,

$$\nabla \times k \equiv 0, \quad (3)$$

$$k = nk_0 S, \quad (4)$$

式中 n 为介质折射率, k_0 为真空中该激光波长的波矢。

方程(1)、(3)给出介质中光强的分布和光线变化。它们在特殊情况下存在解析解。当 α 、 n 为常数时, 光强的变化遵从 Beer 定律; 当介质折射率 $n = n_0(1 - ar^2)$, n_0 、 a 为常数, r 为垂直于光束轴线的距离, 该情况下的结果可描述自聚焦光纤中光线的传播行为。

当介质吸收光能而被加热, 其密度将发生变化, 而折射率与介质密度成正比, 因此, 波矢的大小与温度的关系为,

$$k = nk_0 = k_0[1 + (n_0 - 1)T_0/T], \quad (5)$$

式中 T_0 、 n_0 分别表示室温和相应条件下的介质折射率。由此看出, 欲知光场分布情况, 还需知介质的温度分布。为简单起见, 仅研究稳态情况, 即介质折射率不随时间变化, 同时认为热交换的主要形式为热传导, 而将对流作为一种平均效果, 体现在热传导系数 κ 中。介质流动时, 温度方程为,

$$\rho C_p V \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \alpha I, \quad (6)$$

C_p 为定压热容量, ρ 为介质质量密度, V 为介质流速。

2.2 柱对称下方程组的微分形式

考虑到问题的物理背景, 同时为简单起见, 认为光场分布和温度分布应该是以光束轴线为对称轴的柱对称分布; 并且仅考虑与光传播方向平行的介质流动。取光束轴线为 Z 轴, 垂直于该轴的方向为 r 轴, 建立柱坐标系, 则方程(1)、(3)、(6)化为

$$\frac{\partial I}{\partial z} + \eta \frac{\partial I}{\partial r} = - [\alpha(1 + \eta^2)^{1/2} - \frac{\eta}{1 + \eta^2} \frac{\partial \eta}{\partial z} + \frac{1}{1 + \eta^2} \frac{\partial n}{\partial r} + \frac{\eta}{r}] I, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial z} + \eta \frac{\partial \eta}{\partial r} = - (1 + \eta^2) (\eta \frac{\partial \ln k}{\partial z} - \frac{\partial \ln k}{\partial r}), \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} (\kappa \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\kappa r \frac{\partial T}{\partial r}) - \rho C_p V \frac{\partial T}{\partial z} + \alpha I = 0. \quad (9)$$

方程中 $\eta = \tan \theta$, θ 为光线矢量 S 与 Z 轴夹角。这样, 方程(7)、(8)、(9)并结合关系式(2)、(5)给出介质中温度、光强分布以及光线变化情况。需要说明的是方程组中的一些参量与温度有一定的依赖关系。

2.3 各参量与温度的关系

2.3.1 线性吸收系数 $\alpha_0(T)$

α_0 与吸收体数密度 N 成正比, $\alpha_0 = \sigma N$, σ 为分子吸收截面, 它与辐射跃迁线型因子 $g(\nu)$ 以及爱因斯坦系数 B 的关系为,

$$\sigma = g(\nu)Bh\nu/c. \quad (10)$$

对于气体介质, 线型一般为多普勒型, 则

$$g(\nu) \approx \delta\nu^{-1} \propto T^{-1/2} \quad (11)$$

而 $N \propto T^{-1}$, 所以 $\alpha_0 \propto T^{-3/2}$, 用室温条件表示就是,

$$\alpha_0 = \alpha_{00}(T_0/T)^{3/2} \quad (12)$$

α_{00} 为室温 T_0 时的线性吸收系数。

2.3.2 饱和光强 $I_s(T)$

以二能级体系为例, 将吸收系数 α 用能级集居数表示^[4],

$$\alpha = (h\nu/c)BN_g(\nu)/[1 + I_g(\nu)B/A] \quad (13)$$

式中 A 、 B 均为爱因斯坦系数, N 为分子数密度, 该式右边分子部分为线性吸收系数 α_0 , 与表达式(2)比较可看出,

$$I_s^{-1} = g(\nu)B/A \propto T^{-1/2}, \quad (14)$$

可写成

$$I_s = I_{s0}(T/T_0)^{1/2}. \quad (15)$$

2.3.3 热传导系数 $\kappa(T)$

根据气体动力论知识^[5],

$$\kappa = NU\lambda C_v/3 \quad (16)$$

式中 U 为分子平均运动速率, λ 分子平均自由程, C_v 分子热容量。由 U 、 λ 及 N 与温度的关系得

$$\kappa = \kappa_0(T/T_0)^{1/2} \quad (17)$$

式中 κ_0 为室温热传导系数。

2.3.4 边界条件

方程组的求解范围定为: $z = 0 \sim L$, $r = 0 \sim R$ (长为 L 、半径为 R 的圆柱)。结合问题的物理背景, 采取如下边界条件:

$$\begin{aligned} z = 0 \quad & I(0, r) = I_0 \exp(-2r^2/a^2), \quad n(0, r) = 0, \\ & \partial T/\partial z = 0. \quad (\text{准直高斯光入射, 窗口准绝热}) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} z = L \quad & I(L, r) = 0, \quad \partial \eta/\partial z + \eta \partial \eta/\partial r = 0, \\ & \partial T/\partial z = 0. \quad (\text{窗口准绝热, 光强衰减为零, 光线方向不变}) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} r = 0, \quad & \eta(z, 0) = 0, \quad \partial I/\partial r = 0, \\ & \partial T/\partial r = 0. \quad (\text{柱对称条件决定}) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} r = R, \quad & I(z, R) = 0, \quad \partial \eta/\partial z + \eta \partial \eta/\partial r = 0, \\ & \partial T/\partial r = 0. \quad (\text{光强衰减为零, 光线方向不变}) \end{aligned} \quad (21)$$

理论是要求 L 、 R 无限大, 但求解过程中要求 L 和 R 满足条件

$$\exp(-\alpha_{00}L) \leq 10^{-6}, \quad \exp(-\alpha_{00}R) \leq 10^{-6} \quad (22)$$

即可。至此, 考虑的问题完全转化为求解由微分方程(7)、(8)、(9)和关系式(2)、(5)、(12)、(15)、(17)所组成的方程组在给定边界条件(18)~(21)情况下的数学形式。

2.3.5 计算过程简述

方程组无量纲化后, 所含的参数有: I_0/I_{s0} , $\alpha_{00}a$, n_0 以及 NC_pV/κ_0 . 各参数取值为: $Q = I_0/I_{s0} = 0, 1$ (线性吸收, 饱和吸收); $\alpha_{00}a = 0.05, 0.01, 0.001$ (吸收强、弱); $n_0 = 1.0004$; $NC_pV/\kappa_0 = 2 \times 10^{29}, -2 \times 10^{29}$ (顺光流动, 逆光流动)。

利用控制容积法将微分方程(7)、(8)、(9)离散化, 每个网格点上的物理量均可用周围网格点的物理量表示, 结合边界条件, 用叠代法求解离散化方程, 直到满足收敛判据条件。在保证各物理量精度不小于 10^{-3} 的条件下, 尽量选取大的网格点以减少计算量; 叠代法求解该离散化方程的收敛条件是: 对于温度 T 和光强 I , 各点的叠代新、旧值的相对变化小于 10^{-5} , 而 η 的相对变化定为小于 10^{-3} , 这是因为 η 为一比值, 其本身就很小。当叠代结果满足条件时, 认为已收敛, 否则继续叠代。作者在 VAX-8700 计算机上利用自编程序, 输入上述参数, 给出了介质中的温度分布、光线变化和光强分布, 同时研究了吸收饱和与非饱和、吸收强与弱以及介质流动方向对这些分布的影响。

3 结 果

3.1 温度分布

介质的温度变化导致介质折射率发生变化, 从而改变光线方向, 光强在介质中的空间分布也随之改变。因此温度变化是所有变化的根源。典型的温度空间分布如图 1 所示。入射端光束中心位置温度最高; 在光传播方向, 随着吸收程 $\alpha_{00}Z$ 的增大, 温度逐渐降至室温; 在垂直于光传播方向的横向方向, 温度也逐渐降至室温, 但该方向温度分布的宽度随吸收程增大而增大。改变输入参数, 温度大小有所不同, 但其分布特点是一致的。温度场的这种分布决定了介质中光线的变化情况。

3.2 光线变化

在图 1 所示的温度分布情况下, 介质中的光线变化如图 2 所示。准直入射光束不断发散, 最终又变为准直光; 随着光的传播, 光线从外层到内层逐渐发散; 发散程度也有所不同, 外层($r/a > 2$) 最小, 内层($r/a = 1$ 附近) 最大, 中心($r/a = 0$ 附近) 次之。

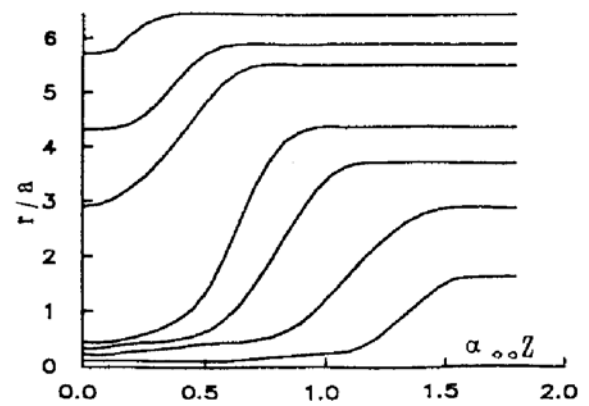
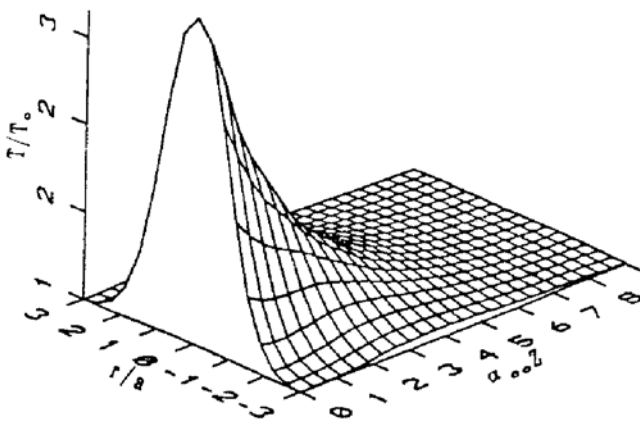


Fig. 1 The spatial distribution of temperature with $\alpha_{00} = 0.01, v = 5 \text{ cm/s}$ and $Q = 1$

Fig. 2 The light changes of a collimated incident light beam in the medium

3.3 光强的衰减

以轴上光强为例, 研究光线的发散、吸收饱和程度以及介质的流动方向对其随吸收程 $\alpha_{00}Z$ 变化的影响, 结果如图 3 所示。曲线 A、B 分别为介质逆光流动 ($V < 0$) 下饱和吸收 ($Q =$

1) 和线性吸收($Q = 0$)时的光强纵向变化, 曲线 C、D 则为顺光流动($V > 0$)下饱和吸收和线性吸收时的情况。令求解方程组中的 $\eta = 0$ (实际上是不可能的), 即光线不变化, 得到与曲线 A 相对应的虚线 A'。由此看出: 介质热透镜效应造成的光线发散导致光强更快地衰减; 介质顺光流动时光强的衰减比逆光流动时快; 光强在线性吸收情况下的衰减比饱和吸收时要快, 这是因为饱和吸收导致介质的吸收能力下降。

3.4 光强横向分布

该分布的变化可反映出光束特性的变化, 对光路设计来说至关重要。不同吸收程处的光强横向分布如图 4 所示。可以看出, 随着吸收程的变化光强横向分布越来越偏离入射时的高斯分布, 即曲线翼端变宽而中心区域变窄。这可以从图 2 的光线变化得到解释: 光线的发散导致光束外层($r > 2$)光线密度增大, 即光强增大, 而中心区域($r = 0$)光线的发散程度比外层小, 且随着 $\alpha_{00}Z$ 的增大, 中心区光线不断向外发散, 导致光强横向分布的中心区域越来越窄。

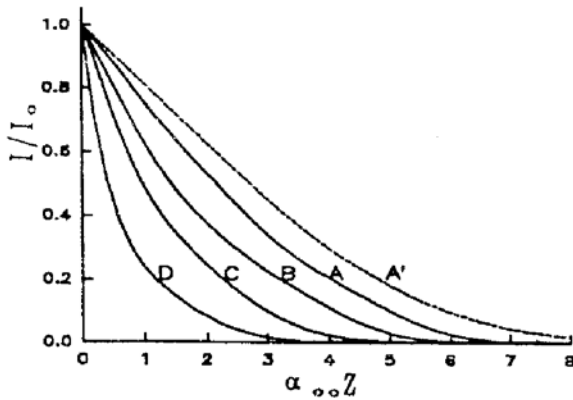


Fig. 3 Variations of the axial light intensity with the absorption length $\alpha_{00}Z$

Parameters for the curves: A: $v = -5$ cm/s, $Q = 1$,
B: $v = -5$ cm/s, $Q = 0$, C: $v = +5$ cm/s, $Q = 1$,
D: $v = +5$ cm/s, $Q = 0$, A': $v = -5$ cm/s, $Q = 1$,
assuming no light dispersion

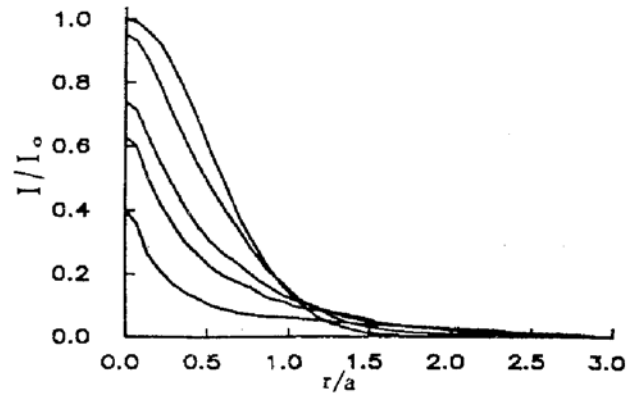


Fig. 4 The light intensity distributions at different absorption lengths. Curves in the figure from outer to inner correspond to $\alpha_{00}Z = 0, 0.05, 0.2, 0.4, 0.6$ and 1.0 respectively

3.5 光束半径

通常用光束半径描述上述光强横向分布, 考虑到光束内层和外层的变化趋势不同, 同时考查最大光强($r = 0$ 处)的 e^{-1} 和 e^{-3} 所对应的两个光束半径的变化, 用 R_{-1} 和 R_{-3} 表示, 至于通常采用的 e^{-2} 所对应的光束半径, 其变化规律与 R_{-3} 相同, 仅数值不同而已。图 5 是在图 1~4 相同的线性吸收系数下, 介质线性吸收、饱和吸收、顺光流动、逆光流动时, 光束半径 R_{-1} 和 R_{-3} 随吸收程 $\alpha_{00}Z$ 的变化情况。该图表明:

无论介质吸收是否饱和, 以及介质流动顺光还是逆光, 随着吸收程的增大, 光束半径 R_{-1} 和 R_{-3} 均趋向于各自的衡定值。这一点也可从光线图 2 中看出, 由于介质的热透镜效应, 准直光线变为发散, 但当吸收程增大到一定程度时, 光线不再变化, 又成为平行光, 因此光强横向分布不再变化, 即光束半径不变。

随着光的传播 R_{-3} 逐渐增大而 R_{-1} 逐渐减小, 表明光束的畸变越来越严重; 对于相同的吸收程, 光束的畸变程度在介质顺光流动时比逆光流动时大, 线性吸收时比饱和吸收时大。

光束半径 R_{-1} 和 R_{-3} 各自所趋向的恒定值大小只与线性吸收系数 α_{00} 有关。以饱和吸收 ($Q = 1$)、介质顺光流动为例, 图 6 中画出了 $\alpha_{00} = 0.001, 0.01, 0.05$ 时的光束半径变化情况。吸收越强 R_{-1} 越小, 其最终值也越小, 而 R_{-3} 的变化则恰恰与之相反。这表明光束的最终畸变程度只取决于线性吸收系数。

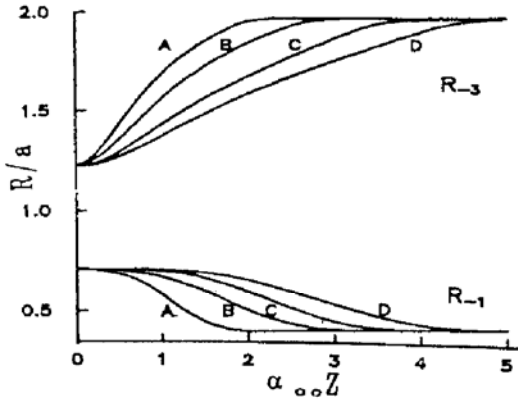


Fig. 5 Changes of beam radii R_{-3} and R_{-1} for $\alpha_{00} = 0.001$

A: $v = +5$ cm/s, $Q = 0$; B: $v = +5$ cm/s, $Q = 1$; C: $v = -5$ cm/s, $Q = 0$; D: $v = -5$ cm/s, $Q = 1$

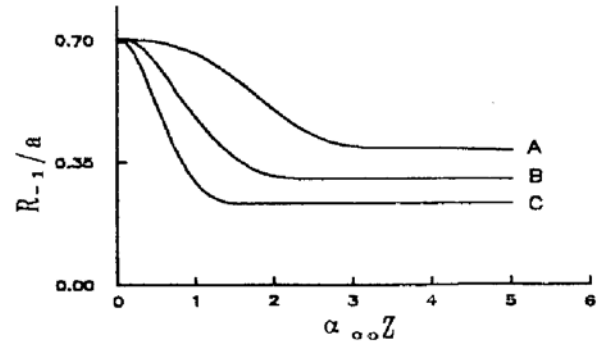


Fig. 6 The evolutions of beam radius R_{-1} for $v = +5$ cm/s and $Q = 1$. Curves A, B and C correspond to $\alpha_{00} = 0.001, 0.01, \text{ and } 0.05$

4 讨 论

上述计算结果之间是相容的, 由温度的变化可以解释光线变化, 光线变化又可解释光强横向分布, 该分布的变化可用两种光束半径的变化描述, 因此计算过程是合理的而且是正确的。在建立方程组时, 曾假定热传导是热交换的唯一形式, 实际情况下对流的影响也不可忽视。如果考虑对流的作用, 柱对称条件将不成立, 必须求解三维微分方程, 这将使问题更加复杂化。不过, 如果仅需了解介质中的光束传播行为, 而对其细致情况不作要求, 则可将对流看作一种平均效果, 体现在热传导系数 κ 中, 这样做的结果使得表观热传导系数比实际值有所增大, 导致介质温度梯度下降, 折射率梯度也下降, 因而光束畸变程度将有所下降。

对于介质流速, 根据方程(6), 如果 V 足够大, 则 $\nabla T \sim \alpha I / (\rho C_p V)$, 即介质温度梯度非常小, 此时光线将不发生变化, 如同在均匀折射率介质中传播; 而当介质流速 $V < \kappa / \rho C_p a$ 时, 与热传导相比, 介质流动所产生的影响又可以忽略不计。

利用该计算方案, 还可研究其它方面的问题。例如对于液体或固体, 如果知其折射率与温度的关系, 则可研究强激光在强吸收凝聚相中的传播行为。另外, 该计算方案所涉及的一些参数, 如吸收系数 α_{00} 、饱和光强 I_s 、热传导系数 κ 等, 都是很容易测量的, 因此预期将来实验结果可与该计算结果直接相比较。

结 论 本文提出了一套计算方案, 用于研究强激光在气相强吸收介质中的传播行为, 该方案是基于求解能量方程, 几何光线方程以及温度方程所组成的方程组, 并利用介质折射率、吸收系数、饱和光强、热传导系数等与温度的关系, 得到介质和温度分布, 光线的变化, 光强的纵、横向变化, 以及用以描述光束畸变程度的两个光束半径的变化, 研究了介质吸收强弱、饱和程度、流动方向等因素对光场的影响。从中取得的结果对激光在化工生产中的应用有一

定参考价值。

参 考 文 献

- [1] F. G. Gebhardt, High power laser propagation. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(6): 1479~1493
- [2] P. M. Livingston, Thermally induced modification of a high power CW laser beam. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(2): 426~437
- [3] S. A. Akhmanov, D. P. Krindach, A. P. Sukhorukov, Thermal self actions of laser beams. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1968, **QE-4**(10): 568~575
- [4] 马兴孝, 孔繁敖, 激光化学, 合肥, 中国科技大学出版社, 1990年, 21~26
- [5] 钱学森, 物理力学讲义, 北京, 科学出版社, 1960年, 48~50

Effect of Inhomogeneity Medium on High Intensity Laser Propagation

Liu Shilin Dai Jinghua Ma Xingxiao

(Department of Chemical Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026).

(Received 7 March 1994; revised 4 May 1994)

Abstract The medium effects of thermal lens, linear absorption coefficients, absorption saturation, and flow directions on high laser propagation have been studied with the background of laser applications in photochemical engineering. A set of equations based on a simple model is proposed to describe the light field. The temperature distributions, light behaviors, and changes of laser intensity distribution in the absorption medium are obtained for different cases.

Key words intense laser, absorption saturation, non-linear dispersion, propagation.