

偏振组合在双折射光纤受激四光子混频中的作用

杨天龙

(上海科学技术大学光纤研究所)

薛燕陵

(东南大学物理系)

提要: 本文根据三阶非线性极化率对光场偏振态的依赖关系, 指出存在于受激四光子混频中各个波偏振状态之间的6种组合关系; 应用耦合理论, 分析了偏振组合在双折射相位匹配中的作用, 计算了受激四光子混频的频移, 解释了实验中多种模式组合下的“双线”输出及频移随双折射的变化。

关键词: 受激四光子混频, 相位匹配, 双折射

Effect of polarization combination on stimulated four-photon mixing in birefringence fibers

Yang Tianlong

(Shanghai University of Science and Technology, Shanghai)

Xue Yanling

(Southeast University, Nanjin)

Abstract: In terms of the dependence of non-linear susceptibility to polarization states of light fields, six kinds of combination existing among the above polarization states in stimulated four-photon mixing are put forward, analysis of the effect of polarization combination on the birefringence phase-matching is given according to the coupling theory and the frequency shifts for stimulated four-photon mixing in bended fibers are calculated. The explanation for “double-line” radiation under these modal combinations and the frequency fluctuation with the birefringence is given.

Key words: stimulated four-photon mixing, phase-matching, birefringence

一、引言

受激四光子混频过程中, 两个泵浦光子(P_1, P_2) 转换成一个 Stokes 光子(s) 和一个 anti-stokes 光子(α)。作为一个非自相位匹配过程, 它要求动量守恒。波导中, 为达到相位匹配, 通常(i)选取材料的零色散点; (ii)利用多模光纤的波导色散; (iii)双折射相匹配。单模光纤中, 双折射失配可直接抵消材料色散的影响, 从而大大展宽了实现参量混频的泵浦波长范围。实验表明, 在椭圆、弯曲、应力光纤中已实现了双折射相匹配的受激四光子混频^[1~3]。本文根据三阶非线性极化率对光场偏振态的依赖关系, 指出受激四光子混频中各个波偏振状态之间存在

的 6 种组合关系；根据耦合理论，写出了双折射光纤中非线性过程传播常数的严格表达式，分析了双折射相匹配的过程，解释了实验中发现的“双线”等现象。

二、实 验

研究弯曲光纤中受激四光子混频的实验装置示于图 1。调 Q Nd:YAG 激光器输出的光经

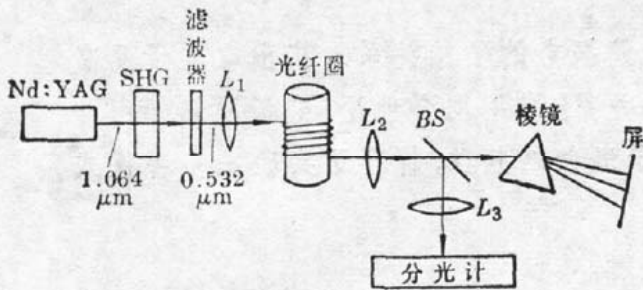


图 1 实验装置示意图

KDP 晶体倍频及滤波片后成为波长 $0.532 \mu\text{m}$ 的线偏振光。将具有阶跃型折射率分布的光纤绕制成不同半径的光纤圈，其中弯曲部分长 4m 。归一化频率 $V=5.42$ ，可能的线偏振传输模为 LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 、 LP_{02} 和 LP_{31} 。出射光分为两路，以进行频谱分析和模斑分析。除了具有理想光纤中受激四光子混频在模式、强度等方面的某些特征外^[4]，本实验还具有下列特点：(1) 泵浦光沿光纤慢轴偏振，每一级散射谱上出现单一频移的谱线——“单线”(图 2)；(2) 泵浦光沿任意方向偏振，在多种模式组合下同一级散射谱上出现

谱线——“单线”(图 2)；(2) 泵浦光沿任意方向偏振，在多种模式组合下同一级散射谱上出现

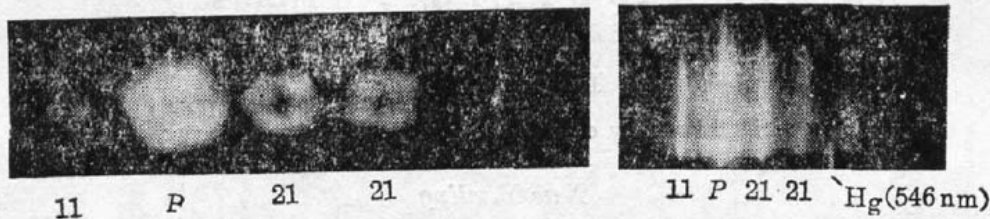


图 2 受激四光子混频辐射谱(泵浦光沿弯曲光纤慢轴偏振)

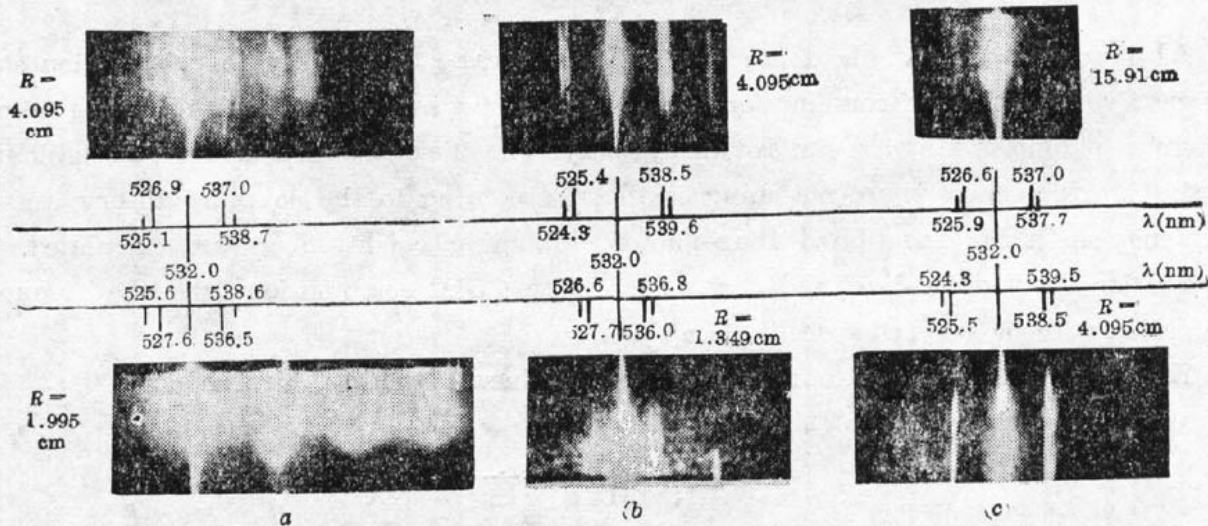


图 3 受激四光子混频辐射谱(泵浦光沿任意方向偏振)

- (a) 频移随 R 减小而减小($LP_{01} \sim LP_{11}$ 模对)；
- (b) 频移随 R 减小而减小($LP_{11} \sim LP_{21}$ 模对)；
- (c) 频移随 R 减小而增大($LP_{21} \sim LP_{31}$ 模对)



图 4 一级 anti-Stokes 谱上一对频移不同、瓣向分别为水平和垂直的 LP_{11} 模

不同频移的“双线”(图 3)。图 4 显示出一级 anti-Stokes 谱上出现一对瓣向分别为水平和垂直、且频移不同的 LP_{11} 模; (3) 随着弯曲加剧, 双折射增大, 某些模式组合下频移增大($LP_{21} \sim LP_{31}$ 模对)。另一些模式组合下频移则减少($LP_{11} \sim LP_{21}$ 、 $LP_{01} \sim LP_{11}$ 模对)(图 3)。

三、双折射相匹配中的偏振组合

光纤内双折射引起光场的偏振分量(x, y)失谐。根据一阶微扰理论, 双折射单模光纤中受激四光子混频过程各个波分量的耦合方程为

$$\frac{dA_l^{\nu'}}{dz} + j\tilde{\beta}_l A_l^{\nu'} = -j \sum_{\nu} k_{l\nu\nu'} A_l^{\nu'} - jN_l^{\nu'} \quad (l = P_1, P_2, s, a; \nu, \nu' = x, y)。 \quad (1)$$

$A_l^{\nu'}$ 表示频率为 ω_l 波场的 ν 分量的展开系数。耦合系数 $k_{l\nu\nu'}$ 由纯粹反映双折射效应的固有耦合 $c_{l\nu\nu'}$ 及表示本征模对 LP 模修正的剩余耦合 $\tilde{c}_{l\nu\nu'}$ 组成:

$$k_{l\nu\nu'} = c_{l\nu\nu'} + \tilde{c}_{l\nu\nu'} \quad (2)$$

$$c_{l\nu\nu'} = \omega_l \int_{A_{\infty}} \psi_l \psi_l^* \mathbf{i}_{\nu'} \cdot (\epsilon_t - \epsilon) \cdot \mathbf{i}_{\nu} ds \quad (3)$$

$$\tilde{c}_{l\nu\nu'} = -\frac{1}{\tilde{\beta}_l} \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} \int_{A_{\infty}} \tilde{n}_l \psi_l^2 \mathbf{i}_{\nu'} \cdot \left[\nabla_t \nabla_t - \nabla_t \left(\frac{1}{\epsilon_0 \tilde{n}_l^2} \right) \nabla_t \cdot \epsilon_t \right] \cdot \mathbf{i}_{\nu} ds \quad (4)$$

其中 ϵ_0, μ_0 为真空介电常数和磁导率; ϵ_t 为双折射光纤的横向介电张量; $\epsilon_t, \tilde{n}_l, \tilde{n}_z, \psi_l$ 分别指圆对称参考光纤的横向介电张量、横向折射率、纵向折射率以及基模; $\nabla_t = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y}$; \mathbf{i}_{ν} 记为单位方向矢量; A_{∞} 指无限大横截面; “*”表示复共轭。只有当 $\nu = \nu'$ 时, $k_{l\nu\nu'}$ 才表示耦合对传播常数的贡献。根据上述耦合理论, 双折射光纤中非线性过程的传播常数可用参考光纤中 LP 模的传播常数 $\tilde{\beta}_l$ 及非线性影响 $\delta k_{l\nu}$ 严格表示为

$$\beta_{l\nu} = \tilde{\beta}_l + k_{l\nu\nu} + \delta k_{l\nu} \quad \nu = x, y \quad (5)$$

其中 $\tilde{\beta}_l + \tilde{c}_{l\nu\nu}$ 为参考光纤中本征模的传播常数。

对弱传导波导, (1) 式中非线性耦合项

$$N_l^{\nu'} = \omega_l \int_{A_{\infty}} \mathbf{e}_{l\nu}^* \cdot \mathbf{P}_{ll}^{NL} ds \quad (6)$$

$\mathbf{e}_{l\nu}$ 指基模 ν 分量的横向模场。非线性极化强度 $\mathbf{P}^{NL} = \chi^{(3)}: \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E}$ 由自相位匹配项和非自相位匹配项组成。其中非自相位匹配项, 对 Stokes 波的耦合方程而言, 即含有诸如 $\chi^{(3)}: \mathbf{E}_{P_1} \mathbf{E}_{P_1} \mathbf{E}_s^*$ 的项; 对 anti-Stokes 波方程而言, 即含有诸如 $\chi^{(3)}: \mathbf{E}_{P_1} \mathbf{E}_{P_2} \mathbf{E}_s^*$ 的项。对泵浦波的耦合方程, $\mathbf{E}_s, \mathbf{E}_a$ 被认为是一阶小量, 类似的项为二阶小量, 因此可忽略。对于 $\chi^{(3)}: \mathbf{E}_{P_1} \mathbf{E}_{P_1} \mathbf{E}_a^*$, 张量元 α_{ijmn} 的下标 j, m, n 决定了电场 $\mathbf{E}_{P_1}, \mathbf{E}_{P_1}, \mathbf{E}_a$ 的偏振取向, 而 i 则决定了(6)式中 $\mathbf{e}_{l\nu}$ 的偏振取向 ν , 也即耦合方程(1)式中当 $l = s$ 时

方程左边所代表的电场 \mathbf{E}_s 的偏振取向。因此, \mathbf{E}_s 耦合方程中四个场的偏振取向的组合示于右表。 P_1, P_2 的同一性决定了独立的偏振组合只有前 6

| | i | ii | iii | iv | v | vi | vii | viii |
|--------------------|---|----|-----|----|---|----|-----|------|
| \mathbf{E}_{P_1} | x | x | y | y | x | x | y | y |
| \mathbf{E}_{P_2} | x | x | y | y | y | y | x | x |
| \mathbf{E}_s | x | y | x | y | x | y | x | y |
| \mathbf{E}_a | x | y | x | y | y | x | y | x |

种。无论 \mathbf{P}^{NL} 中场的排列顺序如何, 无论对应于哪个波的耦合方程, 四个场的偏振组合形式

只可能为前 6 种。忽略非线性对传播常数的影响, 对应于这 6 种偏振组合的相位失配可写为

$$\Delta\beta = \Delta\tilde{\beta} + \Delta\beta_0 = \Delta\tilde{\beta} + \begin{cases} k_{P1xx} + k_{P2xx} - k_{svv} - k_{avv} & \nu = x, \quad \nu' = y \\ k_{P1yy} + k_{P2yy} - k_{svv} - k_{avv} & \nu = y, \quad \nu' = x \\ k_{P1xx} + k_{P2yy} - k_{svv} - k_{avv'} & \nu = y, \quad \nu' = x \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\Delta\tilde{\beta} = \tilde{\beta}_{P_1} + \tilde{\beta}_{P_2} - \tilde{\beta}_s - \tilde{\beta}_a \quad (8)$$

四、受激四光子混频的频移

本文以单模光纤为例, 所以参考光纤中 LP 模的相位失配仅指材料色散一项,

$$\Delta\tilde{\beta} = \Delta\beta_m = -2\pi\lambda_p^3 \frac{d^2n}{d\lambda^2} (\Delta V)^2 \quad (9)$$

其中波数差 $\Delta V = V_P - V_s = V_a - V_P$, λ_P 为泵浦波长。对多模光纤, 还需考虑波导色散 $\Delta\beta_{w_0}$ 对参考光纤模场作高斯近似^[5],

$$\psi_l = \psi_l^0 e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{r}{w_l}\right)^2} \quad (10)$$

W_l 为模场半径。由模场的归一化条件^[6] 为

$$\psi_l^0 = \left[2\pi \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} \tilde{n}_l W_l \right]^{1/2} \quad (11)$$

参考光纤及弯曲光纤横向介电张量分别为

$$\epsilon_t = \begin{bmatrix} \epsilon & 0 \\ 0 & \epsilon \end{bmatrix} \quad \epsilon_t = \begin{bmatrix} \epsilon_x & 0 \\ 0 & \epsilon_y \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据弹性理论, 主轴介电张量为

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \epsilon \left[\left(1 + \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \xi k^2 r_0^2 \right) - \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \eta kx - \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \left(\xi - \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \eta^2 \right) k^2 x^2 + \dots \right] \\ \epsilon_y &= \epsilon \left[\left(1 + \frac{1}{2} \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \eta k^2 r_0^2 \right) - \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \eta kx - \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \left(\frac{\eta}{2} - \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \eta^2 \right) k^2 x^2 + \dots \right] \end{aligned} \quad (13)$$

$\epsilon = \epsilon_0 \tilde{n}_l^2$ 为光纤弯曲前(即参考光纤)的介电常数, l 指各个不同频率的波, k 为弯曲曲率, x 指从光纤圈轴线算起沿曲率方向的距离, r_0 为光纤外径。 $\xi = \frac{1}{2} p_{11} - \sigma p_{12}$, $\eta = -\sigma p_{11} + (1 - \sigma) p_{12}$, 这里 p_{ij} 为光应变张量元, σ 为泊松率。对熔融石英^[7], $\xi = 0.015$, $\eta = 0.204$ 。

忽略 x^2 以上的项, 由(3)、(4)式得到:

$$\begin{aligned} \tilde{c}_{lax} &= \frac{1}{4\tilde{\beta}_l W_l^2} & c_{lax} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{1/2} \omega_l \xi \tilde{n}_l k^2 r_0^2 \\ \tilde{c}_{lyy} &= \frac{1}{4\tilde{\beta}_l W_l^2} & c_{lyy} &= \frac{1}{4} \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{1/2} \omega_l \eta \tilde{n}_l k^2 r_0^2 \\ \tilde{c}_{lxy} &= \tilde{c}_{lyx} = 0 & c_{lxy} &= c_{lyx} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

相对频移 $\frac{\Delta V}{V_P} \ll 1$ 。将上式在泵浦频率附近展开。应用 $\tilde{\beta}_l = \frac{2\pi}{\lambda_l} [\tilde{n}_l - (\Delta n)(1 - b_l)]$, 由(7)、(9)、(2)、(14)式得到: 相位匹配 $\Delta\beta = 0$ 时, 对第(3)、(6)种偏振组合, 受激四光子混频的波数移动可用参考光纤中折射率及色散表示为

$$\begin{aligned}
 (\Delta V_3)^2 &= \frac{2\pi V_P \tilde{n}_P \left(\frac{\eta}{2} - \xi\right) k^2 r_0^2}{2\pi \left(1 + \frac{\xi}{2} \tilde{n}_P^2 k^2 r_0^2\right) \lambda_P^3 \frac{d^2 n}{d\lambda^2} + \frac{\sqrt{2} \lambda_P^4}{4a \tilde{n}_P^2} (1 - b_P) \left(\frac{\Delta n}{\tilde{n}_P}\right)^{3/2} \left(\frac{dn}{d\lambda}\right)^2} \\
 \Delta V_6 &= \frac{\pi \tilde{n}_P^2 \left(\tilde{n}_P + \lambda_P \frac{dn}{d\lambda}\right) \left(\frac{\eta}{2} - \xi\right) k^2 r_0^2}{2\pi \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\eta}{2} + \xi\right) \tilde{n}_P^2 k^2 r_0^2\right] \lambda_P^3 \frac{d^2 n}{d\lambda^2} + \frac{\sqrt{2} \lambda_P^4}{4a \tilde{n}_P^2} (1 - b_P) \left(\frac{\Delta n}{\tilde{n}_P}\right)^{3/2} \left(\frac{dn}{d\lambda}\right)^2}
 \end{aligned} \tag{15}$$

而对其余偏振组合, 无解。这里 Δn 为参考光纤芯和包层折射率差, b_l 为波 l 的归一化传播常数, a 为光纤芯径。

五、讨 论

上述结果表明, 对弯曲单模光纤, 弯曲诱致双折射的强制作用使相位匹配与各个波的偏振状态有关。只有对偏振组合 (y, y, x, x) 和 (x, y, y, x) , 材料色散和双折射的影响才能抵消。任意泵浦光可视为由 x, y 两偏振分量组成, 因此可同时在这两种偏振组合下实现相匹配, 受激四光子混频每一级散射谱上可能同时出现两条频移不同的谱线——“双线”。但若泵浦光沿 y 方向偏振, 只能于前者实现相匹配, 频谱上只出现单频移的谱线——“单线”。若沿 x 方向偏振, 则不可能实现相匹配的受激四光子混频。

第(1)、(4)种偏振组合中, 所有波同方向偏振, 双折射不起作用, (7)式中双折射失配 $\Delta\beta_b \approx 0$ 。(14)式表明, $k_{ixx} < k_{iyx}$, 即弯曲光纤快轴 x 、慢轴 y 。比较第(1)种偏振组合, 得到对第(2)种偏振组合 $\Delta\beta_b < 0$ 。而正常色散区材料色散 $\Delta\beta_m < 0$, 所以相匹配也不可能实现。但第(3)种偏振组合 $\Delta\beta_b > 0$, 则可能达到相匹配。类似的分析可用于第(5)、(6)种偏振组合。多模光纤中, 波导色散使满足相匹配的偏振组合数增加, 频谱上可能出现“多线”。实验中, 在多种模式组合下观察到“双线”。

简写(15)式为

$$(\Delta V_3)^2 = \frac{c_1 k^2}{c_2 + c_3 k^2} \quad \Delta V_6 = \frac{c_4 k^2}{c_5 + c_6 k^2} \tag{16}$$

$c_i > 0 (i=1 \sim 6)$, $\Delta V_3, \Delta V_6$ 是增函数, 所以弯曲愈甚, 频移愈大。这与 Shibata^[2] 的结果一致。其实 ΔV_3 对应于入射泵浦光 y 分量导致的受激发射频移。如果不考虑 c_2, c_3 中剩余耦合部分及固有耦合中的材料色散, 而把材料色散都归并于(9)式中的 $\Delta\beta_m$, 则有

$$\Delta V_3 \cong \frac{2\pi V_P \tilde{n}_P \left(\frac{\eta}{2} - \xi\right) k^2 r_0^2}{2\pi \lambda_P^3 \frac{d^2 n}{d\lambda^2}} \tag{17}$$

这就是 Shibata 的经验公式。双折射光纤中非线性耦合过程在偏振组合尤其是偏振组合与模式组合的双重作用下是一个极为复杂的过程, 某些模式配对下频移成为曲率的减函数, 甚至出现更为复杂的现象都是可能的。

参 考 文 献

- 1 R. H. Stolen *et al.*, *Opt. Lett.*, **6**(5), 213(1981)
- 2 N. Shibata *et al.*, *Opt. Lett.*, **10**(3), 154(1985)
- 3 K. Kitayama *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **41**(4), 322(1982)
- 4 R. H. Stolen, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-11**(3), 100(1975)
- 5 A. W. Snyder, *Proc. IEEE*, **69**(1), 6(1981)
- 6 J. Qian, W. Huang, *J. of Lightwave Technology*, **LT-4**(6), 619(1986)
- 7 D. E. Gray, *American Institute of Physics Handbook* (Mcgraw-Hill, 3rd Ed.), 6~236

食管癌梗阻的激光治疗

食管癌是我国常见恶性肿瘤之一,就诊中 2/3 病例已属晚期,失去手术机会,其中 1/2 由于梗阻造成不能饮食而严重危及生命,如何疏通梗阻,恢复患者正常饮食通道,改善全身状况,便于为进一步治疗创造条件,我们自 1987 年 2 月至 1988 年 12 月对食管,贲门癌梗阻患者 79 例进行 YAG 激光疏通术,达到满意的疏通效果。

我们采用的治疗设备有: Nd³⁺:YAG JY-B 型激光器,光纤末端功率 >80 W,纤维上消化道镜:双通道上消化道镜与 Olympus E7-2 型上消化道镜;直径为 400 μm 的石英导光纤维。

79 例患者中,男 66 例,女 13 例,年龄最小 50 岁,最大 84 岁。病变狭窄长度最短 2 cm,最长 6.5 cm。术前有 56 例完全闭锁,不能饮水,23 例闭锁孔径 <0.5 cm,能饮流质。

治疗时,先从镜内将病变观察清楚,结合 X 线片确定激光照射及疏通方向,用连续波功率 25~30 W 的 YAG 激光边辐照边吸引,在视野清晰状态下继续前进。每周治疗一次为 1 疗程,一次照射最短为 4s,最长累积 20s,视病情疏通情况再计划下次疗程。

术后禁饮食 6 小时,然后进温流质饮食,24 小时后视症状变化更改饮食。术毕无需用抗菌素及止血药物,末次治疗完成后吞钡摄 X 片复查。

根据术后饮食及 X 线片复查情况,79 例均有改善,其中 38 例有所好转,31 例有较大改善,10 例有明显改善,从原来的不能饮水而至能进普通饮食。

激光疏通梗阻性食管、贲门癌是以热能为主的治疗方法。虽然利用高功率激光治疗可获得较高疗效,但有穿孔率高的缺点。我们用中功率 30 W 激光,每次疏通 1~2 cm,重复多次治疗,同样可以达到疏通的目的,无一例失败,亦未发生穿孔、出血等并发症。

治疗时,掌握辐照方向相当重要,例如偏侧性生长应辐照病变侧,对伴有溃疡者,对溃疡面应尽量减少辐照次数,以免穿孔。辐照光应尽量与脏器管腔平行,边汽化边前进,切忌与食管方向成角,以免造成食管穿孔及其他并发症。

应用双通道上消化道镜可使手术操作更方便,因为这种系统既可通过光纤将激光引到病区进行辐照,又可通过另一孔道收去烟雾或清除分泌物。

治疗前对导光纤维应仔细检查有无折裂、漏气现象,石英纤维外膜刮应彻底,不能有任何残留。

(山东省肿瘤防治研究院 吴思思 冯若晴 陈增谦 魏树臻

济南市第五人民医院 唐秀民 1989 年 2 月 23 日收稿)