

有机环形光纤中二次谐波产生的研究

孙小菡 沈顺元 张明德 沈光骏
(东南大学电子工程系, 南京 210018)

摘 要 本文从经典电磁理论出发, 分析了有机环形光纤中二次谐波产生(SHG)的转换效率, 着重讨论利用环形光纤中模式的色散特性实现相位匹配等问题. 报道了采用 LB 膜方法, 制成半花菁环形光纤, 由高灵敏度光检测计测出在强泵光($1.06 \mu\text{m}$, YAG 激光)作用下该光纤中的二次谐波产生的实验结果.

关键词 有机环形光纤, 二次谐波产生, LB 膜.

1 引 言

人们已充分认识到, 光波导的强聚光性, 低损耗性以及可提供良好相位匹配的模式特性, 是产生光波非线性相互作用的理想结构^[1]. 采用具有大非线性二阶或三阶极化系数的材料制成特殊的光纤, 将可能构成高性能非线性全光纤元器件, 成为新一代光纤通信系统, 光纤传感器以及光计算机的关键元件.^[2]

研制这种特殊光纤的关键在于良好的非线性材料、制作手段及波导结构分析. 人们已经发现, 某些有机材料具有比 LiNbO_3 等无机材料更高的二阶非线性极化率 $\chi^{(2)}$, 其中最典型的便是半花菁^[3]. 在纯石英光纤纤芯外沉积数层半花菁膜, 便形成了有机环形光纤. 有机层可传输导波膜, 在强泵光的作用下, 便可出现二次谐波. 本文采用耦合模理论, 分析了有机环形光纤中二次谐波产生的转换效率, 从环形光纤中各导波模的色散特性出发, 讨论了相位匹配等问题. 采用 LB 膜方法, 制成半花菁环形光纤. 以工作波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 、YAG 激光器作为泵光源, 采用自制的高灵敏度光检测计, 测出了这种光纤中的二次谐波.

2 理论分析

在纯石英光纤纤芯外沉积半花菁膜后, 便形成如图 1 所示的光纤截面和折射率分布. 由于半花菁的折射率 n_e 大于石英折射率 n_1 , 有机膜层也可作为导波区, 所以, 称此种光纤为有机环形光纤. 按照光波导模式理论^[4]和文献^[5]中的分析, 有机环形

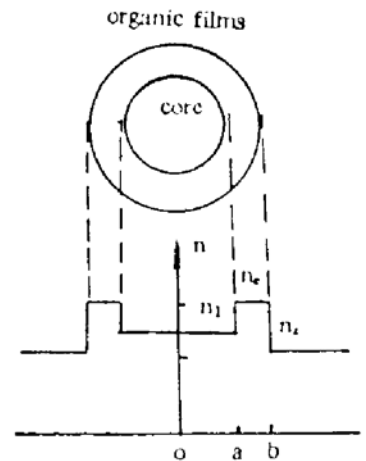


Fig. 1 Sketches of cross section and refractive index profile of the organic annular fiber

光纤中导波模可以分成两类,一类模式仅在有机层中传输,传播常数满足条件 $n_{1k} < \beta < n_{2k}$; 另一类在芯层和有机层中传输, $n_{2k} < \beta < n_{1k}$. 两类导波模分别用 LP'_{mn} 、 LP_{mn} 表示, LP'_{mn} 模在弱导近似下的色散方程为:

$$\frac{pJ'_m\left(\frac{pb}{a}\right)K_m\left(\frac{wb}{a}\right) - wK'_m\left(\frac{wb}{a}\right)J_m\left(\frac{pb}{a}\right)}{wK'_m\left(\frac{wb}{a}\right)Y_m\left(\frac{pb}{a}\right) - pK_m\left(\frac{wb}{a}\right)Y'_m\left(\frac{pb}{a}\right)} = \frac{pJ'_m(p)I_m(u) - uJ'_m(u)I_m(p)}{uI_m(u)Y_m(p) - pI_m(u)Y'_m(p)} \quad (1)$$

式中

$$u^2 = a^2(\beta^2 - n_1^2k^2), \quad w^2 = a^2(\beta^2 - n_2^2k^2); \quad p^2 = a^2(n_0^2k^2 - \beta^2)$$

LP_{mn} 模的色散方程则为

$$\frac{pJ'_m\left(\frac{pb}{a}\right)K_m\left(\frac{wb}{a}\right) - wK'_m\left(\frac{wb}{a}\right)J_m\left(\frac{pb}{a}\right)}{wK'_m\left(\frac{wb}{a}\right)Y_m\left(\frac{pb}{a}\right) - pK_m\left(\frac{wb}{a}\right)Y'_m\left(\frac{pb}{a}\right)} = \frac{pJ'_m(p)J_m(u) - uJ'_m(u)J_m(p)}{uJ'_m(u)Y_m(p) - pJ_m(u)Y'_m(p)} \quad (2)$$

(2)式中 $u^2 = a^2(n_1^2k^2 - \beta^2)$, w, p 定义如上.

二次谐波产生是三波相互作用过程,在有机环形光纤中这一过程发生在有机层内.按照微扰耦合理论,可以认为这一非线性过程体现在有机层内各导波模式的纵何相互作用上,且满足缓变幅度条件.那么,任一导波模幅度系数 $A_{ms}(z)$ 便满足下列方程^[5]:

$$\frac{dA_{ms}(z)}{dz} \exp[j(\omega t - \beta z)] = \frac{j\mu_0}{2\beta B} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \iint_s P'_s E_{ms}(r, \theta) r dr d\theta \quad (3)$$

式中 P'_s 为有机层内的非线性极化,这里仅考虑二阶非线性极化, $P'_s = 2d_{sjk}E_jE_k$, d_{sjk} 为二阶非线性系数; μ_0 为磁导率; E_{ms} 为任一导波模在无非线性扰动时的场解; $B = \iint_s E_{ms} r dr d\theta$; 积分号的下标“s”表示有机层截面.

二次谐波产生时有机环形光纤中存在着谐波(频率 $\omega_1 = 2\omega$)和基波(频率 $\omega_2 = \omega$).每一种电磁波都由若干导波模组合而成.因而,有机环形光纤内的二次谐波产生现象可看成基波与谐波对应的导波模相互作用的结果.从(3)式出发可以求出任一基波导波模和谐波导波模间相互作用转换效率,即二次谐波转换效率

$$\eta(z) = \begin{cases} \omega^2 d_s^2 z_1 z_2 K_1 K_2 \frac{P_\omega(0)}{\iint_s |E_{m\omega}^{(2)}|^2 r dr d\theta} z^2 & \Delta\beta = 0 \\ \omega_1^2 d_s^2 z_1 z_2 K_1^2 \frac{P_\omega(0)}{\iint_s |E_{m\omega}^{(2)}|^2 r dr d\theta} \frac{\sin^2(\Delta\beta z/2)}{(\Delta\beta z/2)^2} z^2 & \Delta\beta \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, d_s 为有机层有效非线性系数; $\Delta\beta = \beta_1 - 2\beta_2$, β_1, β_2 分别为谐波、基波导波模的传播常数; 上标“(1)、(2)”分别表示基波、谐波对应的值; $P_\omega(0)$ 为相互作用始端基波的功率, $P_\omega(0) =$

$$\frac{\beta_2}{\omega\mu_0} \iint_s [A_{m\omega}^{(1)}(0)]^2 |E_{m\omega}^{(2)}|^2 r dr d\theta; \quad Z_{1,2} = \frac{\omega_{1,2}\mu_0}{\beta_{1,2}}; \quad K_{1,2} = \frac{\iint_s E_{m\omega}^{(1)} [E_{m\omega}^{(2)}]^2 r dr d\theta}{\iint_s [E_{m\omega}^{(1),(2)}]^2 r dr d\theta} \text{ 为耦合系数.}$$

从(4)式可见, $\eta(z)$ 取决于如下几个因素:

1) 与 d_s^2 成正比; 2) 随有机层电磁波功率密度的上升而增加; 3) 相位匹配时 ($\Delta\beta = 0$), 与

相互作用长度成正比, 相位失配时 ($\Delta\beta \neq 0$), 受失配因子 $\sin^2(\frac{\Delta\beta z}{2})/(\frac{\Delta\beta z}{2})^2$ 的影响随 z 呈周期变化, 且数值大大降低. 比较(4)式的上、下两式可知, 失配因子是影响 $\eta(z)$ 的关键, $\Delta\beta/\beta_2 \geq 10^{-5}$ 时, $\eta(z)$ 比相位匹配时低几个数量级.

导波模的色散特性可使基波和谐波的一些模式自动满足相位匹配条件, 匹配的模式数 N , 越多, $\eta(z)$ 也就越高. 由(1)、(2)两式, 可以找出相位匹配的模式. 采用逐步搜索法和二分法计算得出 LP_{mn} 类模 N , 随纤芯半径 a , 有机层厚 t_f 和 n_e 的变化, 图 2 示出结果. 可见, N , 与 t_f 、 a 成比, 与 n_e 呈多值关系, 在 n_e 为某一适当数值时为最大.

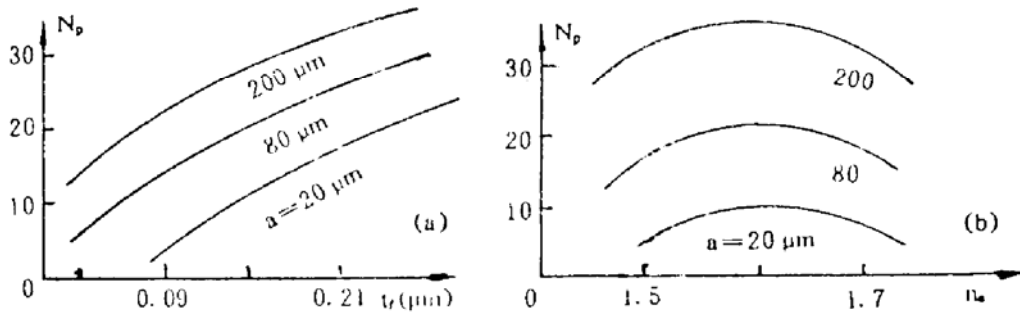


Fig. 2 Variation of the number N_p phase matching modes with respect (a) film thickness t_f and (b) index of film n_e as well as core radius a , where $n_1 = 1.458$, $n_2 = 1.3$, $\lambda_1 = 1.06 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.53 \mu\text{m}$

取任一对相位匹配模式由(4)式可得出 $\eta(z)$. 然后, 改变光纤的结构参量(如 a)使该对模式不再匹配, 再计算 $\eta(z)$. 这样, 既可以得出 η 与相互作用长度 z 的关系, 又能对比相位匹配和失配的情况. 图 3 为基波 LP_{13} 模和谐波 LP_{22} 模相互作用结果. 计算时取 $P_{\omega}(0) = 1 \text{ mW}$, $d_e = 1.4 \times 10^{-22} (\text{c/V})^2$, $t_f = 0.15 \mu\text{m}$, $n_e = 1.7$, $a = 80 \mu\text{m}$ ($\Delta\beta = 0$) 及 $120 \mu\text{m}$ ($\Delta\beta \approx 0$). 可见, 相位匹配时, $z = 3 \text{ cm}$, η 已接近 0.1%; 而相位失配时, η 下降了 2 至 3 个数量级, 且随 z 呈多值变化.

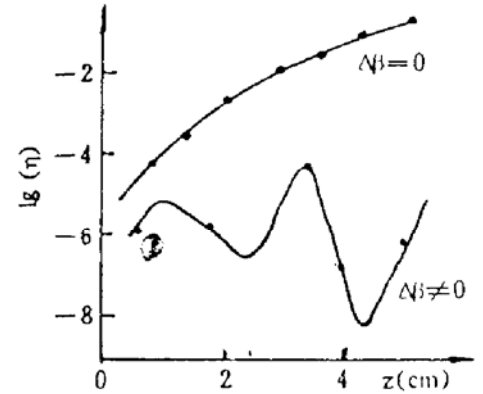


Fig. 3 Conversion efficiency η of SHG in the organic annular fibers versus interaction length z

3 实 验

3.1 有机环形光纤的制作

把纤芯直径为 200 μm 的纯石英光纤的一端去除包层, 经去离子水、无水乙醇、丙酮超声清洗, 在氮气中晾干. 由于单根光纤表面积太小, 沉积时的状态不能在面积上明显地显示出来, 故取 50 根晾干的裸光纤置于事先准备好的模板上. 在 $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 时, 将 $1.0 \times 10^{-3} \text{ M}$ 的半花菁/氯仿溶液铺展在亚相为超纯水 (Mili-Q) 的 LB 膜槽上 (设备型号为 HBM-HT, Japan), 五分钟后, 膜压至 28 dyn/cm, 在此膜压下提膜, 速度为 0.05 mm/s, 转移比见下表:

Transfer ratio	up 1	down 1	up 2	down 2	up 3	down 3	up 4	down 4	
deposition	0.81	0.20	0.90	0.10	0.95	0.05	0.98	0.06

从而可知, 在光纤外表面上沉积的有机膜基本上为 Z 型膜, 此结构满足非中心对称的非线性光学条件. 在长 5 cm 的光纤上, 共沉积了 50 层 Z 型膜, 晾干后待用.

3.2 二次谐波产生的测试

图 4 为有机环形光纤二次谐波产生测试系统框图. 调 Q、YAG 脉冲激光器输出 $1.06 \mu\text{m}$ 波长的基波光, 最大输出能量 300 mJ , 采用 $1.06 \mu\text{m}$ 的干涉滤光片滤除氙灯光, 由 $40\times$ 显微镜物镜聚焦后输入到光纤中, 在光纤出射端, 由绿色玻璃及 $0.53 \mu\text{m}$ 的干涉滤光片除去基波光, 硅光电二极管探测绿色倍频光, 并送入示波器观察. 干涉滤光片的透过率均高于 60% .

光电检测及信号处理部分由硅光电二极管、前置放大器和主放大器构成. 前置级采用低噪声高频管 1907 构成三级互阻抗放大器; 主放大器采用 MC1733. 增益可调. 传递滞后时间小, 频带宽, 增益达到 60 dB , 带宽为 80 MHz .

仔细调节光纤输入端与显微镜物镜焦点之间的位置, 使光源与光纤的耦达到最佳, 获得了波长为 $0.53 \mu\text{m}$ 的倍频光, 图 5 为倍频光波形. 测出普通光纤(即不带半花菁有机层的纯石英光纤)时基波光输出, 可知有机环形光纤二次谐波产生转换效率达 10^{-5} . 这与上节结果有一定差异. 原因在于理论分析时只考虑有机层内满足相位匹配条件的模式间相互作用, 而实测的基波光强则是从纤芯出射的, 从纤芯转入有机层并参与非线性相互作用的基波光强也只有总光强的 1% 以下.

实验测出不同基波光强时所得到的最大二次谐波光强, 绘成如图 6 所示的曲线. 图中横坐标为激光器输出光能量 E_0 , 它与二次谐波光强基本上呈线性关系, 这与(4)式是一致的.

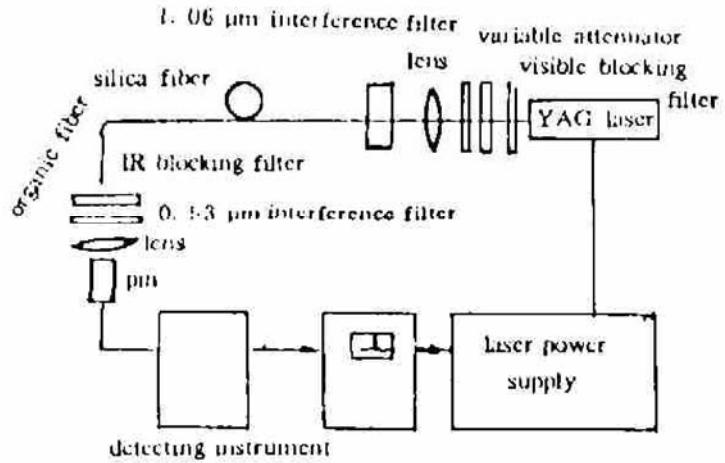


Fig. 4 Experiment arrangement for SHG measurement on organic annular fiber

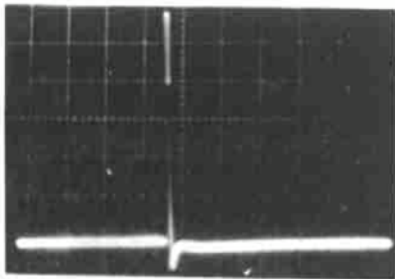


Fig. 5 Appearance of SHG signal from organic annular fibers

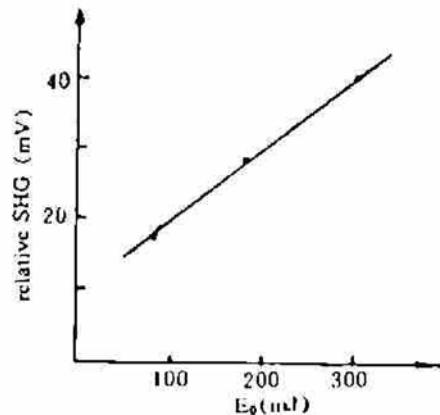


Fig. 6 Relative SHG intensity as a function of the light beam energy from YAG laser

4 结 论

本文从经典电磁理论出发, 推出了有机环形光纤中二次谐波产生转换效率的表达式. 此式

清晰地表征了有机层非线性系数、基波功率, 相互作用长度及相位匹配因子对 $\eta(z)$ 的影响, 适用于任一波导结构的二次谐波产生分析. 有机环形光纤导波模的色散特性可使较多的导波模自动满足相位匹配条件. 匹配模式数越多, $\eta(z)$ 也就越高. 文中列出的匹配模式数随芯径, 有机层厚度和折射率变化关系对设计制作有机环形光纤有指导意义.

本文表明, 采用 LB 制膜技术, 将具有高 $\chi^{(2)}$ 的半花菁直接沉积在普通光纤的纤芯上, 可方便地制成有机环形光纤. 在强基波光的作用下, 测出了有机环形光纤中二次谐波信号. 这说明有机环形光纤是产生光波非线性相互作用的理想结构, 便于进一步研制非线性光纤元件.

参 考 文 献

- [1] G. I. Stegeman, E. M. Wright, N. Finlayson *et al.*, Third order nonlinear integrated optics. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(6): 953~970
- [2] W. Sohler Nonlinear integrated optics, in new direction in guided wave and coherent optics, The Hague, The Netherlands; Martinus Nijhoff, D. B. Ostrowsky and E. Spitz, Eds. (NATO ASI series, 78), 1984, 449~479
- [3] L. M. Hayden, S. T. Kowel, M. P. Srinivasan, Enhanced second harmonic generation from multilayered langmuir blodgett films of dye. *Opt. Commun.*, 1987, **61**(5): 351~356
- [4] A. W. Snyder, *Optical waveguide theory*, New York, Chapman and Hall Ltd. 1983, : 205~335
- [5] 孙小菡, 金梅, 有机包层光纤的二阶非线性效应. *东南大学学报*, 1990, **20**(4): 60~66

Second-Harmonic Generation in the Organic Annular Fibers

Sun Xiaohan Shen Shunguan Zhang Mingde Shen Guangjun

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210018)

(Received 26 April 1993)

Abstract In this paper the conversion efficiency of second-harmonic generation (SHG) in the organic annular fiber is analysed based on classical electromagnetic theory. The phase matching, which can be got by the dispersion of guided modes in the annular fibers, is described in some detail. The hemicyanine annular fiber is fabricated by using LB film technique. SHG is measured by the photodetecting instrument with high sensitivity when intense 1.06 μm pump pulses from a Q-switched YAG laser propagates through the fiber.

Key words organic annular fibers, second-harmonic generation (SHG), Langmuir-Blodgett (LB) films.