

全息光栅光谱烧孔系统和材料特性的研究*

翟金会 阮玉

李再光

(华中理工大学光电子系, 武汉 430074) (激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘 要 建立了全息光栅光谱烧孔技术中, 系统的存储密度、读出信噪比和材料特性、读写条件关系的数理模型, 计算机模拟定量分析得到了最佳材料特性参量空间。研究表明, 全息光栅光谱烧孔技术可放宽系统对材料特性的要求, 将为烧孔材料研究提供新的理论依据。

关键词 光谱烧孔, 激光诱导全息光栅技术, 烧孔材料特性。

1 引 言

光谱烧孔数据存储是一种新的光存储机理, 它将使存储密度提高 $10^3 \sim 10^4$ 倍, 引起了人们极大的兴趣。目前国内外研究者正致力于寻找一种理想的烧孔材料^[1,2], 利用激光诱导光物理或光化学反应, 在烧孔材料上记录一串频域光谱孔, 通过探测透射光谱得到烧孔信息, 以实现超高密度数据存储。但系统要求调谐激光束以聚焦微光斑 ($d < 10 \mu\text{m}$)、在极短时间内 ($t_w = 30 \text{ ns}$) 完成烧孔和读出信息, 这对材料特性和读写条件提出了严格的要求, 不易找到满足条件的材料^[3]。在文献[4]中, 作者分析了用激光诱导全息光栅技术实现光谱烧孔的原理及系统结构。本文将建立系统特性与材料特性、读写条件关系的数理模型, 分析全息技术对光谱烧孔的影响, 用数值计算方法定量分析得到最佳材料特性的参量空间。

2 全息光栅光谱烧孔系统特性与材料特性关系的数理模型

利用激光诱导全息光栅技术读写光谱烧孔, 光谱孔将以全息光栅形式存在^[5], 表现为吸收率和折射率的调制, 信息可直接以二维图象方式实现并行存取。系统特性主要以存储密度、读出信噪比和读写速度来衡量。系统存储密度依赖于频域多重度 f_w , 而 f_w 主要取决于单幅全息光栅的光谱宽度。以吸收率和折射率调制的光栅光谱烧孔, 其全息衍射效率为^[4]:

$$\eta(\omega) = \exp[-2\alpha_0(\omega)d/\cos\theta] \frac{\alpha_1(\omega_0)d}{2\cos\theta} \frac{(\Gamma/2)^2}{(\omega_0 - \omega)^2 + (\Gamma/2)^2}, \quad (1)$$

式中 $\alpha_0(\omega)$, $\alpha_1(\omega)$ 为吸收率调制 α 的傅里叶级数展开式前两项, d 为记录介质厚度, 2θ 为两记录光夹角, ω_0 为烧孔光频率, Γ 为光谱烧孔谱宽。而忽略电声耦合效应的影响^[1], 光谱烧孔主

* 国防科技预研基金资助。

收稿日期: 1993年6月21日; 收到修改稿日期: 1993年10月21日

要表现为零声子吸收谱线，烧孔谱宽为：

$$\Gamma = \Gamma_0(2 + 3t_w/7\pi t_b), \quad (2)$$

式中 $t_b = \Gamma_0/\sigma\eta I_w$ 为基态上对应于能量 $h\omega_0$ 的光活性分子被全部激发的时间，称为漂白时间^[1]， Γ_0 为零声子均匀吸收谱线宽度， I_w 为烧孔光强， t_w 为烧孔时间， η 为激发态上光活性分子发生光化学反应生成稳定物的概率， σ 为基态的吸收截面。为提高系统可靠性，降低误码率，要求较高的读出信噪比。假设读出时噪声主要为探测器的散粒噪声，则单幅全息光栅的读出信噪比为^[1]：

$$SNR = (\eta_0 I_R A t_R/2)^{1/2} H \sigma N_{ol}/\cos\theta \exp(-\sigma N_{ol}/2 \cos\theta), \quad (3)$$

式中 η_0 为探测器量子效率， I_R 为读出光强， A 为读出光斑面积， N_{ol} 为记录介质浓度-厚度因子， H 为光栅光谱烧孔的光谱深度。从式中知信噪比 SNR 正比于孔深 H ，而 H 与整个光化学反应过程有关。图 1 表示了烧孔材料的能级跃迁， σI_w 为跃迁几率， Γ_c 为衰减概率，从基态 0 激发跃迁到激发态 1 上的光活性分子很快渡越到亚稳态 S ，并以概率 η 发生光化学反应，激发跃迁到稳态 T 。其速率方程表示如下：

$$\begin{aligned} \dot{N}_0 &= -\sigma I_w N_0 + \Gamma_c N_1, & \dot{N}_1 &= \sigma I_w N_0 - \Gamma_c N_1 - \eta \Gamma_c N_1, \\ N_0(t=0) &= 1, & N_1(t=0) &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

假设 $\eta \ll 1$ ，并忽略电声耦合影响，可以解得基态和激发态上的光子数 N_0 、 N_1 随烧孔时间 t 变化的表达式：

$$N_0(t) = \exp[-\sigma I_w \eta \Gamma_c t / (\sigma I_w + \Gamma_c)] - N_1(t), \quad (5)$$

$$N_1(t) = \frac{\sigma I_w}{\sigma I_w + \Gamma_c} \left\{ \exp\left(-\frac{\sigma I_w \eta \Gamma_c t}{\sigma I_w + \Gamma_c}\right) - \exp[-(\sigma I_w + \Gamma_c)t] \right\}. \quad (6)$$

经过 t_w 时间曝光后，烧孔深度为：

$$\begin{aligned} H &= \Delta N/N_0 = 1 - N_0(t \rightarrow \infty) \\ &= 1 + \left(\frac{\eta \sigma I_w}{\sigma I_w + \Gamma_c} - 1 \right) \exp\left(-\frac{\sigma I_w \eta \Gamma_c}{\sigma I_w + \Gamma_c} t_w\right) - \frac{\eta \sigma I_w}{\sigma I_w + \Gamma_c} \exp[-(\sigma I_w + \Gamma_c) t_w]. \end{aligned} \quad (7)$$

3 分析与讨论

在串行存取频域光存储中，为提高系统性能要求在极短的时间内 ($t_R = t_w = 30$ ns)，以聚焦微光斑存取，这不但对系统设计提出很高要求，而且对材料特性提出严格要求。全息光栅光谱烧孔则能很好地改善读写光斑直径和读写时间，信息的存取以全息图形式实现，读出光斑直径 $d = 1$ mm，每次存取的图象信息容量可达 10^6 bits，所以放宽读写时间到 100 ns，也能达到 1 GBPS 的数据传输率，并能很好地改善材料特性和读出光强的参量空间。

3.1 高存储密度所要求的材料特性空间

光栅光谱烧孔衍射效率与频率关系为洛仑兹线形，谱宽由烧孔宽度 Γ 决定，所以提高存储密度的关键在于得到较窄的光谱烧孔。从(2)式可知，烧孔宽度除与零声子均匀吸收谱宽有关外，还受到烧孔时间 t_w 和漂白时间 t_b 的影响，如图 2 所示。当 $t_b < t_w$ 时，则烧孔加宽明显，

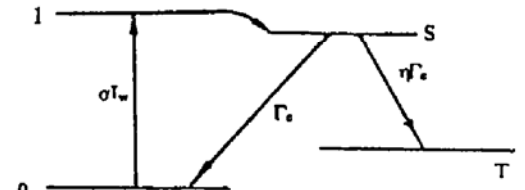


Fig. 1 Energy levels of hole-burning materials

只有当 $t_w \ll t_b$ 时, $\Gamma \approx 2\Gamma_0$ 。由功率加宽、过分光化学反应等引起的烧孔加宽忽略不计, 因 t_b 与 σ 、 I_w 、 η 成反比, 因此为避免烧孔加宽, 必须限制 σ 、 I_w 和 η 。

令 $C_w = \sigma I_w t_w$, 可得到烧孔加宽 W_p 与 η 、 C_w 关系为:

$$W_p = 3\eta C_w / \Gamma\pi \quad (8)$$

以 η 为参变量, 得到 C_w 对 W_p 的影响如图 3 的所示曲线簇。为使烧孔加宽 $W_p < 0.01 \text{ cm}^{-1}$, 当 $\eta > 0.005$, 要求 $C_w < 10$, 而当 $\eta < 0.001$, 则允许 C_w 达到 100, 也不会导致烧孔明显加宽。

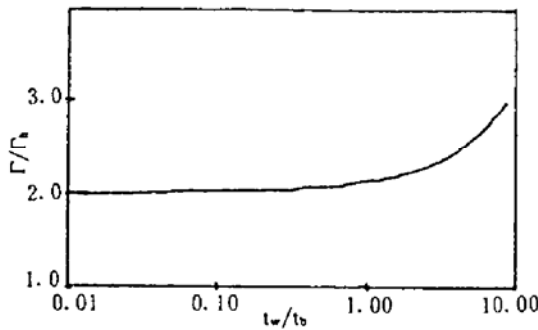


Fig. 2 Hole width as function of bleaching time

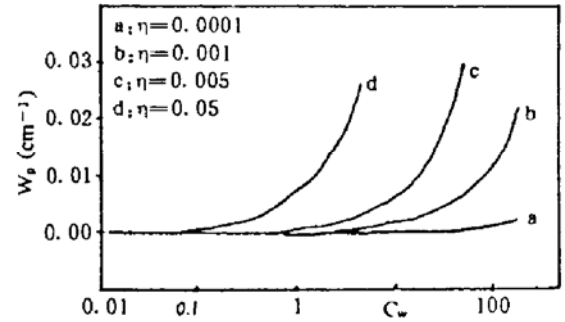


Fig. 3 The plots of hole-broadening versus excitation rate C under various burning rate

3.2 高信噪比所要求的材料特性空间

读出信噪比主要受烧孔深度 H 的影响, 图 4 分析了不同烧孔概率 η 下, 达到饱和功率加宽时, H 与 t_w/T_c 的关系 ($T_c = 1/\Gamma_c$ 为亚稳态寿命)。只有当 $\eta > 0.0005$ 时, 在较大的 t_w/T_c 下, 才能得到较深的烧孔 ($H > 1\%$), 且 η 较大时 ($\eta > 0.01$), 在很短烧孔时间内 ($t_w/T_c < 10$) 就能得到较深的光谱孔。综合考虑数据传输率和存储密度, 取 $t_w = 100 \text{ ns}$, $T_c = 10 \text{ ns}$ 较为合适。

图 5 分析了不同 η 下, C_w 对孔深 H 的影响, 上轴坐标为 $I_w = 1 \times 10^{22} \text{ photons/s} \cdot \text{cm}^2$ 、 $t_w = 100 \text{ ns}$ 时相应的 σ 值。当 $\eta > 0.001$ 时, C_w 对 H 影响较大, 在较大 C_w 时得到较深的光谱孔。因此在全息频域光谱烧孔中, 为达到较深烧孔, 要求 $\eta > 0.001$ 、 $C_w > 0.5$, 也即 $\sigma > 10^{-16} \text{ cm}^2$ 。

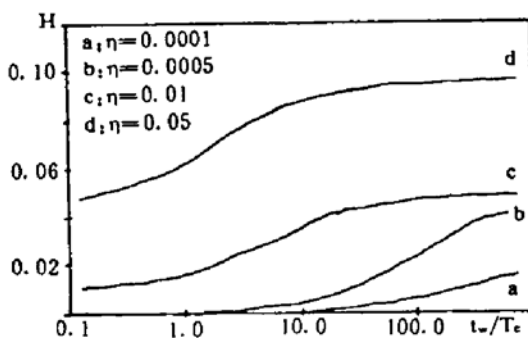


Fig. 4 The plots of hole depth versus burning time under various burning rate

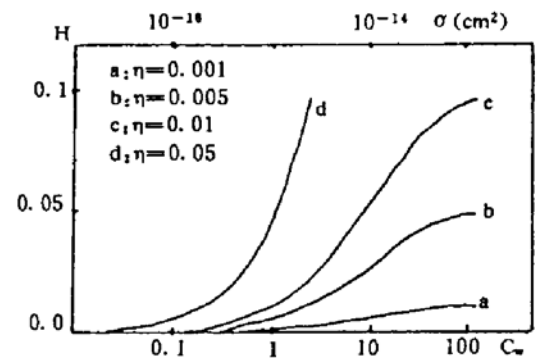


Fig. 5 The plots of hole depth versus excitation rate C under various burning rate

全息光栅光谱烧孔存储系统中, 读出谱宽 $B = (2t_R)^{-1} = 5 \text{ MHz}$, 为保证在高数据传输下, 把误码率降低到可以接受水平, 要求 $\text{SNR} > 40 \text{ dB}$, (相应于普通光盘的 $50 \sim 60 \text{ dB}$)。图 6 描述了以较低光强读出 ($I_R = 10^{20} \text{ photons/cm}^2 \cdot \text{s}$), 在不同 η 下, 满足 $\text{SNR} > 40 \text{ dB}$ 所要求的 $\sigma \sim N_{\omega L}$ 参量空间。图中左下方描述了功率加宽, 上方描述了光谱散射加宽。随 η 减小, $\sigma \sim N_{\omega L}$ 空

间收缩；而当 σ 较小时，烧孔较浅，导致左上方空间收缩。当 η 较小时，饱和读出功率允许较大，故在较大空间下也能得到较高的 SNR 。参量空间比串行存取光谱烧孔有较大的扩展。

结 论 全息光栅光谱烧孔系统中，数据直接以并得方式实现存取，数据传输速率可达 1 GBPS，而且读写时间放宽到 100 ns，读写光斑为 1 mm^2 ，这不仅有利于系统设计，并且可以放宽串行光谱烧孔中系统对材料特性的严格限制。经计算机数值分析，并考虑到饱和跃迁加宽和光谱散射加宽^[1]，可得到最佳材料特性空间为 $0.0005 < \eta < 0.1$ ， $10^{-16} < \sigma < 10^{-10}$ (cm^2)， $10^{10} < N_{\omega L} < 10^{16}$ (cm^{-2})， $T_c = 10 \text{ ns}$ 。

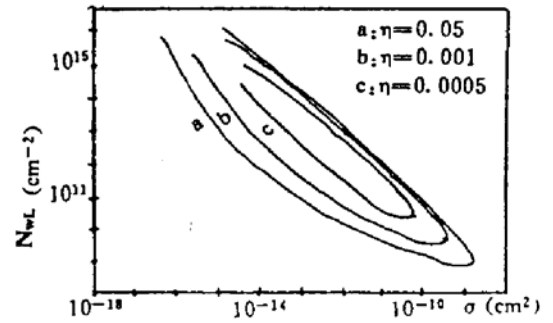


Fig. 6 Materials constraints for hole-burning materials in order to achieve practical SNR under various burning rate

参 考 文 献

- [1] W. E. Moerner *et al.*, Persistent spectral hole-burning: science and applications. Berlin, Springer-verlag, 1988
- [2] W. Lenth, High-density frequency-domain optical recording. *Proc. SPIE*, 1986, **695**: 216~223
- [3] W. E. Moerner, Laser light-induced physical processes in optical materials: persistent spectral hole-burning. *Proc. SPIE*, 1985, **541**: 60~69
- [4] 翟金会, 阮 玉, 频域光存储和全息术. *光电工程*, 1993, (5): 1~6
- [5] A. J. Meixner, A. Renn, U. P. Wild, Spectral hole-burning and holography. 1. Transmission and holographic detection of spectral hole. *J. Chem. Phys.*, 1989, **91**(11): 6728~2736

Study on Materials Characteristics of Holographic Grating Spectral Hole-Burning Storage System

Zhai Jinhui Ruan Yu

(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Sci. & Technol. Wuhan 430074)

Li Zaiguang

(National Laboratory of Laser Technology, Wuhan 430074)

(Received 21 June 1993; revised 21 October 1993)

Abstract Mathematic relations between system characteristics, materials characteristics and read/write condition are established for holographic grating spectral hole-burning technology. Optimal parameter space of material characteristics is achieved based on computer simulation analysis. The results show that holographic grating spectral hole-burning technology will greatly decrease the requirements of system characteristics imposing on material characteristics, which will offer new theoretical guidance for the study of hole-burning material.

Key words spectral hole-burning, laser-induced holographic grating hole-burning technology, hole-burning material characteristics.