

文章编号: 0253-2239(2003)04-0402-05

光聚物全息光盘记录方法和光路的优化

黄明举^{1,2} 姚华文¹ 陈仲裕¹ 侯立松¹ 干福熹¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)
(² 河南大学物理系, 开封 475001)

摘要: 提出了适用于光聚物厚膜盘状高密度全息存储的角度-空间复用相结合的存储方法。研究了光路设置对记录容量和密度的影响,分析和计算表明:对全息光盘光聚物全息存储介质来说,新方法可以获得比空间-角度复用存储方法高近一个数量级的存储容量和密度,当使用平面波做参考光、介质内参物光入射角度在 32° 时是获得最大存储容量和密度的最佳设置;对 $500\ \mu\text{m}$ 厚的光聚物介质,存储密度可达到 $42\ \text{bit}/\mu\text{m}^2$,用 CD-ROM 同样大小的全息光盘,在其相同的有效记录面积上,其总容量可以达到 400 Gbit,表明新方法是实用化光聚物盘状全息存储比较理想的方法。

关键词: 信息光学; 高密度全息存储; 全息光盘; 存储密度; 角度选择性

中图分类号: O438.1; TP333.4⁻² 文献标识码: A

1 引 言

高密度全息存储是利用体全息光栅的布拉格选择性,在存储介质的同一个位置存储成千上万个数据页,实现超高密度的三维信息存储方法。在体光栅的布拉格选择性的理论指导下,人们已经设计并实现了角度、波长、相位等复用技术^[1~3]以及与空间复用技术相结合的多种复合复用方法^[4],这些方法中波长复用技术需要可调谐激光器,这不但大大增加了存储系统的成本,而且真正适用于高密度全息存储的小型可调谐激光器技术还不够成熟,现有的工作也仅限于实验室中,短期内这种方法很难在高密度全息存储实用化系统中获得应用;相位复用技术要求有合理的相位编码技术和能与空间光调制器同步的相位调制器件,这也大大地增加了全息存储系统的复杂性和成本,不利于实用化;而角度复用技术只需要光束偏转器件或光束扫描器件,而这些器件如声光偏转器、电光偏转器、振镜等不仅技术成熟而且价格比较便宜,因此是一种比较容易实现并且成本较低的方法,很受人们的青睐。但单纯这一方法不能实现大面积材料的记录,不利于高密度全息存储的商品化。为此,1993 年和 1994 年 Tao^[5] 和 Psaltis^[6] 等人分别提出了空间-角度复用的记录方

法(SAM 方法),这种方法可以借鉴现在光盘的旋转技术,有效地利用材料的存储空间,简化了光路的复杂性,容易实现盘状体全息高密度存储,引起了人们的重视^[7],但这种方法的实验和理论计算均是以光折变晶体作为存储介质,我们知道这些晶体的厚度可以做得很大(很容易使厚度达 mm 以上的量级),这的确有利于增加材料的动态范围和存储密度,但由于这些晶体的制作方法和条件的限制,很难做成较大尺寸的盘状材料,再加上这些可擦重写型材料在记录和读出时信息的挥发性等问题还没有很好地解决,所以不利于做实用化和商品化的全息光盘。

与光折变晶体相比,光聚物材料有折射率调制度大(可达 $0.18^{[8]}$)、衍射效率高(可达 $99\%^{[9]}$)、分辨率高($3000\ \text{l}/\text{mm}$ 以上)、曝光灵敏度高($1\ \text{mW}/\text{cm}^2$)等优点,还可以通过选择掺入不同的光敏染料,实现蓝绿光等短波长记录提高记录密度;同时其合成制作条件相对简单,成本要低很多。其缺点是不容易制作厚度在 mm 量级以上的记录材料,但很容易制作大面积的盘状材料,适宜于做盘式全息记录。由于光聚物材料厚度有限($10^2\ \mu\text{m}$ 数量级),空间-角度复用记录方法对这种材料很难实现理想的记录密度和容量。我们发现若使用角度复用和空间复用相结合的角度-空间复用记录方法(ASM 方法),对光聚物盘状全息记录可以实现较高的记录密度和容量(比空间-角度复用记录方法高 3~6 倍),使得对 $500\ \mu\text{m}$ 厚的介质存储密度达到 $21\sim 42\ \text{bit}/\mu\text{m}^2$ 。

E-mail: hmingju@163.net

收稿日期:2002-04-10; 收到修改稿日期:2002-05-17

本文介绍了角度-空间复用记录方法的基本技术和理论,分别计算了以球面波和平面波为参考光的角度-空间复用记录方法在同现有 CD-ROM 相同尺寸不同厚度材料光聚物全息光盘上记录的容量和密度,研究了光路设置对记录容量和密度的影响,结果表明用平面波参考光在参物光介质内入射角度为 32° 时实现的角度-空间复用记录方法是获得高的存储密度和容量的最佳条件。

2 角度-空间复用记录方法

2.1 角度-空间复用记录方法全息光盘的基本读写光路

角度-空间复用记录方法全息光盘的基本读写光路如图 1 所示。图中 Laser 是记录光源, S 是快门, M 是反射镜, BS 是分束器, BE 是扩束系统, SLM 是空间光调制器, BM 是光束偏转元件——振镜, L_1 、 L_2 组成傅里叶变换全息存储的 $4f$ 系统, H 是全息光盘, 盘面垂直于纸面, CCD 是成像器件——电荷耦合器件。 L_3 分别距 BM 和 H 两倍焦距, 形成球面参考光; 全息光盘被固定在可以旋转的水平轴上。读写过程中激光器、快门、光束偏转器件、SLM、CCD 以及全息光盘固定的旋转电机均可由计算机控制。

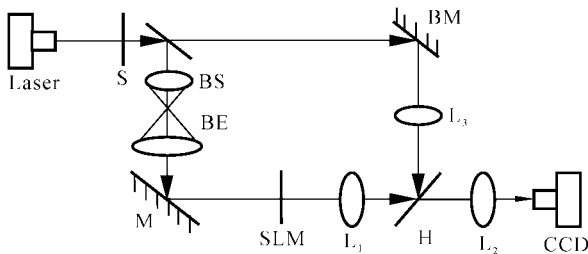


Fig. 1 Optical setup of disk-type holographic memory

2.2 角度-空间复用记录方法全息光盘的存储格式

角度-空间复用记录方法全息光盘的存储格式可用图 2 来说明, 图中各元件的表示同图 1。如图 2 所示, 全息图存放在以光盘转轴为中心的环型轨道上, 轨道之间互不重叠, 物光和参考光所在的人射平面与全息光盘记录轨道的切线方向平行, 道内的读写可通过参考光的偏转和光盘的转动实现, 不同记录轨道的读写通过径向移动全息光盘或读写光路实现。记录时用图 1 所示的球面参考波记录透射型傅里叶变换全息图, 角度-空间复用记录方法是将角度复用技术和空间复用技术完全分开分两步实现的方法, 先在记录轨道的某一个记录位置用纯角度复用方法存储一定数目的全息图, 然后旋转光盘到下一

个记录位置再记录相同数目的全息图实现空间移位复用。读出时, 可根据寻址信息确定待读全息图所在的轨道和记录位置, 先径向移动光路或全息光盘至待读轨道, 再旋转盘片至记录位置, 然后转动参考光束偏转器件到待读全息图对应的记录位置, 待读数据就会再现在 CCD 上面; 只要角度复用记录时, 记录相邻全息图参考光的角度差大于角度复用的角度选择性, 则相邻全息图所产生的串扰就可以得到抑制, 获得所要求的信噪比和误码率, 正确地读出所需数据。

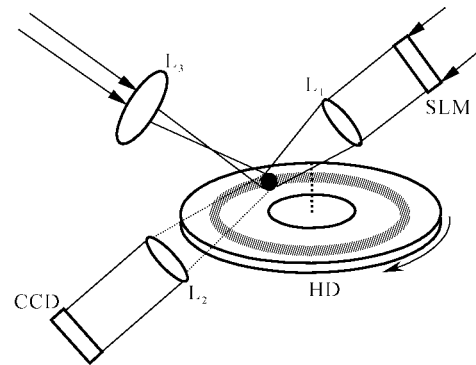


Fig. 2 Recording format of holographic disk

2.3 角度选择性和角度复用度的计算

用光线分析方法可得球面波透射型体全息存储角度复用介质内的角度选择性如(1)式所示^[10]:

$$\Delta\theta = \frac{2\lambda}{nd} \frac{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}}{\tan \theta_s - \tan \alpha}, \quad (1)$$

其中

$$\tan \alpha = \frac{|z_R \tan \theta_R| - a}{z_R - d/2}, \quad (2)$$

这里定义全息图的角度选择性为衍射效率对读出角度失配曲线中主瓣的全角宽度^[11], 其中 λ 为读写用激光波长, n 为介质的折射率, d 为介质厚度, a 为全息图的半径, θ_s 和 θ_R 分别为介质中物光和参考光与介质法线方向的夹角, α , x_R 和 z_R 的含义如文献[10]中图 2 所示。

如果参考光路所用透镜 L_3 的孔径比 $D/f = \sigma$, 则由图 1 所示的几何关系知道, 参考光主光线介质外的最大扫描角度应为

$$\theta_{out} = 2\arctan\left(\frac{D}{4f}\right) = 2\arctan(\sigma/4). \quad (3)$$

如果 θ_R 是角度复用时介质内各个全息图参考光的平均角度, 则介质内扫描角度应为

$$\theta = \theta_2 - \theta_1, \quad (4)$$

其中

$$\theta_1 = \arcsin \frac{\sin[\arcsin(n \sin \theta_R) - \theta_{out}/2]}{n}, \quad (5)$$

$$\theta_2 = \arcsin \frac{\sin[\arcsin(n \sin \theta_R) + \theta_{out}/2]}{n}, \quad (6)$$

从(1)式和(2)式可以看出,记录时每一个全息图的角度选择性与其对应参考光的角度是有关系的,为了保证角度复用过程中记录各个全息图之间参考光的角度差别满足每个全息图的角度选择性,必须选择整个记录过程中参考光角度扫描范围内最大的选择角作为角度间隔,进行角度复用。分析和计算表明,在介质内参考光的扫描范围 $\theta_1 \sim \theta_2$ 内,当参考光的记录角度为 θ_2 时 $\Delta\theta$ 最大,故若用(1)式表示角度复用过程中相邻全息图介质内参考光的入射角度间隔,则 $\tan \alpha$ 式应表示为

$$\tan \alpha = \frac{|z_R \tan \theta_2| - a}{z_R - d/2}, \quad (7)$$

此时全息光盘上一个记录位置的角度复用度,即角度复用可存储的全息图的数目为

$$M_1 = \theta/\Delta\theta. \quad (8)$$

对具体材料,还应当考虑记录介质自身动态范围和高密度全息存储对全息图衍射效率要求的限制^[12]:

$$M_2 = M^{\sharp}/\eta^{1/2}, \quad (9)$$

其中 M^{\sharp} 为记录介质的动态范围^[11], η 为高密度全息存储最终单个全息图的衍射效率,在这里可以理解为高密度全息存储系统读出时所要求的最小衍射效率。因此实际应用中角度复用度 M 应取 M_1 和 M_2 中的最小值:

$$M = \min(M_1, M_2). \quad (10)$$

3 存储容量和密度的估算

对于一张全息光盘,如果有效记录区域最小轨道半径为 r_1 、最大轨道半径为 r_2 , 则 $N = (r_2 - r_1)/2a + 1$ 为全息光盘上全息图的轨道数,第 i 个轨道的轨道半径为 $r_1 + 2ai$; 假设最小轨道可容纳 m_1 个记录位置,即 $m_1 = 2\pi r_1/2a$, 则第 i 个轨道容纳的记录位置数为

$$2\pi(r_1 + 2ai)/2a = m_1 + 2\pi i, \quad (11)$$

于是全息光盘上总的记录位置为

$$M_1 = \sum_{i=0}^{N-1} (m_1 + 2\pi i) = N\pi \left(\frac{r_1}{a} + N - 1 \right), \quad (12)$$

这些存储轨道所占的总面积为

$$S = \pi[r_1 + 2(N-1)a + a]^2 - \pi(r_1 - a)^2 = 4\pi[r_1 + (N-1)a]Na. \quad (13)$$

若设每个全息图的容量为 M_p , 则该全息光盘的总容

量为

$$C = MM_1M_p, \quad (14)$$

存储的面密度为

$$\rho = \frac{C}{S} = \frac{MM_1M_p}{S}. \quad (15)$$

为了定量地说明角度-空间复用记录方法可达到的容量和密度,我们假设光聚物全息光盘的有效存储空间和 120 mm CD-ROM 相同,即 $r_1 = 26$ mm, $r_2 = 59$ mm; 选取参考光支路透镜 L_3 的孔径比分别为 $\sigma = 0.5$ 和 1.0 , $z_R = 40$ mm, $\theta_s = \theta_R = 30^\circ$, $a = 1$ mm, $n = 1.5$; 由于光聚物的动态范围一般为 10^1 量级^[13], 高密度全息存储所要求的最小衍射效率在 10^{-4} 量级,按照(9)式计算出的 M_2 接近 10^3 数量级,远大于按照(8)式计算的 M_1 值,所以由(10)式知 $M = M_1$, 由此计算不同厚度光聚物介质全息光盘的容量和密度。因为光聚物很难做出 1 mm 以上厚的干膜样品,而材料太薄时记录容量和密度均太低,实验上常用的样品在 $100 \sim 600$ μm 之间,因此只选取 $100 \sim 800$ μm 厚的样品做了计算,在衍射极限之内选取 $M_p = 1$ Mbit, 结果如图 3 所示。从图中可以看到相同记录参量下角度-空间复用记录方法均比空间-角度复用记录方法的存储容量大,当 $\sigma = 0.5$ 时前者比后者平均大 3.2 倍, $\sigma = 1.0$ 时前者比后者大 6 倍。若用 500 μm 厚的光聚物介质,角度-空间复用记录方法用 1.0 孔径比的参考光路透镜,全息光盘的容量可达到 360 Gbit, 密度达 40 bit/ μm^2 ; 用 0.5 孔径比的参考光路透镜,容量也可达到 195 Gbit, 密度为 22 bit/ μm^2 ; 而空间-角度复用记录方法方法的容量和密度仅分别为 62 Gbit 和 7 bit/ μm^2 , 显然角度-空间复用记录方法更适合于光聚物盘状高密度全息存储。至于图中存储的容量和密度与材料的厚度成单调增加的关系与体全息的理论和实验结果都是一致的,根据图中的计算结果,如果材料的厚度达到

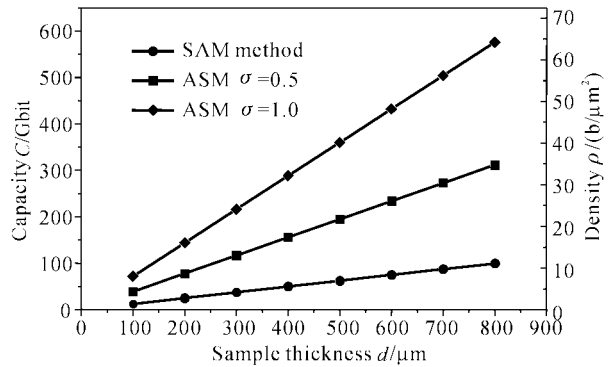


Fig. 3 Recording capacity C and density ρ vs sample thickness d in different recording condition

800 μm , 则容量可达到 575 Gbit, 密度为 64 $\text{bit}/\mu\text{m}^2$ 。

4 光路设置的优化

4.1 参物光入射角度的优化

结合前面的公式, 我们可以得到存储容量和参物光入射角度的关系为

$$C = M_1 M_p \frac{\theta d (\tan \theta_s - \tan \alpha)}{2\lambda \sqrt{1 + \tan^2 \alpha}}, \quad (16)$$

其中 θ 由(4)式表示, $\tan \alpha$ 由(7)式表示, 显然记录角度对存储容量的影响是比较复杂的, 我们选取材料的厚度 $d = 500$, $\sigma = 1.0$, 其它参量如同图 3, 假设 $\theta_s = -\theta_R$, 则 θ_s 的变化对存储容量和密度的影响如图 4 所示。

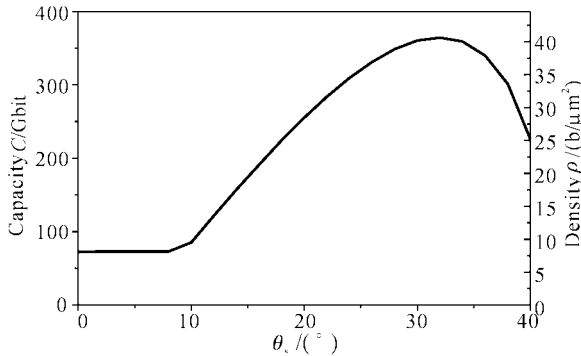


Fig. 4 Recording capacity C and density ρ vs incidence angle θ_s of reference and object beam

显然, 当入射角度较小时, 存储容量和密度随记录角度的增加而增加; 当入射角度达到 32° 时, 记录的容量和密度达到最大值; 之后, 记录容量和密度反而随角度的增加而减小, 可见这种光路的最佳入射角度是 32° 。

4.2 参考光类型的优化

当图 1 中的参考光支路光束偏转元件和全息光盘之间的单透镜 L_3 换做双透镜的 $4f$ 系统时, 就可以实现用平面波参考光做全息记录, 而平面波参考光记录时介质内角度选择性的公式为^[11]

$$\Delta\theta = \frac{2\lambda}{nd} \frac{\cos \theta_s}{\sin(\theta_s - \theta_R)}, \quad (17)$$

此时如果 $4f$ 系统所用透镜的孔径比为 $\sigma = D/f$, 则介质外平面参考光的最大扫描范围为

$$\theta_{\text{out}} = 2\arctan\left(\frac{D}{2f}\right) = 2\arctan(\sigma/2). \quad (18)$$

与(3)式比较可以看出同球面波参考光具有相同扫描角度的平面波参考光所需透镜的孔径比减小了一倍, 这有利于光路的设计和实现。

用(17)式和(18)式代替球面波的(1)式和(3)式, 计算同图 3 一样参量的全息光盘的容量和密度, 结果如图 5 所示。

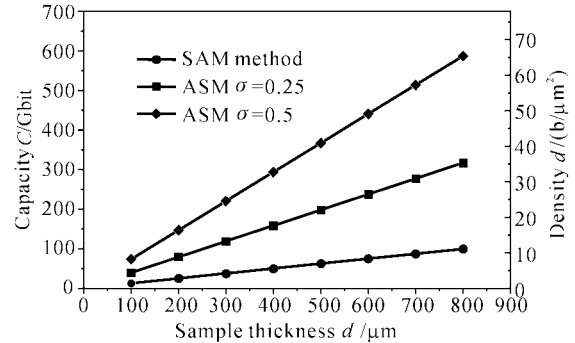


Fig. 5 Recording capacity C and density ρ vs sample thickness d with plane wave reference beam in different recording condition

从图中可以看出, 用平面波做参考光利用角度-空间复用记录方法进行光聚物高密度全息存储可以获得比用球面波做参考光略高的存储容量和密度, 同样要比用空间-角度复用记录方法的容量和密度高几倍, 同时这种方法所用的透镜的孔径比在接近相同的容量和密度下只是球面波做参考光所用透镜孔径比的一半。显然用 $4f$ 系统所实现的平面波做参考光是角度-空间复用记录方法更佳的选择。

此时, 参物光入射角度与记录容量和密度的关系可表示为

$$C = M_1 M_p \frac{\theta n d \sin(\theta_s - \theta_2)}{2\lambda \cos \theta_s}, \quad (19)$$

其中 θ 由(4)式表示, 在 $\theta_s = -\theta_R$ 时, 其数值计算的结果如图 6 所示。

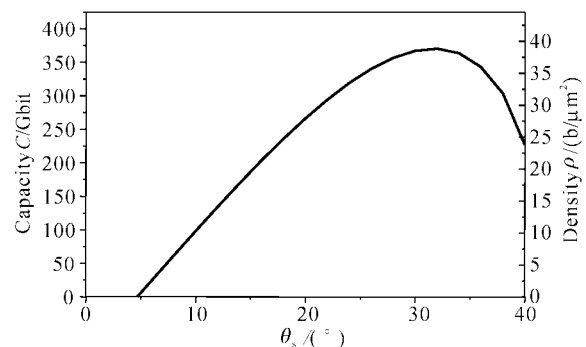


Fig. 6 Recording capacity C and density ρ vs incidence angle of θ_s reference and object beam with plane wave reference

可以看到如同用球面波一样, 在 $\theta_s = 32^\circ$ 时可以得到最大的记录容量和密度。

结论 提出了一种易于实现且适合于具有较小厚度的光聚合物厚膜盘状高密度全息存储的角度-空间复用记录方法,推导了这种全息光盘的记录容量和密度公式,研究了光路设置对存储容量和密度的影响,发现无论用平面波还是球面波做参考光,角度-空间复用记录方法均可以获得比空间-角度复用记录方法高 3~6 倍的容量和密度,使得对 500 μm 厚度的光聚合物介质,在 120 mm 大小的全息光盘上可获得 360 Gbit 的记录容量和 42 bit/ μm^2 的密度;而且平面波做参考光用较小孔径比的透镜即可获得比用球面波做参考光略高的容量和密度,更有利于该系统的设计与实现。同时发现随着参考光支路所用透镜孔径比的增加,角度复用的有效扫描角度增加,可以增加角度复用度,从而可以增加记录的容量和密度;另外还发现无论用球面波还是用平面波做参考光,当介质内参物光入射角度为 32° 时,角度-空间复用记录方法对光聚合物全息光盘记录的容量和密度均为最大,表明该角度为最佳的记录角度。

参 考 文 献

- 1 Mok F H. Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(11):915~917
- 2 Rakuljic G A, Leyva V. Optical data storage by using orthogonal wavelength-multiplexed volume holograms. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(20):1471~1473
- 3 Müller K O, Denz C, Rauch T *et al.*. Analog and digital data storage in a phase-coded holographic memory. *Proc. SPIE*, 1997, **3402**:48~59
- 4 Tao Shiquan, Wang Dayong, Jiang Zhuqing *et al.*. *Optical Holographic Storage*. Beijing: Beijing Polytechnic University Press, 1998. 294~298
- 5 Tao S, Selviah D R, Midwinter J E. Spatioangular multiplexed storage of 750 holograms in an Fe:LiNbO₃. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(11):912~914
- 6 Li Hsin-Yu Sideny, Psaltis Demetri. Three-dimensional holographic disks. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(17):3764~3774
- 7 Tao S, Song Z H, Selviah D R *et al.*. Spatioangular-multiplexing scheme for dense holographic storage. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(29):6729~6737
- 8 Colburn W S. Review of materials for holographic optics. *J. Imaging Sci.*, 1997, **41**(5):443~456
- 9 Blaya S, Carretero L, Mallavia R *et al.*. Optimization of an acrylamide-based dry film used for holographic recording. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(32):7604~7610
- 10 Tao Shiquan, Xu Min. Spatioangularly-multiplexed three-dimensional holographic disks. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(8):1615~1620 (in Chinese)
- 11 Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings. *Bell Syst. Tech. J.*, 1969, **48**(9):2909~2947
- 12 Mok F, Burr G, Psaltis D. A system metric for holographic memory systems. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(12):886~898
- 13 Dhar L, Hale A, Katz H E *et al.*. Recording media that exhibit high dynamic range for digital holographic data storage. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(7):487~489

Optimization of Recording Method and Optical Setup of Photopolymer Disk-Type Holographic Memory

Huang Mingju^{1,2} Yao Huawen¹ Chen Zhongyu¹ Hou Lisong¹ Gan Fuxi¹

¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
 The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800
² Department of Physics, Henan University, Kaifeng 475001
 (Received 10 April 2002; revised 17 May 2002)

Abstract: A new method for disk-type photopolymer high-density holographic storage based on angular-multiplexing and spatial-multiplexing is described. The effects of optical setup on the recording capacity and density are studied. The recording optical setup for getting the maximum recording capacity and density is optimized.

Key words: information optics; high-density holographic storage; holographic disk; recording density; Bragg angular selectivity