

半球形固体浸没透镜显微系统的透射光场研究*

张耀举 叶雪华

(温州大学物理与电子信息学院, 温州 325027)

摘要 应用高数值孔径系统的矢量衍射理论研究了半球形固体浸没透镜(SIL)球面表面的反射对 SIL 系统透射场的影响. 研究表明, 半球形 SIL 球面表面的反射对 SIL 显微系统的透射光强产生很大的影响. 然而, 这种反射不改变半球形 SIL 显微系统的分辨率. SIL 球面介质界面材料的折射率失配越大, 透射光强减小越多. 在 SIL 的球面表面涂上减反膜或者在物镜和 SIL 之间填充折射率较大(但比 SIL 的折射率小)的介质可以提高系统的透射光强.

关键词 信息光学; 半球形固体浸没透镜; 反射; 偏振; 透射光场

中图分类号 O438.2 **文献标识码** A

0 引言

衍射限制普通显微镜的空间分辨率大约在半个波长以内. 减小波长或增加收集角可以提高显微镜的空间分辨率, 一般通过油浸没或固体浸没透镜(SIL)显微技术来实现^[1~4]. SIL 材料的折射率比油的折射率大, 例如, 可见光波长范围内, GaP 的折射率为 3.5, 玻璃的折射率接近 2, 而油的折射率大约为 1.4, 所以近场 SIL 显微镜可以使空间分辨率有较大的提高. SIL 技术已广泛应用于光学显微^[1]、光学数据存储^[2,5]、刻蚀^[6]和半导体纳米结构的研究^[7]. 在实践中, 常常使用两种类型的 SIL. 一种是半球形 SIL^[1], 另一种是超半球型 SIL(Weierstrass 光学)^[2]. Weierstrass SIL 的优点是, 可以使远场物镜的数值孔径增加 n^2 倍, 而半球形 SIL 只增加 n 倍(n 是 SIL 的折射率). 它的缺点是, 由于它的几何结构与折射率有关, SIL 材料的色散将会使这种 SIL 产生严重的色差. 对于大多数材料, 这种色差限制了可用的带宽. 半球形 SIL 的放大率横向色差较小, 这种透镜可以看作是消色差的透镜. 半球形 SIL 的另一个优点是它比 Weierstrass SIL 的光学厚度容限大^[8]. 所以, 最近几年, 半球形 SIL 获得了非常广泛的应用^[9~13].

在理论方法上, Richards 和 Wolf^[14] 已经给出了高数值孔径系统的矢量衍射理论. Török 等人^[15] 应用这种方法讨论了平面浸没固体的速逝场. Helseth^[16], Guo 等人^[17], Lu 等人^[18] 和前面的文章^[19,20] 应用这种方法分析了振幅或相位滤波器对半球形 SIL 系统透射场的影响. 张东玲等人应用有限差分方法分析了半球形 SIL 透射场分布^[21,22]. 然

而, 这些对于半球形 SIL 显微系统的理论分析^[16~22] 中, 只考虑了光在半球形 SIL 的平面介质界面的反射, 而忽略了光在 SIL 的球面介质界面的反射作用. 本文目的是要考察半球形 SIL 的球面介质界面的反射对 SIL 显微系统透射光场的影响.

1 偏振矢量

图 1 是半球形 SIL 系统截面图, 图中应用 Cartesian 基和自然坐标基进行坐标变换. 高数值孔径物镜把入射光会聚到半球形 SIL 的平面表面上. 光在介质界面的折射和反射与偏振有关, 入射

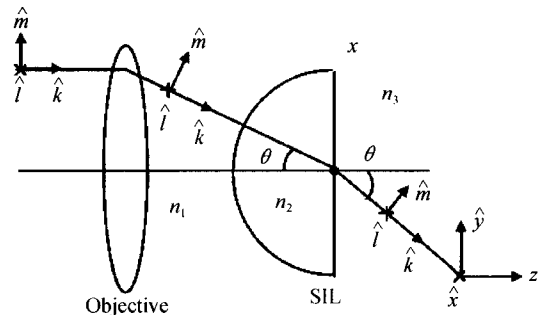


图 1 h-SIL 显微系统图

Fig. 1 Schematic overview of the h-SIL microscopy systems 在聚焦系统的偏振状态将影响在焦点附近的分辨率和透射场分布. 为了定量地讨论这个问题, 必须寻找偏振矢量的一般表达式. 假设入射偏振与极角和偏向角有关

$$P_0 = \begin{bmatrix} a(\theta_1, \phi) \\ b(\theta_1, \phi) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

用算符

$$R = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

表示透镜对场矢量的旋转效应; 用算符

* 浙江省教育厅高校科研基金(20040330)资助
Tel: 0577-88373109 Email: zhangyaoju@sohu.com
收稿日期: 2005-07-25

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

表示直角坐标基在自然坐标基上的投影;用算符

$$\mathbf{L}^{(j)} = \begin{bmatrix} \cos \theta_j & 0 & \sin \theta_j \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_j & 0 & \cos \theta_j \end{bmatrix} \quad (4)$$

表示自然坐标基旋转到 s -和 p -偏振矢量;用算符

$$\mathbf{T}^{(j)} = \begin{bmatrix} t_p^j & 0 & 0 \\ 0 & t_s^j & 0 \\ 0 & 0 & t_p^j \end{bmatrix} \quad (5)$$

表示通过半球形 SIL 的球面介质界面 [$T^{(1)}$] 和平面介质界面 [$T^{(2)}$] 的透射菲涅尔系数.

这样,把系统透射场的偏振矢量表示为

$$\mathbf{P}(\theta_1, \phi) = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{L}^{(2)} \mathbf{T}^{(2)} [\mathbf{L}^{(1)}]^{-1} \mathbf{T}^{(1)} \mathbf{C} \mathbf{R} \mathbf{P}_0 \quad (6)$$

将方程(1)~(5)代入方程(6),经过一些冗长的运算之后,得到

$$\mathbf{P}(\theta_1, \phi) = \begin{bmatrix} \frac{a}{2}(A_1 + B_1 \cos 2\phi) + \frac{b}{2}B_1 \sin 2\phi \\ \frac{a}{2}B_1 \sin 2\phi + \frac{b}{2}(A_1 - B_1 \cos 2\phi) \\ -aC_1 \cos \phi - bC_1 \sin \phi \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中

$$A_1 = t_p^1 t_p^2 \cos \theta_2 + t_s^1 t_s^2$$

$$B_1 = t_p^1 t_p^2 \cos \theta_2 - t_s^1 t_s^2$$

$$C_1 = t_p^1 t_p^2 \sin \theta_2$$

在半球形 SIL 的球面界面处,由于光线是垂直 SIL 球面表面入射(见图 1),所以

$$t_s^1 = t_p^1 = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} \quad (8)$$

式中 n_1 是在物镜与 SIL 之间的介质的折射率(可以是空气、油或其它介质), n_2 是 SIL 的折射率. 在 SIL 的平面介质界面处

$$t_s^2 = \frac{2n_2 \cos \theta_1}{n_3 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (9)$$

$$t_p^2 = \frac{2n_2 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_1 + n_3 \cos \theta_2}$$

式中 n_3 是 SIL 右侧介质的折射率, θ_1 和 θ_2 由折射定律 $n_2 \sin \theta_1 = n_3 \sin \theta_2$ 相联系. 对于这样的半球形 SIL 系统,由于在球面界面处的透射系数 $t_s^1 = t_p^1$ (见式(8)),所以,可以将式(7)写作

$$\mathbf{P}(\theta_1, \phi) = t_s^1 \mathbf{P}_c(\theta_1, \phi) \quad (10)$$

其中

$$\mathbf{P}_c(\theta_1, \phi) = \begin{bmatrix} \frac{a}{2}(A + B \cos 2\phi) + \frac{b}{2}B \sin 2\phi \\ \frac{a}{2}B \sin 2\phi + \frac{b}{2}(A - B \cos 2\phi) \\ -aC \cos \phi - bC \sin \phi \end{bmatrix}$$

$$A = t_p^2 \cos \theta_2 + t_s^2$$

$$B = t_p^2 \cos \theta_2 - t_s^2$$

$$C = t_p^2 \sin \theta_2$$

2 透射场的强度

依照 Richards 和 Wolf 的理论^[13] 以及 Török 等人给出的公式^[15], SIL 系统的透射场可以表达为

$$\mathbf{E} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\alpha} \mathbf{P}(\theta_1, \phi) \exp(ik_0 \Psi) \exp(ik_3 z \cos \theta_2) \cdot \sin \theta_1 d\theta_1 d\phi \quad (11)$$

式中, Ψ 代表 SIL 与右边介质的折射率失配所引入的像差函数^[15] (对于半球形 SIL 表面显微系统,光线垂直于球面表面, $\Psi=0$), k_0 是光在真空中的波矢, $k_3 = n_3 k_0$, α 是物镜的会聚半角. 一般情况下, t_s^1 和 t_p^1 与会聚角 θ_1 有关,但对于图 1 的半球形 SIL 系统, t_s^1 与 t_p^1 相等且与 θ_1 无关(见式(8)). 将式(10)代入(11),把 t_s^1 提到积分的外面,那么半球形 SIL 系统的透射光强为

$$I = |\mathbf{E}|^2 = (t_s^1)^2 |\mathbf{E}_c|^2 \quad (12)$$

式中, $|\mathbf{E}_c|^2$ 为通常忽略 SIL 的球面表面反射 ($n_1 = n_2$) 时系统的透射光强^[16]

$$|\mathbf{E}_c|^2 = \left| \int_0^{2\pi} \int_0^{\alpha} \mathbf{P}_c(\theta_1, \phi) \exp(ik_0 \Psi) \cdot \exp(ik_3 z \cos \theta_2) \sin \theta_1 d\theta_1 d\phi \right|^2 \quad (13)$$

由式(12)可见,当考虑半球形 SIL 的球面表面反射时,透射光强减小 $|t_s^1|^2$ 倍. 图 2 给出了半球形 SIL 系统透射场的光强随半球形 SIL 球面界面介质折射率失配 ($n_2 - n_1$) 的变化. 从图中可以看出,球面界面折射率失配越大,透射光强减小越多; SIL 左侧介质的折射率 (n_1) 越大,透射光强减小较少. 例如,当 $n_1 = 1$ (空气介质), $n_2 = 1.83$ (LaSFN9 玻璃 SIL) 时, $|t_s^1|^2 = 0.499$; 当 $n_1 = 1, n_2 = 3.5$ (GaP 半导体 SIL) 时, $|t_s^1|^2 = 0.198$; 当 $n_1 = 1.4$ (油介质), $n_2 =$

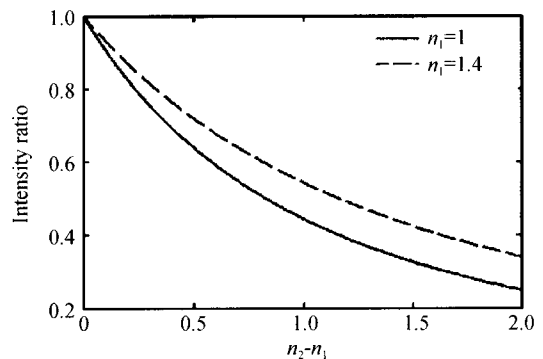


图 2 考虑和不考虑在 h -SIL 的球面表面的透射强度比折射率失配的变化

Fig. 2 Transmission intensity ratio between taking account and taking no account of the reflection at the spherical surface of h -SILs as a function of the mismatch in refractive index

1.83 时, $|t_s^1|^2 = 0.752$. 尽管透射光强的减小, 由式 (12) 可见, 半球形 SIL 球面表面的反射不改变这种 SIL 系统的光场的空间分布. 也就是说, 不改变系统的空间分辨率. 众所周知, SIL 材料的折射率越大, 系统的分辨率越高^[1], 但是由于球面表面的反射, 系统透射光的强度则大大减小, 这对于 SIL 的某些应用 (例如, 精密刻蚀) 是一个严重障碍^[6]. 为了提高光的透射率同时保持良好的分辨率, 可以在半球形 SIL 的球面表面涂上一层减反膜. 例如, 在折射率为 3.5 的 GaP 材料 SIL 球面表面涂上一层光学厚度为 $\lambda_0/4$ (λ_0 是照明光的波长)、折射率为 1.83 的 LaSFN9 玻璃薄膜, 球面表面的反射率几乎为零 (4.867×10^{-4}), 这样可大大加强系统的透射光强, 同时保持 SIL 系统高的空间分辨率特性.

3 结论

本文首先构建了涉及半球形 SIL 球面表面反射在内的 SIL 系统的偏振矢量, 然后研究了半球形 SIL 球面表面反射对 SIL 系统透射场的影响. 结果发现, 半球形 SIL 球面表面反射使得 SIL 系统透射场的强度减小, 球面介质界面的折射率失配越大, 强度减小越大. 这些结果给出了一个重要的方法提示: 在显微系统的物镜与 SIL 之间充入油或者在半球形 SIL 的球面表面涂上一层减反膜可以大大提高半球形 SIL 显微系统透射光的强度而不改变系统的空间分辨率.

参考文献

- Mansfield S M, Kino G S. Solid immersion microscope. *Appl Phys Lett*, 1990, **57**(24): 2615~2616
- Terris B D, Mamin H J, Rugar D, *et al.* Near-field optical data storage using a solid immersion lens. *Appl Phys Lett*, 1994, **65**(4): 388~390
- Karrai K, Lorenz X, Novotny L. Enhanced reflectivity contrast in confocal solid immersion lens microscopy. *Appl Phys Lett*, 2000, **77**(21): 3459~3461
- Wu Q, Feke G D, Grober R D. Realization of numerical aperture 2.0 using a gallium phosphide solid immersion lens. *Appl Phys Lett*, 1999, **75**(26): 4064~4067
- 冯晓强, 贺锋涛, 张东玲, 等. 固体浸没透镜飞行高度的气浮控制. *光子学报*, 2005, **34**(6): 927~930
Feng X, He F, Zhang D, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(6): 927~930
- Ghislain L P, Elings V B. Near-field photolithography with a solid immersion lens. *Appl Phys Lett*, 1999, **74**(4): 501~503
- Hewaparakrama K P, Wilson A, Mackowski S, *et al.* Subwavelength multichannel imaging using a solid immersion lens; Spectroscopy of excitons in single quantum dots. *Appl Phys Lett*, 2004, **85**(22): 463~5465
- Baba, M, Sasaki T, Yoshita M, *et al.* Aberrations and allowances for errors in a hemisphere solid immersion lens for submicron-resolution photoluminescence microscopy. *J Appl Phys*, 1999, **85**(9): 923~925
- Poweleit C D, Gunther A, Goodnick S. Raman imaging of patterned silicon using a solid immersion lens. *Appl Phys Lett*, 1998, **73**(16): 2275~2277
- Koyama K, Yoshita M, Baba M, *et al.* High collection efficiency in fluorescence microscopy with a solid immersion lens. *Appl Phys Lett*, 1999, **75**(12): 1667~1669
- Zwiler V, Björk G. Improved light extraction from emitters in high refractive index materials using solid immersion lenses. *J Appl Phys*, 2002, **92**(2): 660~665
- Yoshita M, Koyama K, Baba M, *et al.* Fourier imaging study of efficient near-field optical coupling in solid immersion fluorescence microscopy. *J Appl Phys*, 2002, **92**(2): 862~865
- Moehl S, Zhao H, Don B D. Solid immersion lens-enhanced nano-photoluminescence; Principle and applications. *J Appl Phys*, 2003, **93**(10): 6265~6272
- Richards B, Wolf E. Electromagnetic diffraction in optical systems II. Structure of the image field in an aplanatic system. *Proc Roy Soc A*, 1959, **253**: 358~379
- Török P, Varga P, Booker G R. Electromagnetic diffraction of light focused through a planar interface between materials of mismatched refractive indices; structure of the electromagnetic field. *J Opt Soc Am A*, 1995, **12**: 2136~2144
- Helseth L E. Roles of polarization, phase and amplitude in solid immersion lens systems. *Opt Commun*, 2001, **191**: 161~172
- Guo F, Schlesinger T E, Stancil D D. Optical field study of near-field optical recording with a solid immersion lens. *Appl Opt*, 2000, **39**(2): 324~332
- Lu Y, Xie J, Zhang J, *et al.* Increase the storage density of solid immersion lens system by high-pass angular spectrum filter method. *Opt Commun*, 2002, **203**: 87~92
- Zhang Y, Xiao H, Zhang C. Diffractive super-resolution elements applied to near-field optical data storage with solid immersion lens. *New J Phys*, 2004, **6**(75): 1~14
- Zhang Y, Zhang C, Zou Y. Focal-field distribution of the solid immersion lens system with an annular filter. *Optik*, 2004, **115**(6): 277~280
- 张东玲, 白永林, 冯晓强, 等. FDTD 方法对固体浸没透镜的光场分析. *光子学报*, 2004, **33**(7): 884~888
Zhang D L, Bai Y L, Feng X Q, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 884~888
- 贺锋涛, 张东玲, 白永林, 等. 固体浸没透镜出射光场偏振特性研究. *光子学报*, 2005, **34**(2): 276~279
He F T, Zhang D L, Bai Y L, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 276~279

Transmission Field Study of Optical Microscopy Systems with a Hemisphere Immersion Lens

Zhang Yaoju, Yie Xuehua

College of Physics & Electrical Information, Wenzhou University, Wenzhou 325027

Received date: 2005-08-19

Abstract The reflection effect of the spherical surface of a hemisphere solid immersion lens (SIL) has been investigated using the vectorial diffraction theory for high numerical aperture systems. The results showed that this reflection had an important influence on the transmitted field intensity of the SIL microscopy system. However, the reflection on the spherical surface of a hemisphere SIL did not change the resolution of the hemisphere SIL microscopy system. The larger mismatch in refractive indices on both sides of the SIL's spherical interface results in the less transmission intensity of the system. This disadvantage could be overcome by using one layer of antireflecting film that was coated on the SIL's spherical surface or by filling the space between the objective and the SIL with a material with large (but smaller than SIL's) refractive index.

Keywords Information optics; Hemisphere solid immersion lens; Reflection; Polarization vector; Transmission field



Zhang Yaoju was born in Dengzhou city of Henan Province in July of 1960. He graduated and received his M. S. Degree from Department of Physics, Henan Normal University, Xingxiang, China, in June of 1990. His interesting research areas are diffractive optics and binary optics, microscopy, optical data storage and laser applications. He has published over 40 scientific papers on scientific journal where 18 papers are indexed by SCI or EI.